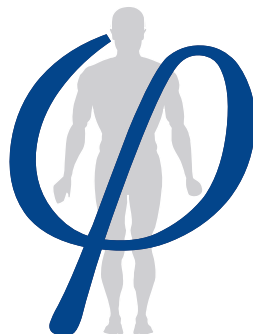


Annales  
de la  
Fondation Fyssen

N° 26



---

Annales  
de la Fondation  
Fyssen

---

2011

Directeur de la publication : Daniel LALLIER

Administration : 194, rue de Rivoli – Paris 1<sup>er</sup>  
Tél. : 01 42 97 53 16

Secrétariat de rédaction : Julie RUBIN  
e-mail : j.rubin@fondationfyssen.fr

Copyright : Les Annales de la Fondation Fyssen 2011  
Cette publication ne peut être vendue / *Publication not for sale*

Tous droits réservés pour tous pays : toute reproduction, diffusion ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme que ce soit, est interdite sans accord préalable et écrit de la Fondation Fyssen.

*All rights reserved for all countries : no part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means without the prior written permission of the Fyssen Foundation.*

## SOMMAIRE

### **ANTHROPOLOGIE / ETHNOLOGIE**

- ANDRIEU Chloé** (Boursière 2009/2010) :  
Contrôle et ritualisation de la production : les dépôts d'éclats chez les Mayas à l'époque classique (250-950 après J.C.). ..... 5
- MARTIN Fabienne** (Boursière 2008/2009) :  
L'analogie et l'identique. Une analyse de l'amitié en Inde, dans le contexte de la lèpre. .... 17

### **ETHOLOGIE / PSYCHOLOGIE**

- KRONMÜLLER Edmundo** (Boursier 2008/2009) :  
Mécanismes cognitifs pour la compréhension mutuelle lors d'une conversation. .... 32
- LALLIER Marie** (Boursière 2009/2010) :  
La transparence orthographique influence le développement de l'attention visuelle : Le cas du bilinguisme gallois-anglais. .... 44
- PORTRAT Sophie** (Boursière 2008/2009) :  
Mémoire de travail et apprentissages chez l'enfant : Une question d'attention. .... 53
- SKORUPPA Katrin** (Boursière 2009/2010) :  
Apprendre à gérer la variation phonologique : les enfants de 2 ans ½ connaissent les règles d'assimilation en français et en anglais. .... 63

### **NEUROBIOLOGIE**

- ALBOUY Geneviève** (Boursière 2008/2009) :  
Rôle du sommeil dans la consolidation de la mémoire procédurale chez l'homme exploré à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). .... 75
- DUFOR Olivier** (Boursier 2009/2010) :  
Neuro-topographie des effets de fréquence lexicale et de longueur de mots au cours d'une tâche d'écriture. Participation du cortex prémoteur dorsal gauche au buffer graphémique. .... 82
- THURA David** (Boursier 2008/2009) :  
Dynamique temporelle de la prise de décision dans un environnement changeant. .... 95
- YAMAGATA Nobuhiro** (Boursier 2008/2009) :  
Traitement des signaux visuels dans le cerveau de l'abeille : étude de la voie ventrale par imagerie calcique *in vivo*. .... 113

### **PALÉONTOLOGIE / ARCHÉOLOGIE**

- DIDIER Aurore** (Boursière 2008/2009) :  
L'utilisation de la couleur dans les céramiques protohistoriques du Balochistan pakistanais et de Mundigak (Afghanistan). Identités culturelles et traditions techniques. .... 126

## SOMMAIRE

<b>MARTINEAU Rémi</b> (Subvention de Recherche 2009) : Organisation territoriale et socio-économique au Néolithique final dans la région du Grand-Pressigny. Caractérisation des provenances des matériaux céramiques. ....	150
<b>RENDU William</b> (Boursier 2008/2009) : Apport de la saisonnalité de chasse du Daim à Kébara (Israël) à la connaissance des capacités de planification des activités et d'anticipation des besoins chez les Néandertaliens du Levant. ....	174
<b>BIBLIOTHÈQUE</b> .....	190

# Contrôle et ritualisation de la production : les dépôts d'éclats chez les Mayas à l'époque classique (250-950 ap. J.C.)

Chloé ANDRIEU

## Résumé

À l'époque classique (250-950 ap J.C.) les Mayas déposaient fréquemment de simples déchets de taille au lieu d'objets finis dans des contextes aussi prestigieux que des tombes royales ou le dessous des stèles. L'étude technologique du matériel de quatre dépôts de Cancuen (Guatemala) comparé à un échantillon important du reste de la collection de ce site montre que ces dépôts correspondent à des éclats prélevés sur certains ateliers, qui pourraient donc révéler l'existence d'un contrôle partiel des productions correspondantes. L'analyse d'éclats incisés et dessinés issus de Uaxactun et Tikal nous permet quant à elle d'envisager l'existence de productions et de destructions rituelles associées à ces chaînes opératoires.

## Mots clés

Maya, lithique, dépôts, spécialisation artisanale, économie

## Controlled and ritual productions: Maya flake deposits during the Classic period (250-950 ap. J.C.)

### Abstract

During the Classic period (A.D. 250-950) the Maya frequently cached flakes and production debris instead of finished objects in such prestigious contexts such as royal burials or under steles. The technological analysis of four deposits in Cancuen (Guatemala) compared to the remainder of the collection on this site shows that these deposits correspond to flakes that were taken from workshops, and could therefore indicate a partial control of this production. The study of incised flakes from Uaxactun and Tikal enables us to consider the hypothesis of ritual production and destruction associated with these specific production processes or *chaînes opératoires*.

### Keywords

Maya, lithic, deposit, specialization, economy

Si les systèmes politiques des sociétés mayas à l'époque classique (250-950 ap. J.-C.) sont relativement bien connus grâce à l'épigraphie et à l'iconographie, en revanche, l'organisation économique des petites royautes indépendantes les unes des autres qu'elles constituaient est encore très mal comprise. Cela tient en partie à ce que les données disponibles pour comprendre le fonctionnement de la production et des échanges dans les Basses Terres sont rares, en particulier pour cette raison qu'aucun atelier lithique ou céramique n'a encore été découvert dans un centre urbain. Les quelques centres de production étudiés à ce jour se situent en effet en périphérie

ou dans de petits sites secondaires (Rice, 1987 ; Potter et King, 1995), ce qui complique fortement la détermination du rôle économique des cités ainsi que la compréhension de la place que tenaient les élites dans l'économie.

On observe pourtant de fortes concentrations de déchets de silex et d'obsidienne à l'intérieur des cités : il s'agit de dépôts d'éclats disposés sur des tombes royales ou sous des stèles (Moholy-Nagy, 1997). Cependant, contrairement aux ateliers, ces dépôts ne se trouvent pas en dehors des cités, mais au centre de celles-ci, dans des structures de pouvoir (Andrieu, 2009). Ces dépôts ont été interprétés très tôt de manière symbolique,

comme une représentation des différentes strates qui composent l'inframonde par exemple (Coe, 1988). La comparaison bibliographique de l'ensemble des données disponibles sur ces dépôts indique cependant qu'ils correspondent toujours aux déchets des mêmes chaînes opératoires : la production de lames par pression pour l'obsidienne et des productions bifaciales dans le cas du silex (Andrieu 2009). Cette pratique étonnante d'enfouissement de déchets de taille bien particuliers en contextes rituels pourrait donc être le signe d'une certaine forme de contrôle de ces productions exercé par le pouvoir (Ibid).

D'autre part, le recensement des occurrences de cette pratique m'a permis de montrer qu'elle n'est attestée que dans la moitié sud des Basses Terres, là où les indices d'un pouvoir centralisé sont les plus forts (Andrieu, 2009). Ces dépôts pourraient donc révéler des différences d'organisation économique et politique au sein de l'aire maya, qui ont été soupçonnées de longue date (Michelet et Arnauld, 2004 ; Chase et Chase, 2004). Par ailleurs, les contextes prestigieux dans lesquels ils ont été découverts soulèvent la question de la façon dont ces déchets de taille étaient perçus, car les Mayas semblent avoir accordé une importance particulière à ce qui n'était pas l'objet fini (Stanton et al., 2008).

## Méthodologie

La technologie lithique (Inizan et al., 1995) peut définir les intentions primaires et secondaires du débitage et ainsi déterminer ce qui était perçu comme un déchet de production par le tailleur. Elle est donc particulièrement adaptée pour comprendre les critères de sélection des éclats déposés et, par comparaison avec le reste du matériel d'un site, pour comprendre la portée économique et rituelle de cette pratique. J'ai donc procédé à l'étude technologique de quatre dépôts d'éclats du site de Cancuen (Guatemala) (fig. 1), tous datés du Classique Récent (650-800 ap. J.-C.), ainsi qu'à l'analyse d'un échantillon important du matériel lithique du reste du site (10 512 pièces). Par ailleurs, l'étude technologique et iconographique de 30 déchets de taille issus de Tikal et Uaxactun, également découverts en offrandes sous des stèles, mais qui présentent la particularité d'avoir été dessinés sur leur face inférieure, me permet d'apporter des éléments de réflexion quant aux représentations mentales associées à cette pratique.



**Figure 1 :** Carte de l'aire maya indiquant les sites mentionnés dans le texte

## Deux chaînes opératoires toujours représentées

L'ensemble des dépôts étudiés correspond bien systématiquement aux deux mêmes chaînes opératoires : la production de lames à la pression pour l'obsidienne et la production bifaciale pour le silex. Mais l'étude de chacun d'eux fait apparaître des manques et des surreprésentations qui indiquent que ces éclats ont sans doute été prélevés de façon arbitraire sur des ateliers (tableaux 1 et 2). Dans le cas de l'obsidienne, les nucléus étaient sans doute importés à Cancuen sous la forme de nucléus déjà préparés, prêts pour le plein débitage : la relative rareté des lames de première et de deuxième série (plus irrégulière) par rapport au nombre de nucléus et l'absence d'éclats de mise en forme (tableau 1) tient donc probablement au mode d'importation de la matière première elle-même. En revanche, on constate une surreprésentation des éclats de

maintien de la surface de débitage par rapport au nombre de nucléus dans tous les dépôts contenant de l'obsidienne, qui indique bien qu'il ne s'agit pas d'un atelier entier.

Le cas des éclats de silex est sans doute plus révélateur de la surreprésentation ou de la sous-représentation de certaines étapes de cette chaîne opératoire de production bifaciale<sup>1</sup>. Si l'on compare leur composition avec les données expérimentales concernant la production d'objets similaires (Chauchat et Pélegrin, 2004), on s'aperçoit que, des trois dépôts analysés contenant des éclats, l'un ne comporte que des éclats de façonnage de grandes dimensions, correspondant au début d'une chaîne opératoire bifaciale (tableau 2). L'enterrement 77, qui est celui du dernier roi du site, comporte essentiellement des éclats de façonnage de dimensions moyennes (entre 2 et 4 cm), mais aucun déchet correspondant au début de la chaîne opératoire ou aux retouches. De façon intéressante, l'enterrement 96, qui lui est associé et qui est probablement celui de l'épouse du même roi (Barrientos et al., 2005) est, lui, exclusivement composé de ces éclats de retouches qui étaient strictement absents de la tombe du roi lui-même. Cette différence a peut-être un sens symbolique, difficile à cerner en l'occurrence, mais il semble cependant peu probable que les Mayas aient séparé les éclats par étapes de la chaîne opératoire en vue de les déposer dans deux tombes différentes. Une distinction si nette entre les types d'éclats découverts dans chacun des deux enterrements s'explique sans doute par le fait qu'ils ont été prélevés sur deux ateliers distincts. Elle signifierait donc qu'il y avait à Cancuen une division spatiale du travail entre l'étape de fabrication des pointes bifaciales et celle de leur retouche.

### Des éclats de production... ou de destruction ?

Cependant, outre le fait que ces dépôts sont tous associés aux deux mêmes chaînes opératoires,

<sup>1</sup> La sélection dont ont fait l'objet ces éclats complique un peu la compréhension détaillée de la chaîne opératoire à laquelle ils appartiennent. Toutefois, la présence de deux préformes de feuilles lancéolées dans le dépôt de la tombe 77, ainsi que le fait que la plupart des objets de ce type dans le site ont été produits sur les mêmes silex que ces éclats, nous permettent de considérer qu'ils sont issus de la production de feuilles lancéolées de dimensions moyennes (entre 10 et 12 cm de long).

res, il apparaît que ceux contenant de l'obsidienne sont également en partie composés d'éclats de destruction (tableau 1), c'est-à-dire d'éclats qui n'ont pas de sens technique, hormis celui de détruire les pièces concernées (en l'occurrence, des nucléus). Les modalités de destruction sont assez similaires d'un dépôt à l'autre : il s'agit d'éclats détachés depuis la surface de débitage, brisant d'abord le nucléus en deux, puis d'un débitage de plusieurs éclats dans la tranche du nucléus. De façon intéressante, dans le cas de la tombe 77, la destruction des nucléus s'est peut-être tenue sur place, car un grand nombre d'éclats découverts aux pieds du roi (n = 98) ont pu être remontés entre eux et en composer 53. Cette pratique révèle donc le caractère hautement rituel de ces dépôts qui ne renvoient pas seulement à la production de certains objets, mais aussi à leur destruction.

### Une narration pour accompagner ces chaînes opératoires ?

Les éclats incisés ne sont pas une tradition de Cancuen, mais de Tikal, et, dans une moindre mesure, de Uaxactun. La plupart ne sont pas datés, mais on sait par ailleurs que cette tradition remonte très majoritairement au classique Récent (Maxwell, 1996 ; Moholy-Nagy, 2008) ; ils sont donc pour la plupart contemporains de la collection de Cancuen.

Nous avons étudié 30 éclats, dont neuf ont pu être attribués avec certitude à Uaxactun et six à Tikal. La provenance exacte des 15 autres a été malheureusement perdue, mais les comparaisons bibliographiques (Moholy-Nagy, 2008) permettent de considérer qu'ils proviennent tous très probablement de Tikal. Nous avons distingué neuf représentations, parmi lesquelles on reconnaît un personnage associé à la lune, plusieurs personnages humains assis, le symbole « pop » du pouvoir, des « K'awil », entités associées au silex et à l'obsidienne en général (Schele et Freidel, 1990 ; Baudez, 2002), dans différentes postures, et des « dieux bouffons », personnages associés, eux aussi au pouvoir royal (Ibid.). La standardisation des représentations est remarquable, jusque dans les détails et se maintient d'un site à l'autre (fig. 2).

Bien que, malheureusement, ces pièces viennent toutes de fouilles anciennes et n'aient pas de contexte, un travail de comparaison bibliographique systématique avec les rapports du Projet





**Figure 2** : Eclats incisés de Tikal et Uaxactun (MUNAE et British Museum)

Tikal (Coe, 1990 ; Moholy-Nagy, 2008) a permis de constater que dans chaque offrande, ces neuf représentations sont très fréquemment déposées ensemble (Moholy-Nagy, 2008). Sur 42 dépôts contenant des éclats incisés (Ibid.), 19 présentent l'association de la totalité des représentations recensées. Toutefois, l'hypothèse d'une ritualisation du débitage, dont chaque étape aurait été associée à une image à la manière d'une narration, qui était mon hypothèse de départ, n'a pas pu être confirmée : le même dessin figure parfois indifféremment sur des éclats d'entretiens de la surface de débitage ou sur des macro-lames ou sur des éclats de destruction de nucléus. Les supports sont très différents des éclats déposés à Cancuen, beaucoup plus larges et épais. Deux éclats de correction d'erreur du débitage mis à part, la majorité correspond, soit à des lames épaisses d'ouverture à des macro-nucléus ( $n = 16$ ), ce qui est cohérent avec le fait qu'à Tikal, les nucléus étaient probablement importés sous

cette forme (Moholy-Nagy, 2003 ; 2008), soit à des éclats de destruction de nucléus prismatiques ( $n = 12$ ). En revanche, comme à Cancuen, ces éclats sont toujours associés à la chaîne opératoire de production laminaire, en l'occurrence, le début : l'ouverture des macro-nucléus, et la fin : la destruction des nucléus prismatiques une fois épuisés. La répétition des mêmes représentations figurées assez complexes et toujours associées entre elles pourrait donc suggérer qu'il existait un mythe ou une légende associée à cette production en particulier.

Si l'incision de certains éclats ne trouve pas d'équivalent à Cancuen ou dans aucun des 20 autres sites où cette pratique a été recensée (Andrieu, 2009), le dépôt des éclats correspondant à cette chaîne opératoire dénote certainement un rite similaire. On constate cependant qu'un accent différent est mis sur différentes étapes au sein de cette chaîne opératoire d'un site à l'autre ou d'un dépôt à l'autre.

### Le contexte et l'utilisation des mêmes déchets de taille dans le reste du site

Tant leur contexte de découverte, que l'existence de représentations figurées associées indiquent que ces déchets de taille faisaient probablement l'objet d'un investissement social et rituel particulier. Cependant ils n'ont pas été découverts exclusivement en contextes royaux.

À Cancuen, quelques nucléus prismatiques ( $n = 22$ )<sup>2</sup>, des éclats d'entretien de la surface de débitage, ou même des éclats de destruction de nucléus ont également été découverts de façon ponctuelle dans des contextes domestiques cette fois, comme des dépotoirs ou des poubelles. De façon intéressante, quand ils sont découverts en dehors des contextes rituels, ces déchets ont tous fait l'objet d'une réutilisation : les nucléus présentent des arêtes très émoussées, et des retouches en partie proximale et distale qui indiquent qu'ils étaient utilisés comme outils<sup>3</sup> ; et les éclats

<sup>2</sup> Les nucléus découverts en dehors des contextes de dépôts à Cancuen présentent les mêmes méthodes de débitage que ceux disposés dans des tombes ou sous des stèles. On ne peut donc pas différencier d'éventuels ateliers ou artisans sur ce critère.

<sup>3</sup> Une étude fonctionnelle a montré que les nucléus coniques en obsidienne, après exhaustion, étaient fréquemment utilisés comme grattoirs par exemple (Aoyama, 2009).

quant à eux, présentent de nettes traces d'emmanchement en partie proximale, visibles généralement à l'œil nu.

Pour ce qui est de la chaîne opératoire de pointes ou de feuilles lancéolées, deux amas de production bifaciale ont été fouillés en dépotoirs, livrant respectivement 219 et 875 éclats de façonnage. Toutefois, leur analyse montre qu'ils proviennent également d'une sélection d'éclats. En effet, tous sont du même format (entre 2 et 4 cm), et ils ont été pour beaucoup brisés à la flexion afin de produire de petits poinçons (n = 103 et n = 699). Il ne s'agit donc pas de *loci* de production bifaciale, mais d'une autre forme de récupération de ces mêmes déchets de taille, contemporaine des dépôts rituels d'éclats, mais à des fins utilitaires cette fois.

Les dépôts ne sont donc pas les seuls contextes de découverte des déchets de taille correspondant à ces deux productions, mais ils totalisent en revanche les plus fortes concentrations dans le site. Cela est particulièrement visible dans le cas de l'obsidienne, où la majorité (80 %) des nucléus du site ont été découverts en contexte royal<sup>4</sup>. Ces dépôts ont donc bien un sens économique, puisqu'ils représentent une centralisation de ces productions, ou du moins de leurs déchets, dans des contextes associés au pouvoir. En revanche, si cette pratique révèle la possibilité d'une production sous contrôle (Costin, 1991), c'est-à-dire une situation où les artisans n'étaient pas maîtres de leur production, ce contrôle n'était sans doute pas exclusif, puisque d'autres éclats issus des mêmes productions étaient également réutilisés à des fins utilitaires à la même époque.

### Une production rituelle ?

Enfin les objets finis correspondant à ces productions, à savoir les pointes et les feuilles lancéolées et les lames prismatiques en obsidienne, ne sont pas, tant s'en faut, déposés en contexte rituel. Au contraire, ils sont très régulièrement distribués dans le site, puisqu'on en compte entre 15 et 79 par structure, la plupart en dépotoirs (52 %) dans tous les types de structures, quelle que soit leur qualité architecturale ou leurs dimensions. Ce sont donc bien les déchets de

taille correspondants qui font l'objet d'une certaine valorisation sociale et rituelle, davantage que les objets finis.

Tout cela semble indiquer que c'est la production même de ces objets qui faisait l'objet d'un certain investissement social ou religieux, ce qui n'est pas sans rappeler les rituels accompagnant la production des lames chez les Aztèques que les conquistadores ont décrit quelques siècles plus tard.

*"They put the knives on a clean blanket and perfumed them with their incense, and when the sun had set, all the priests assembled and sang of their devil's hymn to the knives, playing upon their drums"* (Motolinia, in Clark, 1989 : 314).

Dans ce contexte, les déchets de taille feraient figure de déchets cérémoniels (Walker, 1995) d'une production qui ferait elle-même partie d'un rituel.

### Conclusions

Ces dépôts révèlent probablement la revendication d'un certain contrôle économique exercé par le pouvoir sur ces productions, ce qu'indique également leur position dans la tombe 77 où ils étaient disposés sous les pieds et la tête du roi (Barrientos et al., 2005). Pourtant ils représentent une centralisation relative : à Cancuen seule une part des déchets issus de la production des lames et des pointes lancéolées a été prélevée, puisque d'autres ont été découverts en contexte domestique.

On observe des variantes qui témoignent, bien que de façon indirecte, de différences dans les organisations de la production : les différentes étapes représentées d'un dépôt à l'autre indiquent une division spatiale du travail à Cancuen, mais aussi des variations dans les modes d'importation de la matière première : car, si à Cancuen les nucléus en obsidienne étaient importés prêts au débitage à la pression, à Tikal ils l'étaient sous la forme de macro-nucléus.

D'autre part, les quantités déposées varient énormément d'un site à l'autre. Ainsi, les dépôts étudiés à Cancuen sont de taille limitée et ne représentent qu'une part des déchets de taille issus de ces deux chaînes opératoires, alors que d'autres, découverts ailleurs dans les Basses Terres, comportent plusieurs tonnes de matériel (Andrieu, 2009), et pourraient donc être l'indice d'une centralisation bien plus importante de ces mêmes productions. Enfin, l'absence stricte de

<sup>4</sup> À partir de l'échantillon de 10 512 pièces étudiées, qui correspondent à peu près à la moitié de la totalité du matériel lithique récolté à Cancuen en 11 années de fouilles.

cette pratique dans le Nord des Basses Terres est également signifiante en ce qu'elle pourrait trahir des différences entre les deux régions en termes d'implication du pouvoir dans l'économie.

Cette pratique et le fait que certains éclats soient gravés et associés à des images très standardisées dénote la valorisation de deux chaînes opératoire de production, et leur possible ritualisation. Mais cette pratique ne concerne pas tous les sites, et elle disparaît à partir du Classique Terminal pour laisser la place à ce qui a été interprété par beaucoup comme une rationalisation économique des productions des lames d'obsidienne en particulier, qui deviennent alors des objets communs, et sont davantage distribués en dehors des centres urbains à partir de cette époque (Rice, 1987 ; Braswell et Glascock, 2003 ; Andrieu, 2009). La coïncidence entre les deux phénomènes suggère donc une certaine désacralisation de ces productions, qui cessent d'être liées au pouvoir royal ; mais elle peut aussi indiquer un changement majeur dans les organisations économiques à la fin de l'époque classique.

**Tableau 1 : Composition des dépôts d'éclats en obsidienne de Cancuen**

	Dépôt sous la stèle 1	Dépôt sous la stèle 18	Tombe 77 (dernier roi du site)
Nucléus coniques		3	53
Lames prismatiques brisées en cours de fabrication	16	67	66
Lames de première et de seconde série	58	101	213
Cassons	8	22	127
Eclats d'entretien du nucléus et de la surface de débitage	25	5	199
Macro-lames	4	3	
Lames détachées à la percussion dure		10	
Eclats détachés à la percussion dure		5	

	Dépôt sous la stèle 1	Dépôt sous la stèle 18	Tombe 77 (dernier roi du site)
Eclats de destruction des nucléus		45	92
Total	111	261	750

**Tableau 2 : Composition des dépôts d'éclats en silex de Cancuen**

	Dépôt sous la stèle 18	Tombe 77 (dernier roi du site)	Tombe 96 « épouse du roi » ?
Gros éclats détachés à la percussion dure, négatifs convergents	5		
Gros éclats de façonnage (plus de 5 cm)	15	53	
Eclats moyens de façonnage (entre 5 et 2 cm)		991	
Eclats de retouche (percussion tendre)			642
Total	20	1 044	642

## Remerciements

Je tiens à remercier la Fondation Fyssen pour m'avoir permis de mener à bien cette étude, ainsi qu'Arthur Demarest et le Projet Cancuen de l'université Vanderbilt. Merci aussi à Leonora Baird-Smith et au British Museum à Londres, ainsi qu'à Juan Carlos Melendez au MUNAE, Guatemala, pour m'avoir autorisé l'accès à leurs collections.

## Bibliographie

- Aoyama Kazuo (2009) *Elite Craft Producers, Artists and Warriors at Aguateca: Lithic Analysis*, Monograph of the Aguateca Archaeological Project First Phase, vol. 2, University of Utah Press, Salt Lake City.
- Andrieu Chloé (2009a) *Outils mayas, Distribution et production du silex et de l'obsidienne dans les Basses Terres mayas*. Thèse de Doctorat de troisième cycle, Université Paris Ouest Nanterre-La défense.

- Barrientos Thomas, Moisés Arriaza, Adriana Linares, Blanca Mijangos, Silvia Alvarado et Claudia Quintanilla (2005) « Excavación en la Estructura L7-27 de Cancuen », *Proyecto Cancuen, Informe Preliminar n° 7, Séptima Temporada*, Arthur Demarest, Thomas Barrientos et Luís Alfonso Luin (ed.), Instituto de Antropología et Historia, Guatemala, ms.
  - Braswell Geoffrey E. et Michael D. Glascock (2003) « The Emergence of Market Economies in the Ancient Maya Worlds: Obsidian Exchange for Terminal Classic Yucatan, Mexico », in *Geochemical Evidence for Long Distance Exchange*, pp. 33-52, Michael D. Glascock (ed.), Bergin and Garvey. Westport.
  - Chauchat Claude et Jacques Pélegrin (2004) *Projectile Point Technology and Economy, A Case Study from Paijan, North Coastal Peru*, Centre for the Study of First Americans, Texas A&M University Press, College Station TX.
  - Chase Diane Z. et Arlen F. Chase (2004) « Archaeological Perspective on Classic Maya Social Organization from Caracol, Belize », *Ancient Mesoamerica*, n° 15, pp. 139-147.
  - Clark John E. (1989) « Obsidian the Primary Mesoamerican Resource », in *La Obsidiana en Mesoamérica*, pp. 299-318, Margarita Gaxiola, John E. Clark (ed.), I.N.A.H., Mexico.
  - Coe Michael D. (1988) « Ideology of the Maya Tomb », in *Maya Iconography*, pp. 222-235, Elizabeth P. Benson, Gillett G. Griffin (ed.), Princeton University Press, Princeton.
  - Coe William R. (1990) *Excavation of The Great Plaza, North Terrace and North Acropolis of Tikal*. Tikal Report n° 14, Philadelphia University Museum, University Of Pennsylvania.
  - Costin Cathy Lynne (1991) « Craft Specialization: Issues in Defining, Documenting, and Explaining the Organization of Production », in *Archaeological Method And Theory*, pp. 1-56, M. B. Schiffer (ed.), University of Arizona Press, Tucson.
  - Inizan Marie-Louise, M. Reduron, Hélène Roche, Jacques Tixier (1995) *Technologie de la pierre taillée*, CREP, Meudon.
  - Maxwell, David B. (1996) *An Analysis of Caches from Four Sites in the Maya Lowlands*, Unpublished Phd dissertation, University of Arizona, Tuscon.
  - Michelet Dominique et Marie-Charlotte Arnauld (2004) « Nature et dynamique des cités Mayas », *Annales HSS*, janvier-février 2004, n° 1, EHESS, pp. 73-108.
  - Moholy-Nagy Hattula (1997) « Middens, Construction Fill, and Offerings: Evidence for the Organization of Classic Period Craft Production at Tikal, Guatemala », *Journal of Field Archaeology*, vol. 24, n° 3, pp. 293-313.
  - (2003) *The Artifacts or Tikal: Utilitarian Artifacts And Unworked Material*, Tikal Report n° 27, Part B, University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology, Philadelphia.
  - (2008) *The Artifacts of Tikal-Ornamental and Ceremonial Artifacts and Unworked Material*. Tikal Report n° 27, Part A. University Museum Monograph, University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology, Philadelphia.
  - Potter Daniel et King Eleanor (1995) « A Heterarchical Approach to Lowland Maya Socioeconomics », in *Heterarchy and the Analysis of Complex Societies*, pp. 17-32, Robert M. Ehrenreich, Carole L. Crumley et Janet E. Levy (ed.), Archaeological Paper of the American Anthropological Association n° 6, Arlington.
  - Rice Prudence M. (1987) « Economic Change in the Lowland Maya Late Classic Period », in *Specialization, Exchange And Complex Societies*, pp. 76-85, Elizabeth M. Brumfield, Timothy K. Earle (ed.), Cambridge University Press, Cambridge.
  - Schele Linda et David Freidel (1990) *A forest of Kings. The Untold Story of the Ancient Maya*, William Morrow & Co, New York.
  - Stanton Travis W., M. Kathryn Brown et Jonathan B. Pagliaro (2008) « Garbage of the Gods? Squatters, Refuse Disposal, and Termination Rituals among the Ancient Maya », *Latin American Antiquity*, n° 19 (3), pp. 227-247.
  - Walker William H. (1995) « Ceremonial Trash? », in *Expanding Archaeology*, pp. 67-79, James Skibo, William H. Walker et Axel E. Nielsen (eds.), University of Utah Press, Salt Lake City.
- Despite the fact that the political organization of Maya societies during the Classic period (250-950 ap. J.-C.) is relatively well known thanks to epigraphic and iconographic analysis, the economic organization of these small independent kin-

gdoms is still very poorly understood. This is partly due to the lack of available data for understanding the organization of production and exchanges in the lowlands, and especially the fact that no workshop (either ceramic or lithic) has been found within the urban centre. The rare known production centres that have been studied up to now, are all found in the periphery of a city or in small secondary sites (Rice, 1987; Potter and King, 1995), which considerably complicates our understanding of the economic role of the cities and the role of the elite in the economy.

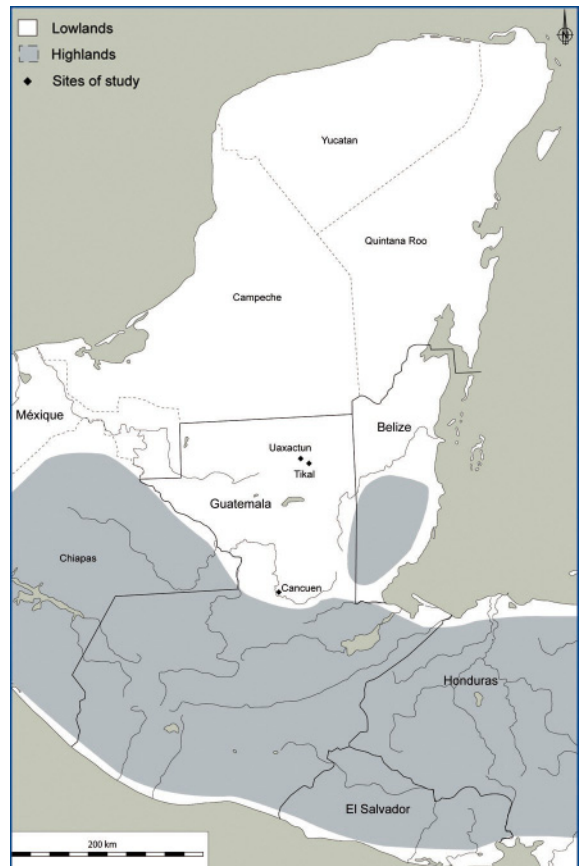
However sometimes there are heavy concentrations of flint and obsidian production waste within a city: flakes deposited above royal burials or under steles (Moholy-Nagy, 1997). Unlike the workshops, these deposits are not outside the cities but within, and directly associated with power structures (Andrieu, 2009). To start with, these deposits were interpreted in a symbolic way, for instance as representations of the different layers of the underworld (Coe, 1988). However, a bibliographical synthesis of all the available data indicates that the material found in these contexts always corresponds to the waste from the same two *chaînes opératoires*: pressure-made prismatic blades for the obsidian, and bifacial production in the case of the flint (Andrieu 2009). This peculiar practice, that consists of burying flakes rather than finished objects in ritual contexts, could therefore, be a sign that the elite had a form of control over these two productions (Ibid).

Conversely, the inventory of this practice shows that these flake deposits are only found in the southern part of the Lowlands, where the indications of a centralized power are the strongest (Andrieu, 2009). These deposits could, therefore, reveal differences in the economic and politic organizations in the Maya lowlands, which have been suspected for some time (Michelet and Arnaud, 2004; Chase and Chase, 2004). These prestigious contexts also raise the question of how these flakes were perceived, as the Maya appear to have attached a special importance to unfinished objects (Stanton et al., 2008).

### Methodology

Lithic technology (Inizan et al., 1995) can distinguish primary from secondary purpose in the *debitage*, and therefore distinguish what was conceived as trash by the knappers from what was not. This methodology is thus very well

adapted to helping us understand the selection criteria of the cached flakes, in comparison with the rest of the material on a given site, in order to understand the economic and ritual impact of this practice. I therefore carried out a technological study of four Late Classic (A.D. 650-800) flake deposits in Cancuen (Guatemala) (fig. 1), as well as of an important sample from the lithic collection on the rest of the site (10,512 pieces). The technological and iconographic study of 30 flakes from Tikal and Uaxactun that were found in offerings under steles but have the distinctive characteristic of having been carved on their ventral face, which enabled me to consider the mental representation associated to this practice of burying lithic waste.



**Figure 1 :** Map of the Maya area and location of the sites mentioned in the text.

### The two same *chaînes opératoires* always represented

The totality of the deposits studied corresponds to the same two *chaînes opératoires*: the

production of prismatic blade by pressure for the obsidian material, and bifacial production in the case of the flint flakes. However, a study of each of them showed deficiencies and over-representations that indicate that these flakes were probably taken arbitrarily from workshop mounds (table 1 and 2). In the case of obsidian, the cores were probably imported to Cancuen as already prepared cores, ready for the *plein débitage*. The scarcity of primary and secondary (i.e. irregular) blades compared to the quantity of cores, as well as the lack of flakes of preparation of the cores (table 1) is probably due to the mode of importation of the raw material. However, there is a clear over-representation of rejuvenation flakes in regard to the quantity of core in each deposit that contained obsidian, which clearly indicates that these collections do not represent the totality of a workshop's debris.

The case of the flint flakes is probably more representative of the over- or under-representation of certain stages of the bifacial production process<sup>5</sup>. When comparing their composition with experimental data from the production of similar objects (Chauchat and Pélegrin, 2004), it appears from the three deposits studied that contained flakes, that only one had large bifacial thinning flakes corresponding to the first stage of the bifacial production process (table 2). Burial 77, which is the burial of the last king on the site, was mostly composed of medium bifacial thinning flakes (between 2 and 4 cm), but lacked flakes corresponding to the very beginning of the production process or to its very end (retouching flakes). Interestingly, burial 96 which is associated with it and is probably the burial of the same king's wife's (Barrientos et al., 2005) is exclusively composed of the retouched flakes that were strictly lacking in the king's burial. This difference could have a symbolic meaning, which is hard to estimate, but it is hardly likely that the Mayas separated the flakes by stages of the production process in order to deposit them on

separate burials. Such a clear difference in the type of flakes found in both burials could only be explained by the fact that they came from two different workshops. This would imply that there was a spatial division of work between that stage of production and the retouching of the bifacial points in Cancuen.

### Production... or destruction flakes?

However, despite the fact that these deposits always contained flakes from the same production process, the obsidian deposits are also partly composed of destruction flakes (table 1), that is to say flakes that do not have any technical meaning, except that of destroying the cores. The destruction modalities are similar from one deposit to another: flakes are detached from the surface of *débitage*, breaking the core into two pieces, then of the *débitage* of numerous flakes in the section of the core. Interestingly, in the case of burial 77, this core destruction phase might have occurred during the burial itself, since a considerable number of these flakes was found at the feet of the king (n = 98) and could be fixed together. This reveals the highly ritual aspect of this practice that not only correlates to the production of these objects, but also to their destruction.

### A narration to accompany the production process?

Incised flakes are not a tradition from Cancuen, but from Tikal, and, to a lesser extent from Uaxactun. Most are not dated, but we know that this tradition is mostly attested for the Late Classic (Maxwell, 1996; Moholy-Nagy, 2008); they are therefore contemporary to the Cancuen collection.

I studied 30 flakes, from which nine could be attributed with certainty to Uaxactun and six to Tikal. The exact origin of the 15 others has been lost, but bibliographical comparisons (Moholy-Nagy, 2008) allow us to believe that they very probably all came from Tikal. Nine representations could be distinguished, from which we can recognize a person associated to the moon, various sitting human figures, the symbol "pop" of power, a "K'awil", an entity associated with flint and obsidian in general (Schele and Freidel, 1990; Baudez, 2002), in various positions, and "jester gods", entities associated with royal power (*Ibid.*). The standardization of the

<sup>5</sup> The fact that these flakes were apparently selected from workshops complicates our precise understanding of which *chaîne opératoire* they belong to. However the presence of two laurel leaf preforms in burial 77, as well as the fact that most of the objects of this type were produced in the same flint as these flakes, leads us to believe that they correspond to the production of medium size laurel leaves (between 10 and 12 cm long).



**Figure 2 :** Incised flakes from Tikal and Uaxactun (MUNAE and British Museum)

representations, even in the details, is remarkable and is the same from one site to another (fig. 2).

Despite that, these flakes unfortunately all come from ancient excavations and lack contexts, but a bibliographical comparison with the publications of the Tikal Project (Coe, 1990; Moholy-Nagy, 2008) shows that these nine representations were frequently deposited together (Moholy-Nagy, 2008). Out of 42 deposits containing incised flakes (Ibid.), 19 presented the totality of the various representations. However, my initial hypothesis of a ritual *débitage*, where each stage would have been associated with an image in the manner of a narration, could not be confirmed. The same drawing was variously associated with rejuvenation flakes, macro-blades and destruction flakes. Unlike the deposited flakes from Cancuen, these flakes are much larger and thicker. Except for two core rejuvenation flakes, the majority corresponded either to thick macro-

blades ( $n = 16$ ), which is consistent with the fact that cores were probably imported that way in Tikal (Moholy-Nagy, 2003; 2008), or to core destruction flakes ( $n = 12$ ). However, as was the case in Cancuen, these flakes were always associated with the same blade production process, in this case, the beginning (the opening of the macro-cores), and the end (the destruction of the exhausted cores). The repetition of the same complex representations always associated together, could suggest that there was a myth or a legend relating to this production in particular.

Despite the fact that there was no equivalent practice of drawing on flakes in Cancuen or in any of the other 20 sites where this practice was listed (Andrieu, 2009), the caching of flakes pertaining to the same production process probably corresponds to a similar rite. However we observed that a different emphasis was placed on different stages of this production process from one site to another and from one deposit to another.

#### The context and use of the same production waste in the rest of the site

Both the context of discovery and the fact that some flakes were drawn on and incised with mythical representations, indicate that this production waste was probably the subject of a particular ritual and social meaning. However, they were not exclusively found in royal contexts.

In Cancuen, a few prismatic cores ( $n = 22$ )<sup>6</sup>, rejuvenation flakes, or even core destruction flakes were found here and there in domestic contexts, such as trash pits or middens. Interestingly, when found in non-ritual contexts, this waste was always reused for another activity: cores present very blunted edges, and many have proximal and distal retouches indicating that they were used as tools<sup>7</sup>; the flakes show clear proximal hafting marks, mostly visible to the naked eye.

In the case of the projectile point or knife production process, two mounds of bifacial pro-

<sup>6</sup> The cores found in non-ritual contexts at Cancuen present the same methods of *débitage* as the ones found in the burials or under steles. We therefore cannot distinguish any possible craftsmen or workshop tradition on that basis.

<sup>7</sup> A functional study showed that the obsidian prismatic cores were frequently reused after exhaustion, for instance as scrapers (Aoyama, 2009).

duction flakes were found in trash pits that contained respectively 219 and 875 bifacial thinning flakes. However, a study of them revealed that they also came from a selection of different flakes. They are all the same size (between 2 and 4 cm), and most of them were broken by flexion so to produce small drills (n = 103 and n = 699). These mounds are therefore not production *loci*, but indicate another form of reuse of the same flakes, contemporaneous to the ritual flake deposit, but for utilitarian reasons.

The deposits are not the only discovery context corresponding to these two productions but they represent their highest concentrations in the site. This is particularly noteworthy in the case of the obsidian, where the majority (80 %) of the cores were found in royal contexts<sup>8</sup>. These deposits do have an economic meaning since they indicate a centralization of these productions, or at least of their waste, in power contexts. However, while this practice may indicate that the productions were controlled by the king (Costin, 1991) (that is to say that the craftsmen were not the owners of their production), this control was probably not exclusive, since other flakes from the same production process were also reused for common utilitarian reasons in the same period.

### A ritual production?

Finally the finished objects corresponding to these productions, that is to say the projectile points, the knives and the obsidian prismatic blades, were certainly not found specifically in special deposits. On the contrary, they were very regularly distributed in the site, mostly in the trash pits (52 %) of all kinds of structures, whatever the quality of their constructions or their dimension, since we counted between 15 and 79 per structure. The purpose of the social and ritual focus was thus the waste, and not the finished objects.

Taken together, this seems to indicate that the production of these tools was valued for itself, reminding us of the rituals that accompanied the making of obsidian prismatic blade by the Aztecs, described by the Spaniard *conquistadores* a few centuries later:

*“They put the knives on a clean blanket and perfumed them with their incense, and when the sun had set, all the priests assembled and sang of their devil’s hymn to the knives, playing upon their drums.”* (Motolinia, in Clark, 1989: 314).

Production waste would therefore have been the “ceremonial trash” (Walker, 1995) of a production, that was itself part of a ritual.

### Conclusions

These deposits probably show that a member of the elite probably exerted a certain economic control over these productions, as shown by the place where these flakes were deposited in Burial 77, namely under the feet and under the head of the king (Barrientos *et al.*, 2005). However they represent a relative centralization, since in Cancuen only a part of the blade and knife production waste was taken, and the rest of the flakes were found in domestic trash pits.

We observed variations in this practice that indirectly indicate differences in production organization. The differences in the stages seen from one deposit to another reveal a spatial division of labour, but also imply that there were variations in the modes of importation of the raw material to each site. In Cancuen obsidian cores were imported as ready for pressure *débitage*, whereas in Tikal they were exchanged as macro-cores.

The quantities deposited also varied a great deal from one site to another. The Cancuen deposits are limited in size and only represented a small part of the production waste form those two *chaînes opératoires*, whereas other deposits found in the rest of the lowlands sometimes comprise tonnes of material (Andrieu, 2009), and could therefore be a hint of a greater centralization of these productions. Finally, the fact that this practice is strictly absent north of the Lowlands could also indicate differences in the economic and political integration in the two regions. This, in addition to the fact that certain flakes are incised and decorated with very standardized representations, shows how these two production process were valued and their possible ritualization. However this practice does not concern all the sites and disappears from the Terminal Classic period to give way to what many people consider as an economic rationalization of the obsidian prismatic blade. They become common tools that were broadly distributed outside urban centres from that period onwards (Rice, 1987; Braswell and Glascock, 2003; Andrieu,

<sup>8</sup> From the sample of 10,512 pieces studied, which corresponds to a third of the entire Cancuen lithic collection.



2009). The coincidence between these two phenomena suggests that these productions might have been desacralized at this time and ceased to be related to royal power; but it could also indicate a major change in the economic organization during the Classic period.

**Table 1: Composition of the obsidian flake deposits in Cancuen**

	Deposit under Stele 1	Deposit under Stele 18	Burial 77 (last king of the site)
Prismatic cores		3	53
Broken prismatic blades (during their fabrication)	16	67	66
First and second series blades	58	101	213
Unclassifiable fragments	8	22	127
Core rejuvenation flakes	25	5	199
Macro-blades	4	3	
Hard percussion blades		10	
Hard percussion flakes		5	
Core destruction flakes		45	92
Total	111	261	750

**Table 2: Composition of the flint flake deposits in Cancuen**

	Deposit under stele 18	Burial 77 (last king of the site)	Burial 96 "King's wife?"
Large hard percussion flakes with convergent negatives	5		
Large bifacial thinning flakes (More than 5 cm)	15	53	
Medium bifacial thinning flakes (between 5 and 2 cm)		991	
Retouch flakes (tender percussion)			642
Total	20	1 044	642

**Acknowledgements**

I would like to thank the Fyssen Foundation for enabling me to carry out this study as well as Dr. Arthur Demarest and the Vanderbilt University Cancuen Project in Guatemala. My thanks also to Leonora Baird-Smith and the British Museum in London as well as to Juan Carlos Melendez, the director of the MUNAE in Guatemala for letting me study their collections.

# L'analogue et l'identique

## Une analyse de l'amitié en Inde, dans le contexte de la lèpre

Fabienne MARTIN

### Résumé

Très peu d'études se sont intéressées à l'amitié en Inde<sup>1</sup>. Elle est pourtant une catégorie importante de la sociabilité, aux côtés de la parenté et de l'appartenance au groupe dans lequel on naît. Dans des contextes de rupture de liens, marqués par les séparations et les abandons, elle apparaît au cœur du processus de reconstruction sociale de l'existence. C'est ce que nous proposons de montrer ici, en considérant la manière dont l'amitié a permis à des individus exclus en raison de la lèpre, des individus hétérogènes de par leur statut de naissance, de s'unir les uns aux autres, de se reconstruire des liens et notamment une parenté, de recréer un groupe. En confrontant cet usage et cette pensée de l'amitié comme force de cohésion sociale, avec les perceptions et les expressions de l'amitié concernant les descendants de lépreux, il est alors possible de dégager deux schèmes de l'amitié, selon qu'elle prend place entre des individus dont l'existence est, ou non, structurée par des liens de parenté et par l'appartenance à un groupe.

### Mots clefs

Communautés de lépreux, Inde, amitié, parenté, reconstructions de liens

## The Analogous and the Identical

### An Analysis of Friendship in India, in the Context of Leprosy

### Abstract

Friendship in India is the subject of very few studies<sup>2</sup> although it is an important category of sociability, besides kinship and belonging to the group where one was born. In a context of bonds breaking-up, marked by separations and desertions, it is at the heart of the process of the social reconstruction of one's life. And it is what we propose to show here, looking at the way friendship allowed individuals, excluded because of leprosy and heterogeneous by their birth status, to unite, reconstruct bonds – including kinship – and recreate a group. Through comparing how friendship is used and thought of as a force of social cohesion, with its perceptions and expressions among lepers' descendants, it is then possible to bring out two friendship schemes, according to whether the life of the individuals it links, is structured or not by kinship bonds and by belonging to a group.

### Keywords

Leprosy communities, India, Friendship, Kinship, Bonds making

<sup>1</sup> C. Jest (1999), dans une contribution intitulée « de l'affection à l'amitié jurée : expériences asiatiques », consacre trois pages à l'aire indo-népalaise. Un article de J. J. Berman, V. Murphy-Berman et A. Pachauri (1988) présente une analyse comparée entre l'Inde et les États-Unis du rôle des différences de genre dans les relations d'amitié. Enfin, un article de C. Osella et F. Osella (1998) sur les micro interactions quotidiennes entre jeunes hommes au Kerala et sur les idylles avant le mariage s'intéresse aux jeux de plaisanterie (*joking*). Les analyses et réflexions présentées ici se fondent donc pour l'essentiel sur mes enquêtes de terrain conduites depuis une dizaine d'années au sein de la communauté de lépreux de Jodhpur.

<sup>2</sup> C. Jest (1999), in a contribution entitled « de l'affection à l'amitié jurée : expériences asiatiques », devotes three pages to the Indo-Nepalese area. An article by J. J. Berman, V. Murphy-Berman and A. Pachauri (1988) presents a comparative analysis of sex differences in friendship patterns in India and in the United States. Finally, an article by C. Osella and F. Osella (1998) on the micro-politics of friendship and flirting in Kerala, South India, concerns sexual joking. Therefore the analyses and thoughts presented here are mainly based on the field studies I carried out over the last ten years within this community.

### *Les communautés de lépreux en Inde*

Le *Gandhi Kushth Ashram*<sup>3</sup>, « la communauté de lépreux de Gandhi », est établi dans un quartier populaire de la ville de Jodhpur au Rajasthan (nord de l'Inde). Il compte près de deux cents résidents : les membres fondateurs, tous lépreux, qui ont été soignés mais qui conservent des marques corporelles de la lèpre, et leurs descendants nés pour la plupart au sein de la communauté, non atteints par la maladie mais considérés comme lépreux d'un point de vue sociologique – on arrive actuellement à la troisième génération de descendants.

La première particularité de ce regroupement est la réunion dans un espace circonscrit, délimité physiquement par un mur d'enceinte, de personnes de castes diverses, depuis les Intouchables jusqu'aux Brahmanes, qui constituent les deux pôles du continuum des castes. Les résidents sont de différentes confessions religieuses (ils sont majoritairement hindous, mais il y a aussi des chrétiens et des musulmans) et originaires de diverses régions, principalement du sud de l'Inde (Andhra Pradesh, Karnataka et Tamil Nadu). En d'autres termes, les statuts de naissance se trouvent ici transcendés par l'expérience d'un événement d'ordre biologique – la lèpre – commun aux membres fondateurs du groupe et que leurs descendants continuent de subir.

À la différence des léproseries telles qu'on les connaît ailleurs dans le monde, en Afrique, en Europe de l'Est ou sur le continent américain, il s'agit là d'un regroupement volontaire, opéré à l'initiative des personnes elles-mêmes, à la suite de leur exclusion de leur famille et de leur village, engendrée par la lèpre. Les fondateurs de la communauté sont d'anciens patients qui se sont rencontrés lors de leur séjour au sein d'un hôpital spécialisé dans le traitement de la lèpre et qui ont ensuite connu des années de mobilité à travers le pays avant de se fixer à Jodhpur.

Cette situation est loin d'être unique en Inde. L'ensemble du territoire compte de nombreux

regroupements de lépreux, établis dans des quartiers urbains ou à la périphérie des villes, institutionnalisés tel l'ashram de Jodhpur qui dispose d'un statut d'association reconnu par l'État ou simples colonies, et intégrés dans des réseaux de relations, de solidarités et d'échanges matrimoniaux – sur le mode d'une endogamie de la lèpre. Chaque ville de moyenne et à fortiori de grande importance compte au moins un ashram ou une colonie de lépreux.

Ces regroupements, à l'instar de l'ashram de Jodhpur, datent généralement du milieu des années 1970. Cette époque correspond à la fin des léproseries qui n'avaient plus lieu d'être dans la mesure où l'on disposait désormais de molécules permettant de stopper le caractère contagieux de la maladie, et précède la mise au point de traitements ambulatoires – la lèpre est aujourd'hui dépistée dans le cadre de campagnes spécifiques et la plupart des patients sont soignés à domicile.

Dans un précédent travail<sup>4</sup>, j'ai étudié le processus d'édification de la communauté de Jodhpur et son inscription sociale. J'ai montré comment des individus détachés de leurs appartenances initiales se sont rassemblés et recomposés en un groupe spécifique, comment ils en sont venus à former une communauté avec ses principes et ses règles de vie mais aussi ses contraintes émanant de l'extérieur, comment ils se pensent dans leurs rapports aux autres et se positionnent dans la société indienne. L'analyse de cette élaboration sociale a révélé l'importance fondamentale de l'amitié qui, pour les lépreux de l'ashram de Jodhpur comme pour ceux des autres communautés de lépreux en Inde, a été au cœur du régime d'agrégation et du processus de recombinaison collective.

Commençons par quelques remarques générales concernant l'amitié en Inde avant de poursuivre par la manière dont elle s'exprime chez les descendants de lépreux.

<sup>3</sup> Le terme *ashram* désigne à la fois un groupe de personnes (en principe des fidèles rassemblés autour d'un *guru*) et l'espace ainsi habité (un espace d'accueil, un refuge). Cependant, la dimension religieuse est ici absente, ainsi que le rappelle le terme *kushth* accolé à celui d'*ashram* : c'est avant tout la lèpre qui caractérise le regroupement.

<sup>4</sup> Thèse d'anthropologie soutenue en 2007 à l'université Paris Ouest, publiée aux éditions du CNRS et de la Maison des Sciences de l'Homme, sous le titre *Reconstruire du commun. Les créations sociales des lépreux en Inde* (Martin, 2011).

### *L'amitié pour les descendants de lépreux*

En Inde, l'amitié est tout d'abord un lien qui unit deux personnes de même sexe<sup>5</sup>. Le hindi possède d'ailleurs un terme spécifique, *sahelī*, pour indiquer l'amitié entre deux femmes. L'amitié est donc avant tout affaire de genre. Elle n'a pas sa place entre un homme et une femme, et ce dès le plus jeune âge. Une relation de proximité entre deux personnes de sexe opposé s'exprimera autrement, en principe dans le langage de la parenté (« il est comme mon frère », « elle est comme ma sœur ») ; davantage que le rapprochement, ce sera au contraire la séparation qui sera ainsi signifiée, à savoir l'impossibilité de toute union sexuelle. Car si *dostī* renvoie à l'amitié au sens d'une relation dénuée de toute sexualité, le terme peut également faire référence à l'amour, physique, charnel (*dostī* est également employé, à la limite de l'euphémisme, pour signifier de manière respectueuse ou du moins sans connotation péjorative l'homosexualité – en général masculine). Aussi, désigner une personne du sexe opposé comme son ami(e) laissera planer l'ambiguïté.

L'amitié est aussi affaire de classe d'âge. Un homme (ou une femme) ne se dira pas « ami(e) » (*dost* ou *dostī*) avec une personne en âge d'être son père (ou sa mère). Là encore, si entente ou proximité il y a, elle s'exprimera dans le langage de la parenté.

À partir de là, l'amitié recouvre une multiplicité de relations dont la nature et l'expression dépendent des personnes. À l'origine de ce lien se trouve généralement une rencontre, entre personnes, mais qui est avant tout une rencontre de points de vue, de conceptions, de valeurs, de qualités ou de tempéraments, parfois d'expériences : on se sent en accord avec l'autre, avec ce qu'il est ou ce qu'il représente, on se retrouve dans ce qu'il pense, dans ce qu'est sa vie, la façon dont il la conduit, les épreuves qui sont ou ont été les siennes. En ce sens, l'amitié procède avant tout d'un partage.

Considérons quelques cas pris au sein de la communauté de lépreux de Jodhpur, parmi les

descendants de lépreux. Baslinga, une jeune femme de l'ashram, dit avoir pour meilleure amie une jeune femme qui vit à Mandore, à quelques kilomètres de Jodhpur, dans un ancien hôpital où se sont installées des familles de lépreux. Elle ne l'a pourtant vue que quelques fois et n'entretient pas vraiment de contacts avec elle. Lorsqu'elles se voient, leur relation reste très formelle, sans réelle complicité. Mais pour Baslinga, cette jeune fille incarne une sorte de modèle : elle est instruite (*parhā-likhā*), poursuit avec une grande détermination de longues études en médecine, dans le cadre desquelles elle a rencontré un jeune homme qui, bien qu'il ne soit pas issu d'une famille de lépreux, a cependant souhaité se marier avec elle. Si Baslinga n'a jamais prétendu à un tel devenir en ce qui concerne sa propre personne, elle en ressent toutefois l'idéalité et apprécie les valeurs dont il témoigne. Aussi a-t-elle fait de cette jeune femme sa « meilleure amie ». Fréquenter des gens respectables ou leur être lié même si c'est de façon purement formelle – ce qui en définitive importe peu ni ne fait la réalité du lien – étant aussi une manière d'affirmer sa propre respectabilité.

Ramlu, lui, est ami avec un homme, également père de famille, qui vit à l'extérieur de l'ashram dans un quartier du centre de la ville. Comme lui, il est conducteur de rickshaw. C'est d'ailleurs de cette façon qu'ils se sont rencontrés : une famille nombreuse qui nécessitait deux véhicules pour son déplacement eût recours à leur service ; comme à la fin de la course elle ne disposait que d'un billet pour payer les deux conducteurs, ces derniers décidèrent d'aller boire un *cāy* et de partager la somme restante. Ce fut l'occasion d'une longue conversation, durant plusieurs heures, où chacun se raconta. Ramlu :

« Il a commencé par me demander d'où je venais et moi, comme ça, je lui ai tout raconté : où je vivais, mon père, la lèpre, tout. Je lui ai raconté toute mon histoire (*merīkahānī*), du début à la fin, d'un trait. Pendant près de deux heures, il m'a écouté. Je n'avais jamais fait ça auparavant. Puis il m'a raconté son histoire à son tour. Lui aussi a souffert de son père qui buvait. Depuis ce jour, nous sommes devenus amis. C'est lui qui s'est porté garant auprès de la banque lorsque j'ai dû faire un prêt pour acheter un autre rickshaw quand le mien a été foutu. C'est quelqu'un de bien. »

<sup>5</sup> Cette remarque, qui vaut pour les résidents de l'ashram, est également vraie pour le reste de la société indienne, à l'exception de certaines franges urbanisées et occidentalisées, comme les étudiants des universités.

Ici, la rencontre, une mise en présence totalement fortuite, fut l'occasion d'un long échange verbal et d'un dévoilement réciproque de soi. De cet échange, du caractère bienveillant d'une écoute dénuée de jugement et du sentiment de compréhension qui s'établit, de cette mise à nu révélant au passage des points communs et des similitudes dans les parcours et les expériences vécues, est née une amitié qui se réalisera ensuite par des soutiens lors de difficultés rencontrées. L'ami est celui qui a su s'intéresser et passer outre la différence – et avec la lèpre, elle était de taille. Pour Ramlu, c'est à l'évidence ce qui avant tout fait de cet homme « quelqu'un de bien », au-delà des services rendus. Pour autant, les deux hommes ne se voient que rarement, une ou deux fois l'an tout au plus ; et malgré les invitations répétées de Ramlu, l'homme n'est jamais venu à l'ashram. La relation repose ici sur un événement fort, fondateur, et des effectuations concrètes lors de situations spécifiques ; elle suit une temporalité qui lui est propre, indépendante du déroulement quotidien de l'existence ; elle s'appuie sur un partage sincère et authentique, posé une fois pour toutes ; ce sont ensuite les contingences de la vie qui réactualisent le lien et déterminent le rythme et les occasions de fréquentation.

Pour Meera et Santoshi, toutes deux résidentes de l'ashram et mères de famille, l'amitié est par contre un partage au quotidien : ensemble elles font leurs achats en ville, vont au cinéma, passent leur temps libre. La complicité, les rires, les confidences sont au rendez-vous. Elles se soutiennent et s'entraident mutuellement. Chacune dit connaître « tout » de l'autre. Cette connaissance, toutefois, ne porte pas sur leurs origines respectives ou ce qu'a pu être la vie de l'autre avant de résider à l'ashram ; c'est une connaissance au présent, qui correspond au temps propre de la relation : ce qu'elles savent l'une de l'autre n'est autre que ce qu'elles ont vécu ensemble. Et la rencontre qui sous-tend leur amitié est moins une rencontre de valeurs ou d'expériences similaires que de personnalités : « Si nous nous entendons si bien, affirment-elles, c'est parce que nous sommes pareilles ». Tout réside dans ce « pareil » que l'on ressent vis-à-vis de l'autre, et qui renvoie ici au caractère, au tempérament, à la façon de vivre et de percevoir les choses.

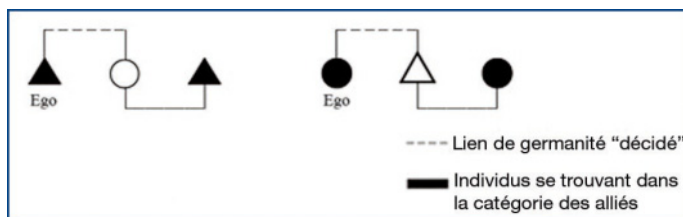
Ces relations d'amitié telles qu'elles s'expriment chez les descendants de lépreux nous ramènent à leurs parents et plus largement à ceux qui ont fondé l'ashram. Pour ces derniers, l'amitié a joué un rôle central dans la reconstitution de liens ; elle a été au cœur du processus d'agrégation qui donna naissance à la communauté. Toutefois, pour les fondateurs de l'ashram, à la différence de leurs enfants, les amitiés ont pris place dans un contexte particulier, un contexte de rupture de liens et d'exclusion. Dans cet espace laissé vacant par les pertes occasionnées par la lèpre, les amitiés ont alors pris un tour différent, en se transformant en liens de parenté.

### *L'amitié, ou comment se reconstruire une parenté*

Aujourd'hui, tous les résidents de l'ashram se situent les uns par rapport aux autres en utilisant des termes de parenté. En ce sens, il n'y a pas de non-parents au sein de la communauté. Voici ce que m'en disait un des membres fondateurs : « C'est par amitié (*dostī se*) que nous sommes devenus parents (*riṣtedār ban gayā*). Tu comprends, nous sommes tous allés à Dichpalli [nom de la localité de l'hôpital, en Andhra Pradesh, où ont été soignés les lépreux qui ont fondé l'ashram de Jodhpur]. Là-bas, nous sommes devenus amis puis nous sommes venus ici. Nous nous sommes mariés, nous avons eu nos enfants, puis nos enfants à leur tour se sont mariés et ont eu des enfants. Alors nous sommes tous comme des parents (*sab dūsre ko riṣtedār lagte hai*). »

« C'est par amitié que nous sommes devenus parents. » Est ici énoncé dans une formule claire et des plus économiques le principe qui a gouverné l'établissement de liens pour la génération des lépreux qui a fondé l'ashram. C'est en effet sur la base de relations d'amitié que les personnes se sont unies les unes aux autres et se sont, au fil du temps et des extensions, de leurs mariages puis de celui de leurs enfants, récréées une véritable parenté.

Au départ, à l'hôpital de Dichpalli, se trouvent des individus isolés, sans relation particulière les uns avec les autres, des individus dont les liens de parenté initiaux ont été rompus. Les membres fondateurs de l'ashram ont en effet tous connu une rupture d'avec leurs appartenances initiales, lesquelles en Inde sont données à la naissance et par la naissance. Ils l'ont connue séparément, chacun dans leur village, et ce de manière parfois



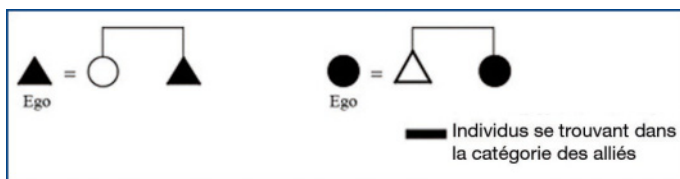
différente : sous la forme d'une exclusion radicale pour certains (généralement les femmes), suite à un lent processus de mise à l'écart et de changements dans l'ordre des relations (sociabilité et commensalité) pour les autres. Poussés au départ – seuls ou en couple –, ils ont rejoint cet hôpital de Dichpalli, administré par des missionnaires méthodistes britanniques, spécialisé dans le traitement de la lèpre et où ils ont séjourné durant plusieurs années. Ils y ont expérimenté de nouveaux modes relationnels, placés sous le déterminisme commun de la lèpre, partageant un même quotidien et soumis à un même régime de conduites au-delà de toute distinction sociale. De ce partage d'expériences fortes – de la maladie, du rejet et des ruptures, de la médicalisation –, sont nées des amitiés, par ailleurs sous-tendues par des ententes, des communautés de vues et de perceptions, des proximités d'origine géographique, parfois de statut de caste. Des amitiés qui, entre personnes de sexe opposé, ont conduit soit à se marier, soit à faire de son amie une sœur (ce sont généralement les hommes qui ont pris l'initiative de dire « sœur » à des femmes).

Deux mouvements ont en effet opéré conjointement : d'un côté des mariages, de l'autre des assignations de « frères » et de « sœurs », soit deux modes d'association fondés chaque fois sur des relations d'amitié. L'amitié, née d'un ensemble de partages et dans un espace qui les a rendus possibles, s'est ainsi trouvée formalisée dans le registre de la parenté, en conduisant un homme et une femme à se marier ou à se considérer comme frère et sœur. En d'autres termes, l'amitié, qui entre deux hommes ou deux femmes ne nécessite pas le recours à un autre langage pour s'exprimer, s'est traduite dans le domaine de la parenté lorsqu'elle concernait deux personnes de sexe opposé. Comme nous l'avons dit, un homme et une femme ne peuvent se dire « amis » sans laisser planer une ambiguïté quant au caractère sexuel de leur relation. En faisant d'une amie,

pour Ego masculin, soit une épouse soit une sœur, ou d'un ami, pour Ego féminin, soit un époux soit un frère, l'ambiguïté se trouvait dès lors levée et le caractère potentiellement sexuel de la relation soit affirmé (par le mariage) soit totalement exclu (par la consanguinité).

Ce recours à la catégorie frère-sœur pour exprimer une relation d'amitié est loin d'être anodin. Dans le système de la parenté dravidienne<sup>6</sup> (rappelons que la majorité des lépreux qui ont fondé l'ashram sont originaires du sud de l'Inde), la relation d'un frère envers sa sœur est avant tout une relation de respect. Pour Ego masculin, dire « sœur » à une femme et donc décider de la considérer comme telle était non seulement une manière respectueuse de signifier son affection et son attachement, mais aussi une forme d'engagement. Qui plus est, avoir des sœurs, c'est aussi avoir des alliées. Pour Ego masculin (puisque nous sommes ici en contexte patrilinéaire), désigner une femme mariée comme étant sa sœur, c'est faire de l'époux de cette dernière un allié.

<sup>6</sup> La parenté dravidienne a une terminologie fondamentalement classificatoire : les parents sont rangés en classes et « les termes de parenté sont des *catégories* au sens logique du mot » (Zimmermann, 1993 : 104). Dans cette logique classificatoire, on distingue le côté (le père ou la mère), la génération, le sexe et l'âge, et, comme l'a montré Dumont, l'opposition fondamentale se fait entre alliés et consanguins : tout parent est soit un « consanguin terminologique », soit un « allié terminologique » (Dumont, 1975a : 51). Il y a ainsi une bipartition de tous les parents reconnus comme tels, avec pour effet que les alliés de mes alliés sont mes consanguins (et donc certains parmi eux mes « frères »). Pour une présentation détaillée des systèmes dravidiens de parenté, on pourra se référer aux textes fondamentaux de L. Dumont (1957 et 1975a et b) qui a étudié ces systèmes à partir d'une expérience en pays tamoul. Signalons également l'ouvrage de T. R. Trautman (1981) et l'article de D. Rudner (1990). Concernant plus particulièrement l'Andhra Pradesh, voir les articles de R. M. Kodanda (1982) et O. Bossé (1983) ainsi que l'ouvrage de O. Herrenschmidt (1989) qui présente en index (p. 296) l'ensemble des termes et dans le corps du texte (pp. 109-117) une réflexion sur le mariage telugu.



Un couple marié, auquel s'adjoint pour Ego masculin un frère d'épouse (ou pour Ego féminin une sœur d'époux) est ce que Dumont définissait comme la relation d'alliance, « en tant que relation naissant entre deux personnes du sexe masculin (ou féminin) et leurs germains du même sexe, lorsqu'une "sœur" (un "frère") de l'un(e) est marié(e) à l'autre. »<sup>7</sup> (1975a : 88).

Ces assignations de « sœurs » ont pu se faire avant ou après le mariage de ces dernières : avant, elles ont conduit à faire des femmes amies des consanguines (à défaut de les avoir épousées) ; après, elles ont conduit à faire de leurs maris des alliés. Deux hommes pris dans une relation d'amitié ont parfois choisi de devenir « alliés », plutôt que de se dire « frères », en faisant de l'épouse de l'un une « sœur » pour l'autre<sup>8</sup> – mais les cas d'hommes ayant choisi de se dire « frères » pour signifier leur amitié sont nombreux également.

Ainsi, si l'amitié s'est exprimée dans le registre de la parenté s'agissant de deux personnes de sexe opposé (par un mariage ou par un lien de consanguinité), elle s'est parfois traduite dans ce même registre concernant également deux personnes de même sexe (en se disant frères ou en devenant alliés via la désignation de l'épouse de l'un comme sœur de l'autre). Dans tous les cas, l'amitié a été au cœur des relations et de la reconstitution de liens de parenté, et ce, sous des formes multiples. C'est ainsi parce que deux patients de Dichpalli étaient amis que, à la mort de l'un, l'autre a épousé sa femme et adopté son enfant.

<sup>7</sup> Dumont distinguait ici les systèmes patri- et matrilineaire et faisait référence à des groupes et non à des individus comme il le précise ensuite : « Elle [cette relation d'alliance] exprime le fait que si le mariage crée une relation entre deux personnes de sexe différent, il relie aussi leurs groupes » (Dumont, 1975a : 88). J'opère en ce sens une distorsion du propos de Dumont, en le ramenant à une échelle individuelle.

<sup>8</sup> À ce titre, on notera que les relations entre beaux-frères sont généralement de meilleure qualité qu'entre frères, entre lesquels il existe bien souvent des rivalités.

C'est parce que deux hommes étaient amis qu'ils ont choisi par la suite de marier leurs enfants. Ou encore parce qu'un homme et une femme amis se sont dits frère-sœur qu'ils ont ensuite marié leurs enfants, opérant ainsi une forme de mariage préférentiel entre cousins croisés.

En définitive, chacun a opéré selon ses souhaits, au regard aussi de sa situation et de ses expériences antérieures des relations de parenté. Mais chaque fois la relation d'amitié s'est transformée en lien de parenté : bien souvent dès la génération des premiers résidents, et quelquefois par la suite, ce qui a alors conduit à structurer les liens de manière rétroactive. Considérons un exemple.

Veeraya, lépreux, et Kashamma, elle aussi lépreuse, ont toujours été très proches. Le mari de Kashamma, aujourd'hui décédé, était ami de Veeraya. Lorsque Ramlu, le fils de Veeraya, vint en âge de se marier, le mari de Kashamma proposa de lui donner sa fille Santoshi. Les fiançailles eurent lieu puis finalement Ramlu épousa sa cousine croisée patrilatérale (réelle) après que Veeraya eut repris contact avec sa sœur au village, en Andhra Pradesh. Pour autant, les relations entre les deux familles n'en furent nullement affectées, et c'est alors la relation d'amitié entre Ramlu et Raju, le frère de Santoshi, qui prima : amis depuis l'enfance, les deux hommes sont entrés dans une relation de frères, *dharm se* (« de cœur ») comme ils disent. Aujourd'hui, Raju est véritablement considéré comme le frère cadet de Ramlu. Leurs épouses respectives s'appellent « sœurs » (l'épouse de Ramlu est *dīdī*, « sœur aînée », pour celle de Raju, et cette dernière est *bahan*, « sœur cadette », pour la première), tout comme Santoshi, qui a failli épouser Ramlu, est aujourd'hui devenue pour lui une sœur : elle appelle Ramlu *bhaiyā*, « frère », et son mari Hannapa est le *jījā*, « mari de sœur », de Ramlu au même titre que de Raju. De la même manière, Veeraya et Kashamma se disent *bāva et vadina* (en telugu, catégories désignant les cousins croisés, alliés terminologiques dans la mesure où

leurs enfants peuvent potentiellement se marier). Autrement dit, la relation d'amitié instaurée à la génération des parents, qui aurait pu se formaliser par un mariage entre leurs enfants (Ramlu et Santoshi), est devenue à la génération suivante non une relation d'alliance mais un lien de consanguinité, faisant en retour de Veeraya et Kashamma non pas des « frère » et « sœur », mais des « frère de mari » et « épouse de frère ».

Dans la configuration de l'ashram, les relations d'amitié, comme Dumont (1975a : 85-100) l'a montré pour les relations d'alliance, s'héritent : soit sous une forme déjà inscrite dans le registre de la parenté, soit en tant que telles et, à partir du moment où elles se trouvent formalisées dans ce registre à la génération suivante, elles reconfigurent les liens à la génération ascendante.

Ainsi, par une succession de mariages et d'assignations de « frères » et de « sœurs » inaugurées par les lépreux (dès leur séjour à l'hôpital de Dichpalli et par la suite au cours des années passées sur les routes), et qui se sont ensuite perpétuées à la génération de leurs enfants, lesquels ont hérité de ces liens et ont achevé de les structurer dans le registre de la parenté par leurs propres mariages et/ou leurs propres assignations de « frères » et de « sœurs », les liens se sont étendus jusqu'à situer chacun dans la chaîne des relations et dans une position de parenté par rapport aux autres.

Notons pour finir que ce mode de reconstruction de liens de parenté à partir de relations d'amitié se retrouve de façon similaire dans les autres regroupements de lépreux en Inde. Et que ces liens de parenté reconstruits sont tout aussi effectifs que les liens de parenté réels et peuvent les supplanter quand ils leur coexistent – cela étant très fréquent. On les retrouve ainsi à l'œuvre lors des rites marquant les âges de la vie (pose du nom, première tonte, premières règles pour les jeunes filles) et lors de célébrations tels les fiançailles et le mariage, en faisant intervenir certains parents ainsi définis (en particulier les *bhābhī*, catégorie des cousines croisées et des « belles-sœurs », et les *māmā*, catégorie des « beaux-pères », qui englobe les oncles maternels). Ils jouent aussi un rôle dans le choix du conjoint et de la forme de mariage : mariages préférentiels avec la cousine croisée matrilatérale, considérée comme telle sur la base

d'une relation frère-sœur établie entre leurs parents, ou, moins fréquemment, mariages de deux frères avec deux sœurs (là encore considérés comme tels selon des liens reconstitués en amont). Comme il est une règle qui n'a jamais été transgressée : l'interdiction de marier les enfants de deux frères ou de deux sœurs quand bien même il s'agirait d'une relation de germanité purement créée et décidée sur la base de relations d'amitié. À partir du moment où les enfants tombent dans la classe des frères et sœurs (donc, des consanguins), quelle que soit la nature des liens qui a conduit à les ranger dans cette classe, un mariage entre ces enfants ne peut être envisagé. Il y a chez les résidents de l'ashram un véritable dégoût à l'égard de tels mariages (avec la cousine parallèle) que pratiquent par exemple les musulmans du quartier, mais qui pour les résidents relèvent de la faute (*pāp*). Au sein de l'ashram, c'est le système dravidien de parenté qui s'est imposé à tous, quelles que soient l'origine géographique et la religion des résidents. Enfin, au quotidien, ces liens reconstruits peuvent être à l'origine de partages (de biens, de préparations alimentaires) et de solidarités.

Les expériences de rupture conduisent à interroger des relations qui, d'ordinaire, ne le sont pas et à puiser dans un ensemble de références et d'idées à disposition afin de recouvrer une existence sociale. Confrontés à la nécessité de se reconstruire des liens, les lépreux ont ainsi transformé l'amitié comme mode relationnel fondé en premier lieu sur le sensible, en une disposition permettant de fonder des rapports d'un tout autre type, d'alliance, de consanguinité ou de filiation.

### *Deux schèmes de l'amitié*

Ce qui ressort du processus de reconstruction sociale des lépreux, c'est d'abord une pensée de l'amitié, et à travers sa transformation, une pensée de la parenté, comme forces de cohésion et de structuration collective. Ce qui ressort également, c'est un conditionnement mutuel de ces deux catégories de liens sociaux – l'amitié et la parenté – en ce qu'elles sont pensées l'une par rapport à l'autre. Il apparaît en effet deux schèmes de l'amitié, selon qu'elle prend place dans un contexte préalablement structuré ou non par la parenté.

Face à la déstructuration de leurs liens d'appartenance d'origine (famille, caste, village),



les lépreux ont dû repenser leur présence au monde au regard de l'expérience de la maladie et de la solitude, mais aussi de leur connaissance antérieure des relations qui structuraient leur monde : leur système de parenté. Se reconstruire une parenté était pour eux se reconstruire une vie sociale. Ce sont alors les amitiés, qui apparaissent d'ordinaire comme des relations singulières, établies volontairement entre des individus hétérogènes, qui ont été investies.

L'amitié a été pensée comme le moyen de s'apparenter les uns aux autres, comme la possibilité de se recréer un ordre de relations, à travers la reconstitution de la dyade minimale de la reproduction sociale d'un groupe dans le sud de l'Inde : la relation frère-sœur et le mariage. Toutefois, penser l'amitié en vue de la constitution d'une parenté, c'est jouer sur la contingence même de l'amitié, qui contraste avec le caractère hérité ou tout au moins déterminé par la caste, de la parenté. Si l'amitié a certes été le fruit du hasard, des rencontres et des ententes, elle a cependant été conditionnée par cette charge qui pesait sur elle, par ce devoir qui lui incombait de permettre sa transformation en lien de parenté. Cette nécessité d'une transformation a conditionné l'amitié, en en faisant *un rapport d'identification*. Être pareil, être identique, c'est partager ce qui définit notre être et notre présence soit, pour ces individus, la lèpre. Les proximités des amitiés se devaient alors de s'accorder avec les qualités sociales et substantielles de la lèpre. Ce partage d'une corporalité, de sa substance est au cœur de l'intention collective ; on le retrouve également au niveau des mariages, sous la forme d'une endogamie de la lèpre (les mariages sont réalisés entre membres de communautés de lépreux) et au travers de critères d'union tel le rapport générationnel à la lèpre (une fille de lépreux se marie avec un fils de lépreux, une petite-fille de lépreux avec un petit-fils de lépreux).

Dans le contexte de la lèpre et d'une nécessité de se reconstruire des liens, l'amitié n'est pas seulement similaire à l'alliance, elle est l'alliance. Tout collectif recourt ainsi à des opérations d'uniformisation se devant de sceller les appartenances à un groupe, en Inde peut-être plus encore qu'ailleurs. La parenté reconstruite devient très rapidement réelle, et de fait s'impose à tous. Elle crée un espace commun avec ses règles, ses

devoirs et ses obligations réciproques, ses interdits et ses préférences. Elle s'actualise dans des pratiques, organise la vie quotidienne comme le déroulement de l'existence. Elle rend aussi possible l'essor du groupe et sa reproduction en tant que groupe.

Considérer l'amitié dans son rapport avec la parenté, c'est également comprendre l'articulation d'un individu à un collectif, comprendre le processus de son autonomisation. Si une première forme d'autonomisation de l'individu surgit de la radicalité de la rupture engendrée par la lèpre, une autre forme réapparaît, une fois rétablie une communauté de semblables, à travers un retour à l'amitié sous d'autres motifs. L'appartenance à un collectif permet en effet une tout autre production de l'amitié, qui n'est plus un rapport d'identification (construisant du semblable à partir de l'hétérogène), mais un rapport d'adéquation (entre semblables ou entre hétérogènes) propre à une rencontre et à sa contingence. Là encore, l'amitié n'est pas sans structure, qui n'est plus l'identité sociologique et de substance, mais la similarité d'un partage possible et singulier. C'est donc ici *le principe de l'analogie* qui construit l'amitié, un principe qui maintient l'hétérogène au sein du semblable, un principe par lequel les dissemblances incontournables au sein d'un collectif permettent aux ressemblances individuelles de s'exprimer et de s'autodéfinir. L'amitié redevient alors cette ouverture absolue et improbable, contingente et au-delà des codes sociaux. Elle révèle, et dans le contexte de la lèpre fait émerger, une autre forme d'individualité : un individu singulier non pas en raison de la lèpre mais singulier comme tout un chacun, par-delà ses attaches collectives.

Il y a ainsi un lien d'interdépendance entre amitié et parenté : si l'amitié offre la possibilité de reconstruire une parenté, cette dernière permet ensuite, de nouveau, l'essor de l'amitié sous d'autres aspects. Mais aussi deux pensées de l'amitié qui s'articulent à partir de la parenté (schème de l'analogie) ou de son absence (schème de l'identique).

## Bibliographie

- Berman J., Murphy-Berman V. et Pachauri A., 1988, « Sex differences in friendship patterns in India and the United States », *Basic and applied social psychology*, 9(1) : 61-71.

- Bossé O., 1983, « Le vocabulaire de parenté telugu », *L'Homme*, XXIII (2) : 97-108.
- Dumont L., 1957, *Une sous-caste de l'Inde du Sud. Organisation sociale et religion des Pramalai Kallar*, Paris-La Haye, Mouton.
- Dumont L., 1975a, *Dravidien et Kariera*, Paris-La Haye, Mouton.
- Dumont L., 1975b, « Terminology and prestations revisited », *Contributions to Indian Sociology*, 9 : 197-215.
- Herrenschmidt O., 1989, *Les meilleurs dieux sont hindous*, Lausanne, L'âge d'homme.
- Jest C., 1999, « De l'affection à l'amitié jurée : expériences asiatiques », in Georges Ravis-Giordani (ed.), *Amitiés. Anthropologie et histoire*, Aix-en Provence, Publications de l'université de Provence : 203-216.
- Kodanda R. M., 1982, « Kinship and marriage among the Jalari of coastal Andhra: a study of Dravidian kinship terminology », *Contributions to Indian Sociology*, 16 : 197-223.
- Martin F., 2011, *Reconstruire du commun. Les créations sociales des lépreux en Inde*, Paris, CNRS éditions/Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme, coll. « Chemins de l'ethnologie ».
- Osella C. et Osella F., 1998, « Friendship and flirting: micro-poliycs in Kerala, South India », *The journal of the royal anthropological institute*, 4 (2) : 189-206.
- Rudner D., 1990, « Inquest on Dravidian Kinship: Louis Dumont and the Essence of Marriage Alliance », *Contributions to Indian Sociology*, 24 : 153-173.
- Trautman T. R., 1981, *Dravidian Kinship*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Zimmermann F., 1993, *Enquête sur la parenté*, Paris, PUF, coll. « Ethnologies ».

### ***Leprosy communities in India***

*Gandhi Kushth Ashram*<sup>9</sup>, "Gandhi's leprosy community" is established in a poor area of the city of Jodhpur in Rajasthan (northern India). It

---

<sup>9</sup> The term *ashram* can refer both to a group of people (usually the faithful gathered around a *guru*) and the space thus inhabited (a space to welcome, offer refuge). However the religious aspect is absent here, as is shown by the term *kushth* associated with that of *ashram*: it is first of all leprosy which characterises the regrouping.

has nearly two hundred residents: the founder members, all of them lepers, who in spite of having been treated still carry leprosy marks, and their descendants, most of them born within the community, not affected by the disease but considered as lepers from a sociological point of view – even though we are now reaching the third generation of descendants.

The first feature of that community is the gathering in a contained space, physically delimited by a surrounding wall, of people from various castes, from the Untouchables to the Brahmins – who represent the two poles of the caste continuum. The residents are of different religious faiths (they are Hindus in majority, but there are also Christians and Muslims) and come from diverse regions, mainly from southern India (Andhra Pradesh, Karnataka and Tamil Nadu). In other words, birth status is here transcended by an event of biological nature – leprosy – common to the founder members of the group and which their descendants are still subjected to.

Unlike leper asylums, as they are known elsewhere in the world, in Africa, in Eastern Europe or on the American continent, it is here a voluntary regrouping brought about on the initiative of the people themselves, following their exclusion from their families and their villages, because of leprosy. The founders of the community are themselves former patients who met during their stay in a hospital specialised in treating leprosy and went through years of wandering around the country before settling in Jodhpur.

This situation is far from unusual in India. Throughout the country many groups of lepers are established in urban sectors or on the periphery of towns; they are institutionalised as in the case of Jodhpur ashram which enjoys the status of a non-profit-making organisation recognised by the State or are simple colonies, and are integrated in networks of relationships, solidarities and matrimonial exchanges – on the mode of leprosy endogamy. Every medium- and certainly large-sized town has at least one leper ashram or colony.

Like Jodhpur ashram, those groups generally date from the mid-seventies. That period corresponds to the end of leper asylums, which had no longer any reason of being as far as molecules which could stop the contagious nature of the

disease were now available, and precedes the development of ambulatory care – leprosy is now detected in the framework of specific campaigns and most patients are treated at home.

In a previous research<sup>10</sup>, I studied the process of how Jodhpur leprosy community came into being and developed, and its position in society. I showed how individuals, torn off all their previous belonging, got together and reconstructed a specific group, how they came to form a community with not only its principles and rules of life but also its constraints – originating from outside –, how they define themselves through their relationships with others and position themselves in Indian society. The analysis of this social elaboration revealed the utmost importance of the friendship which, for the lepers in Jodhpur ashram as well as for those in other leprosy communities in India, was at the very heart of the aggregation system and the collective reconstruction process.

Let us start with a few general remarks about friendship in India before carrying on with the way it is expressed among lepers' descendants.

### *Friendship among Lepers' Descendants*

In India, friendship is first of all a bond which ties two people of the same sex<sup>11</sup>. Moreover the Hindi language has a specific term, *sahelī*, to refer to friendship between two women. Therefore friendship is first and foremost a matter of gender. It is out of place between a man and a woman, and that from their first years in life. A close relationship between two people of the opposite sex will be expressed in a different way, usually in terms of kinship (“he’s like a brother for me”, “she’s like a sister for me”). Rather than the connection, it is the separation which is thus stressed, that is to say the impossibility of any sexual intercourse. Actually, though the word *dostī* refers to friendship as a relationship devoid of sexuality, it can also make reference to physi-

cal, carnal love (*dostī* is also used, nearly as an euphemism, to mean homosexuality – generally male – respectfully or at least without pejorative connotation). As a result, calling a person of the opposite sex one’s friend will allow ambiguity to remain.

Friendship is also a matter of age group. A man (or a woman) will not present himself or herself as the “friend” (*dost* or *dostī* as the case may be) of a person old enough to be his or her father (or mother). Here again, whatever understanding or closeness there may be, it will be expressed in terms of kinship.

On this basis, friendship encompasses a multiplicity of relationships, whose nature and expression depend on the people involved. At the origin of the bond can generally be found an encounter between people, which is first and foremost an encounter of points of view, conceptions, values, qualities or dispositions, sometimes experiences: a person concurs with another in what he is or what he represents, recognises himself in what he thinks, what his life is, the way he leads it, the ordeals he has gone through or is still going through. In this sense, friendship originates mostly from a sharing.

Let us look now at a few cases chosen among some of the lepers' descendants in Jodhpur leprosy community. Baslinga, a young woman at the ashram, says her best friend is another young woman who lives in Mandore, a few kilometres from Jodhpur, in a former hospital where some lepers' families have settled, although she met her only a few times and does not really keep in touch with her. When they meet, their relationship is very formal, without true complicity. But for Baslinga, this young woman embodies a kind of model: she is educated (*parhā-likhā*), very determined in continuing her lengthy studies in medicine, through which she met a young man who, though he does not come from a lepers' family, still wished to marry her. Though Baslinga has never aspired to such a future for herself, she still feels how ideal it would be and appreciates the values it demonstrates. This is why she made that young woman her “best friend”. Associating with respectable people, or being connected to them even in a purely formal way – which is actually of little import nor makes the tie real – is also a way of asserting one’s own respectability.

<sup>10</sup> Anthropology thesis defended in 2007 at Paris Ouest University and published under the title of *Reconstruire du commun. Les créations sociales des lépreux en Inde* (“Reconstructing Common Ground. The Social Creations of Leprosy People in India”) (Martin, 2011).

<sup>11</sup> This remark, which is valid for the ashram residents, is also true for the rest of Indian society, except for urbanised and Occidentalised fringe groups, such as university students.

Ramlu is friendly with a family man like himself, who lives in the city centre, outside the ashram. Like him again, he is rickshaw driver. This is actually how they met: a large family, who needed two vehicles for a trip, hired them both, but, at the end of the journey, had only one banknote to pay them. As a result, the two men decided to go and drink a *cāy* together before splitting the remaining sum. It gave them the opportunity for a long conversation, during which, for a few hours, each told all about himself. Ramlu:

“He first asked me where I come from and I told him everything, just like that: where I live, my father, leprosy, everything. I told him all my life-story (*merī kahānī*), from start to finish, straight out. For nearly two hours, he listened to me. I’d never done that before. Then he told me his. He’d suffered too because his father drank. Since that day, we’ve been friends. When I needed a loan from the bank to buy a new rickshaw because mine was knackered; he’s the one who guaranteed it. He’s a nice bloke.”

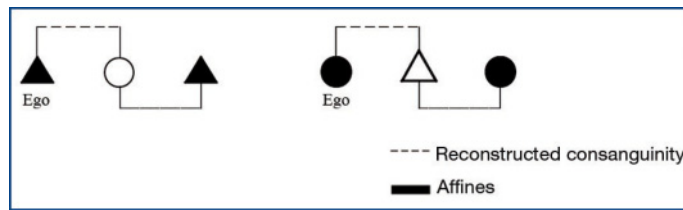
Here, an encounter between two people brought together totally by chance, was the occasion of a long verbal exchange, both revealing all about themselves. From that exchange, from the kindness of listening without judging and from their feeling of understanding which developed, from the baring of their souls thus revealing what both had in common, and the similarities in their lives and what they had been through, was born a friendship which would later find fulfilment through supporting each other when encountering difficulties. A friend is somebody who knows how to take an interest and pays no heed to differences – and with leprosy, they were huge. It is obvious that, for Ramlu, this is what makes that man “a nice bloke”, beyond the help given. For all that, both men rarely meet, once or twice a year at the most; and in spite of Ramlu’s repeated invitations, the man never came to the ashram. The relationship is based here on a powerful, founding event, and specific occurrences during specific situations; it follows a temporality which is its own, independent from the daily course of life; it rests on a sincere and authentic sharing, laid down once and for all; life contingencies are what later update the bond and set the rhythm and the opportunities of the meetings.

For Meera and Santoshi, two married women with children who both live at the ashram, friendship is, unlike the previous case, a daily sharing. They do everything together: shopping in town, going to the cinema, spending their leisure time. Complicity, laughter, confiding are all there. They support and help one another. Each says she knows “all” about the other. However, this knowledge is not based on where each of them originally comes from, or what their lives may have been before they arrived at the ashram. It is a knowledge in the present, which corresponds to the time of the relationship itself: what they know of each other is nothing else but what they have lived together. And the meeting which underlies their friendship is less a meeting of values or similar experiences as of personalities: “If we get on so well, they say, it’s because we’re the same”. It all lies in this «sameness» that is felt towards the other and that refers here to their nature, disposition, and to how they live and perceive things.

Friendship as it is expressed among lepers’ descendants takes us back to their parents and to a larger extent to the founder members of the ashram. For the latter, friendship played a central role in the reconstruction of bonds; it was at the heart of the aggregation process which gave birth to the community. Friendships for the ashram founders however, unlike for their children, took place in a special context, a context of broken-up bonds and exclusion. In the empty space left by the losses caused by leprosy, friendships then took a different turn and became kinship bonds.

### *Friendship, or how to reconstruct one’s kinship*

Nowadays, all the ashram residents define themselves in relation to one another using kinship terms. In this sense, there is not any non-kin in the community. Here is what one of the founder members told me: “It’s through friendship (*dostī se*) we became kin (*riṣṭedār ban gayā*). You must understand, we all went to Dichpalli [the place, in Andhra Pradesh, where the hospital is situated where the lepers who founded Jodhpur ashram were treated]. We became friends there, then we came here. We got married, we had children, then our children in turn got married and had children. So all of us are like kin (*sab dūsre ko riṣṭedār lagte hai*).”



“It’s through friendship we became kin.” Here is stated in a clear and terse sentence the principle which ruled how the bonds between the generation of lepers who founded the ashram were established. What linked people was indeed based on friendship and, over time and further extensions, their marriages and their children’s, they recreated a real kinship.

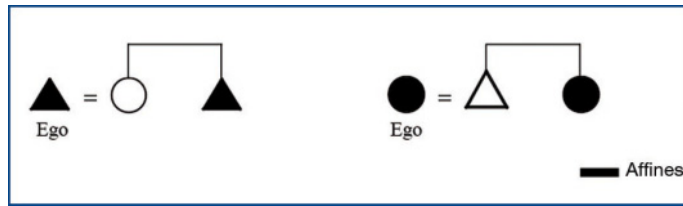
To start with, in Dichpalli hospital, there were isolated individuals, without any special ties to each other, individuals whose initial kinship bonds were broken off. All the founder members of the ashram have indeed experienced breaking off from what they initially belonged to and which, in India, is given at and through birth. They faced it separately, each in their villages, and sometimes in a different way: as a radical exclusion for some (generally women), or following a long process of ostracism and of changes in the order of relationships (sociability and commensality) for others. Driven to leave – alone or as married couples –, they got to that hospital in Dichpalli, run by British Methodist missionaries, specialised in treating leprosy, and they stayed there for several years. There they experienced new relational modes, placed under the common determinism of leprosy, sharing a same everyday life and subjected to the same behavioural system beyond any social distinction. From sharing striking experiences – disease, rejection and break-ups, and medical care –, were born friendships, which were moreover underlain with understandings, common views and perceptions, closeness of geographical origins or sometimes caste status. Friendships which, between people of the opposite sex, led them either to marry or to turn his friend into sister (men are the ones who generally took the initiative to say “sister” to women).

Two changes actually took place at the same time: on the one hand marriages, on the other designations of “brothers” and «sisters», that is two modes of association always based on

friendships. Friendship, born from a whole set of shared elements and in a space which made this sharing possible, became thus formalised at the level of kinship, leading a man and a woman to get married or to consider themselves as brother and sister. In other words, friendship, which between two men or two women does not require to resort to another language to be expressed, is conveyed as kinship when concerning two people of the opposite sex. As was said earlier, a man and a woman cannot call themselves «friends» without allowing an ambiguity to persist as to the sexual aspect of the relationship. Through turning a friend into either a wife or a sister – for male Ego –, and into either a husband or a brother – for female Ego –, the ambiguity was then removed and the potentially sexual aspect of the relationship either asserted (through marriage) or totally excluded (through consanguinity).

This resorting to the brother-sister category to express a tie of friendship is far from insignificant. In the Dravidian kinship system<sup>12</sup> (it must not be forgotten that the majority of the lepers who founded the ashram are from southern

<sup>12</sup> Dravidian kinship has a fundamentally classificatory terminology: kin are arranged in classes and “kinship terms are categories in the logical sense of the word” (Zimmermann, 1993: 104). In this classificatory logic, the side (mother or father), the generation, the gender and the age are distinguished, and, as Dumont showed it, the fundamental opposition is made between affines and consanguines: all kin are either “terminological consanguines” or “terminological affines”. Thus there is a bipartition of all kin recognised as such, with the result that my affines’ affines are my consanguines (and therefore some of them are my “brothers”). For a detailed presentation of Dravidian kinship systems, see the fundamental texts by L. Dumont (1957 and 1975a et b) who studied those systems on the basis of an experience in Tamil Nadu. We can also mention T. R. Trautman’s work (1981) and D. Rudner’s article (1990). As regards Andhra Pradesh, see the articles by R. M. Kodanda (1982) and O. Bossé (1983) as well as the book by O. Herrenschmidt (1989) who presents in the index (p. 296) all the terms and in the body of the text (pp. 109-117) a study of Telugu marriage.



India), the relationship of a brother towards his sister is first and foremost one of respect. For male Ego, saying “sister” to a woman and therefore deciding to consider her as such was not only a respectful way to express his affection and attachment, but also a kind of commitment. Furthermore, having sisters is also having affines. For male Ego (as we are here in a patrilineal context), calling a married woman his sister is to make her husband an affine.

A married couple, to which is added for male Ego a wife’s brother (or for female Ego a husband’s sister) is what Dumont defined as affinal relationship, “as a relationship coming into existence between two male (or female) individuals and their siblings of the same sex, when one’s “sister” (or “brother”) is married to the other.”<sup>13</sup> (1975a: 88).

These designations of “sisters” may have taken place before or after the women’s marriages: before, they led to making the female friends consanguines (for want of marrying them); after, they led to making the husbands affines. Two men tied by friendship sometimes chose to become “affines”, rather than to call each other “brother”, by making the wife of one of them a “sister” for the other<sup>14</sup> – but there are also many cases of men who chose to call themselves “brothers” to express their friendship.

Thus, if friendship has been expressed in kinship terms when it was concerning two people of the opposite sex (by marriage or through a consanguineal tie), it has been sometimes formu-

lated in the same terms when it also was concerning two people of the same sex (they called themselves brothers or become affines through designating the wife of one of them as the other’s sister). In all cases, friendship was at the heart of the relationships and the reconstructions of kinship bonds, in many different ways. Thus, because two male patients at Dichpalli were friends, when one of them died the other married his wife and adopted his child. It is also because of friendship that two men chose later to marry their children. Or again, friendship led a man and a woman who considered each other as brother and sister to later marry their children, thus arranging a type of prescriptive marriage between cross-cousins.

Ultimately, they all followed their wishes, also with regard to their situation and their previous experiences of kinship relationships. But every time, friendship was turned into a kinship bond: very often, from the time of the generation of the first residents, and sometimes later, leading then to a retroactive structuring of the bonds. Let us look at an example.

Veeraya, a man with leprosy, and Kashamma, a woman also infected with the disease, have always been very close. Kashamma’s husband, now deceased, was a friend of Veeraya. When Ramlu, Veeraya’s son, reached marriageable age, Kashamma’s husband offered to give him his daughter Santoshi. The engagement took place but Ramlu eventually married his (real) patrilineal cross-cousin after Veeraya got back in touch with her sister in her village, in Andhra Pradesh. But for all that, the relationship between both families was in no way affected, and the friendship between Ramlu and Raju, Santoshi’s brother, then prevailed: friends since their childhood, both men started a brother relationship, *dharm se* (“of the heart”) as they call it. Nowadays, Raju is truly considered as Ramlu’s younger brother. Their respective wives call themselves “sisters” (Ramlu’s wife is *didī*, “elder sister”, to Raju’s, and the latter is *bahan*, “younger sis-

<sup>13</sup> Dumont distinguished here patri- and matrilineal systems and refers to groups, not to individuals as he specified further: “It [this affinal relationship] expresses the fact that if marriage creates a relationship between two people of different sexes, it also links their groups” (Dumont, 1975a: 88). In this sense, I am distorting Dumont’s definition, through reducing it to an individual scale.

<sup>14</sup> In this respect, it will be noted that the relationship between brother-in-laws is usually better than between brothers, between whom there are very often rivalries.

ter”, to the former), in the same way as Santoshi, who nearly married Ramlu, has now become a sister for him: she calls Ramlu *bhaiyā*, “brother”, and her husband Hannapa is Ramlu’s *jīyā*, “sister’s husband”, as is Raju. In the same way, Veeraya and Kashamma call each other *bāva* and *vadina* (in Telugu, categories describing cross-cousins, terminological affines as far as their children can potentially marry each other). In other words, the friendship, started with the parents’ generation, which could have become formalised by a marriage between their children (Ramlu and Santoshi) became with the following generation not an affinal relationship but a consanguineal bond, in return not making Veeraya and Kashamma “brother” and “sister”, but “husband’s brother” and “brother’s wife”.

In the ashram configuration, ties of friendship, as Dumont (1975a: 85-100) showed it for affinal relationships, are inherited: either in a form already set in terms of kinship, or such as they are, and from the moment when they are formalised in those terms at the following generation they reconstruct the bonds at the ascending generation.

Therefore, through successive marriages and “brothers” and “sisters” designations introduced by the lepers (from the time they stayed at Dichpalli hospital and afterwards during the years spent on the roads), and which were later perpetuated by their children’s generation, who inherited those bonds and finished structuring them in kinship terms by their own marriages and/or their own designations of “brothers” and “sisters”, the bonds were extended until each individual was situated in the chain of relationships and had a kinship position in relation to the others.

Finally it must be added that this mode of reconstruction of kinship bonds based on ties of friendship can be similarly found in the other lepers’ groups in India; and that those reconstructed kinship bonds are as effective as real ones and can supplant them when they co-exist. They are thus found at work during the rites marking the stages of life (name-giving, first hair-cutting, first menstruation) and during the celebrations such as engagement and marriage, through making some of the kin thus defined play a part (especially the *bhābhī*, female cross-cousins and “sisters-in-law” category, and the *māmā*,

“fathers-in-law” category, which includes mothers’ brothers). They also play a role in the choice of the spouse and the type of marriage: prescriptive marriages with the matri- or patrilineal cross-cousin, considered as such on the basis of a brother-sister relationship established between their parents, or, less frequently, marriages of two brothers with two sisters (here again considered as such according to prior reconstructed bonds). Also there is a rule which has never been transgressed: it is forbidden to marry two brothers’ or two sisters’ children even if this is a sibling relationship totally created and decided on the basis of friendship. From when the children fall into the brothers and sisters’ category (that is, consanguines), whatever the nature of the bonds which led to put them in that class, a marriage between those children cannot be considered. Among the ashram residents, there is a real repulsion for such marriages (with a female parallel cousin) which, for example, take place among the Muslims in the area, but which, the residents judge to be a fault (*pāp*). Within the ashram, it is the Dravidian kinship system which became the rule for all, wherever they came from and whatever their religion. Finally, in everyday life, those reconstructed bonds can be the basis of sharing (goods, cooked food) and solidarities.

Experiencing break-ups leads to questioning relationships which usually are not and to draw from a set of references and ideas at one’s disposal so as to regain a social life. Facing the need to reconstruct bonds for themselves, lepers had thus changed friendship as a relational mode first of all based on perceptions and feelings, into an ability to build connections of a very different type: affinity, consanguinity or descent.

### *Two friendship schemes*

What comes out of the lepers’ process of social reconstruction is first a way of thinking friendship and through its transformation a way of thinking kinship as cohesion and collective structuring forces. What also comes out, is a mutual conditioning of both these categories of social bonds – friendship and kinship – because they are thought in relation to one another. Two friendship schemes are therefore revealed depending on whether friendship takes place in a context previously structured or not by kinship.

Facing the disintegration of the bonds which defined those they originally belonged to (family,

caste, village), lepers had to rethink their being-in-the-world with regard not only to the experience of disease and loneliness but also to their previous knowledge of the relationships which structured their world: their kinship system. Reconstructing their kinship was a way for them of reconstructing their social life. It was then friendships, which usually appear as singular relationships, voluntarily established between heterogeneous individuals, which were used.

For the lepers, friendship was thought as the means of becoming one another's kin and the possibility of re-creating social relationships, through reconstructing the minimal dyad of social reproduction in a southern India group: the brother-sister relationship and marriage. However, thinking friendship with a view to constructing kinship is to play with the contingency itself of friendship, in contrast with the nature of kinship which is inherited or at least determined by caste. If friendship occurred indeed by chance, encounters and understandings, it was however conditioned by the responsibility that weighed on it, the duty it had of enabling its transformation into a kinship bond. The necessity of this transformation has conditioned friendship through turning it into *a connection of identification*. To be alike, to be identical, is to share what defines our being and presence that is, for those people, leprosy. The closeness of friendship had then to match the social qualities and the substance characteristic of leprosy. The sharing of a same body reality and its substance is at the heart of the collective intention; it can also be found at the level of marriages, in the form of a leprosy endogamy (marriages take place between members of lepers' communities) and through union criteria such as the generational distance to leprosy (a leper's daughter marries a leper's son, a leper's granddaughter a leper's grandson).

In the context of leprosy and of a need to reconstruct bonds, friendship is not only similar to an alliance but it is also an affinity. Any collective thus resorts to operations of standardisation aiming at sealing the belonging to a group, maybe more in India than anywhere else. Rebuilt kinship quickly becomes real and is de

facto enforced upon everybody. It creates a common space with its rules, its reciprocal duties and obligations, its bans and preferences. It is updated by its practices, organises life in its daily aspects as well as along its whole course. It ensures that the group can develop and reproduce as a group.

To consider friendship in relation to kinship means also to understand the links between an individual and a group, to understand how an individual's autonomisation process occurs. If a first type of individual's autonomisation comes from the radical rupture caused by leprosy, another type of autonomisation reappears, once a community of similar individuals is set up again, through a return to friendship for other reasons. Belonging to a collective allows indeed a totally different production of friendship, which is no longer a connection of identification (building similarity from heterogeneity), but a connection of adequacy (between those who are similar or between those who are heterogeneous) related to an encounter and its contingency. Here again, friendship is not without a structure, which is no longer the sociological identity of substance but the similarity of a possible and singular sharing. Here, it is therefore *the analogy principle* which builds friendship, a principle which maintains the heterogeneous within the similar, a principle by which the dissimilarities which cannot be ignored within a collective make it possible for the individual similarities to be expressed and defined by themselves. So friendship becomes again an absolute and improbable opening, which is contingent and beyond social codes. It reveals, and in the leprosy context makes stand out, another form of individuality: an individual who is singular not because of leprosy but, as everybody else, singular beyond his collective ties.

There is thus a connection of interdependence between friendship and kinship: if friendship offers the possibility to rebuild a kinship, kinship then allows again the development of friendship in other forms. But there are also two thoughts of friendship which are based on kinship (scheme of the analogous) or the lack of it (scheme of the identical).



# Mécanismes cognitifs pour la compréhension mutuelle lors d'une conversation

Edmundo KRONMÜLLER

## Résumé

Quel sont les mécanismes cognitifs qui permettent la compréhension mutuelle lors d'une conversation ? Cette question fait apparaître des enjeux spécifiques liés aux particularités du contexte conversationnel, ainsi qu'aux caractéristiques propres de la conversation et du système cognitif humain de compréhension. En effet, le contexte conversationnel peut être caractérisé comme un espace rempli d'informations utiles pour la compréhension ; le sens conventionnel des mots, l'espace physique, la prosodie et les motifs de la conversation, pour n'en mentionner que quelques uns, sont toutes des informations potentiellement pertinentes pour discerner ce qu'un locuteur souhaite dire. En outre, lors d'une conversation, le temps d'interprétation et de contribution à la conversation est limité par la dynamique des tours de parole et d'écoute. Cette dynamique des tours de parole correspond à des temps accordés et assumés de façon implicite où toute déviation de réponse – par exemple le fait de mettre longtemps à répondre à une question – peut avoir une influence sur l'interprétation, construite par le destinataire, de ce que l'autre veut dire. Enfin, le système cognitif humain est limité en ce qui concerne la capture (attention), la rétention (mémoire) et la manipulation (traitement) de l'information linguistique et de l'information contextuelle. Ces limites sont amplement développées dans les publications de sciences cognitives de ces 40 dernières années. De cette façon, toute approche qui chercherait à expliquer de façon mécanique la compréhension mutuelle lors d'une conversation devrait rendre compte de la façon dont les interlocuteurs parviennent à interpréter ce que l'autre veut dire, dans un contexte informatif complexe, avec des contraintes de temps et des restrictions de la capacité à traiter l'information (Kronmüller, 2008).

## Mots-clés

Cognition, Communication, Conversation, Pragmatique, Psycholinguistique.

## Cognitive mechanisms for mutual understanding during conversational interaction

### Abstract

What are the cognitive mechanisms underlying mutual understanding during an everyday conversation? The answers to this question need to take into account the specific characteristics of the elements involved in a conversation. First, the *conversational context* can be characterized as a space flooded by information that might or might not be relevant to reach a mutual understanding: the conventional meanings of the words being uttered, the physical characteristics of the space in which the conversation is taking place, the goal of the conversation, and the intonation of the voice in each utterance, just to name a few. Second, any mechanistic explanation of mutual understanding must account for the *time constraints* of a conversation, posited mainly by the dynamic of turn taking, where the time to respond and to speak are implicitly determined and where any deviation of the expected timing can be interpreted as communicative (for example, if we take a long time to answer a question like "Do you love me?"). And third, there are *computational limitations* in human cognition for the processing of environmental information, for example in the case of attention, memory and reasoning. All these constraints are difficult restrictions for the organism processing conversation-relevant information. Thus, any account trying to mechanistically explain how we mutually understand each other during a conversation needs to explain how interlocutors infer what each of them wants to say in an environment flooded with information, with time and computational limitations in the processing of information (Kronmüller, 2008).

In the last decade, several research programs in psychology have converged in their intention to figure out how people understand each other in everyday conversation. For example, psycholinguistics researchers, traditionally interested in the comprehension of texts and reading, start using their methods, concepts and explanations to uncover and understand the processes involved in utterance interpretation and speaking (Keysar, et al., 1998; Hanna, et al., 2003). Similarly, the psychology of reasoning, summoned by the inferential character of utterance comprehension, has to coincide with elements to shed light on how those inferences are made, and what the interactional factors interfering or facilitating them are (Keysar et al., 2000; Epley et al., 2004).

The goal of this chapter is to expose the theoretical discussions and the empirical issues that have shaped a new research program in Cognitive Science: *Conversational Psycholinguistics*. This new research program looks to scientifically and mechanistically explain human communication during a face to face conversational interaction. First, I will expose the philosophical roots of the questions this new research program attempts to resolve. I propose that these roots can be found in the reconceptualization of the notion of *communication* as an inference making process of the communicative intentions of others. Then, I will briefly expose the different accounts to the problem given by psychology and linguistics, which have proposed explanations in terms of cognitive mechanisms. Finally, I will analyze some challenges to this new research and some possible courses of action in order to give a naturalistic and mechanistic explanation of human communication in conversational contexts.

### Keywords

Cognition, Communication, Conversation, Pragmatics, Psycholinguistics

Ces dix dernières années, certains programmes de recherche psychologique se sont retrouvés autour d'un intérêt commun pour l'élucidation de la façon dont se produit la compréhension mutuelle lors d'une conversation quotidienne. D'une part, la psycholinguistique, qui s'était consacrée traditionnellement aux processus de compréhension des phrases et textes écrits, a commencé à appliquer les méthodes de recherche et explications qui lui sont propres à la compréhension des énoncés oraux (Keysar, Barr, Balin, et Peak, 1998 ; Hanna, Tanenhaus et Trueswell, 2003). D'autre part, la psychologie du raisonnement, interpellée par le caractère inférentiel de la compréhension conversationnelle, a apporté des outils pour expliquer la façon dont ces inférences sont faites et la nature des facteurs interactionnels qui l'influencent (Keysar, Barr, Balin, et Brauner, 2000 ; Epley, Keysar, Boven, et Gilovich, 2004).

L'objectif de ce texte est d'exposer la discussion théorique et empirique qui s'est transformée progressivement en un nouveau programme de recherche : la *psycholinguistique conversationnelle*. Cette nouvelle discipline cherche à expliquer de façon scientifique la compréhension dans des contextes de communication en face-à-face.

Dans un premier temps, nous exposerons l'origine du problème qui se situe au niveau de la reconceptualisation du phénomène de communication comme processus impliquant l'inférence des intentions communicatives de l'autre. Ensuite, nous exposerons les différentes approches du problème par les sous disciplines de la psychologie et de la linguistique qui ont proposé des explications en termes de mécanismes cognitifs à la base de la compréhension. Enfin, nous présenterons les résultats d'une nouvelle expérience dont nous souhaitons qu'ils enrichissent le débat sur les mécanismes de compréhension mutuelle lors d'une conversation.

### L'origine du problème : la reconceptualisation du phénomène de communication

Il existe aujourd'hui un consensus entre les spécialistes de la communication sur les limitations du sens conventionnel des mots pour expliquer la communication. Ainsi, c'est un fait amplement accepté que, pour interpréter ce qu'un locuteur dit, on a besoin, outre le sens conventionnel et linguistique des mots, de beaucoup plus d'informations. Traditionnellement, on a appelé toute cette information le *contexte* ou information

*paralinguistique*. L'une des premières caractérisations de cette information, réalisée par Stawson (1950), montrait déjà combien l'information contextuelle était ample et complexe, contenant autant le lieu de l'interaction, le temps, l'identité du locuteur, les motifs de la conversation que l'histoire partagée des interlocuteurs. La distinction qui permet de montrer la pertinence du contexte ainsi défini est peut-être la différence entre *phrase (sentence)* et *énoncé (utterance)*. Le premier fait référence à la construction grammaticale qui consiste en items lexicaux combinés de façon légale. Il est important de noter que la phrase ne fait référence ni au contexte ni au locuteur. Au contraire, un énoncé consiste fondamentalement en une expression verbale dite par un locuteur dans un contexte spécifique, pour un motif déterminé.

Une fois établie la distinction entre phrase et énoncé, il devient évident que le concept même de *sens* doit être rénové de façon à rendre compte de cette distinction. Grice (1957) propose de distinguer *sentence-meaning* (sens-de-la-phrase) et *speaker-meaning* (sens-du-locuteur). Le premier concept fait référence au sens d'une phrase et le second au sens de l'énoncé. Pour le premier concept, le caractère conventionnel du sens est d'une importance vitale. Ici, la compréhension est rendue possible par le fait que les interlocuteurs partagent un même langage, avec ses règles et son lexique. Pour le sens-du-locuteur en revanche, ce qu'il est important de considérer est ce que le locuteur *a voulu* dire en énonçant cette phrase-là et pas une autre. Et c'est précisément parce que comprendre le sens-du-locuteur implique une reconnaissance de ce que l'autre *a voulu dire*, que l'idée que la communication est de caractère nettement inférentiel devient pertinente ; ce qui serait à inférer sont les *intentions communicatives* du locuteur<sup>1</sup>.

Le processus qui mène à l'inférence des intentions communicatives lors d'une conversation doit être réalisé en respect des restrictions temporelles qu'une interaction conversationnelle impose. Pendant une conversation en effet, le temps de prise de parole ou d'écoute est restreint

par la dynamique de l'alternance des tours. Cette dynamique établit clairement le temps qui doit passer entre le moment où un interlocuteur arrête de parler et celui où l'autre prend la parole. La dynamique des tours de prise de parole a été amplement étudiée dans le domaine de l'analyse de conversation et définie comme l'échafaudage fondamental de la conversation, élément qui lui confère sa forme et permet son fonctionnement (Schegloff, 2000). Des études transculturelles ont même montré que la dynamique des tours de parole est assez récurrente dans les diverses cultures humaines et qu'elle prend des formes similaires qui laissent penser qu'elle accomplit la même fonction (Stivers, et al., 2010). Nous voyons donc que la conversation impose un temps qui doit être suivi par les interlocuteurs si l'on veut suivre un cours effectif et maximiser les probabilités de compréhension mutuelle. Ne pas suivre ces temps habituels ou convenus de façon implicite peut même mener à des malentendus, ce qui arriverait dans le cas où, face à une question, l'interlocuteur sollicité mettrait plus de temps que d'habitude à articuler une réponse. Cela pourrait être interprété comme un « je ne sais pas », « non » ou « je ne veux pas le dire pour ne pas affecter notre relation » [face à la question, par exemple « Est-ce que tu m'aimes ? »].

Une autre contrainte très forte qui intervient au moment de l'interprétation et de l'émission d'un énoncé est celle qu'imposent les limites propres de la cognition humaine. Ces limites ont fait l'objet de nombreuses publications en sciences cognitives et elles sont considérées comme un point de départ pour la proposition de théories et de modèles d'explication du comportement humain (Simon, 1956 ; Gigerenzer, Todd and the ABC Group, 2000). Il est important de noter que ces limitations n'affectent pas seulement les processus supérieurs de cognition, comme le raisonnement et le langage, mais aussi les processus de base comme l'attention et la mémoire. Ainsi, pour interpréter un énoncé, les interlocuteurs se trouvent limités au niveau de leur attention aux stimuli, de la rétention de l'information en mémoire ainsi que pour inférer et tirer des conclusions sur la base des prémisses et de l'information nouvelle.

Si'il était possible de caractériser l'information comme la transmission de significations conventionnelles, c'est-à-dire comme un code, la tâche

<sup>1</sup> C'est le fait de penser le sens comme ce que le locuteur veut dire et non pas ce que le sens conventionnel des mots en jeu dans la phrase et leur compositionnalité disent qui a ouvert la sous discipline de la linguistique appelée pragmatique.

pour les sciences cognitives et pour toute explication mécaniste de la communication serait de décrire les processus de codage, transmission et décodage d'un message. De fait, les théories de la communication nées au sein de l'ingénierie et de l'informatique ont été appliquées à la communication humaine comprise comme processus de codage, transmission et décodage (Shannon, 1948 ; Shannon y Weaver, 1949). Cependant, si la communication implique nécessairement *l'inférence* de ce que le locuteur est en train d'essayer de communiquer par sa conduite verbale, avec des contraintes de temps imposées par la dynamique des tours de parole, avec des contraintes pour le traitement de l'information imposées par la nature même du système cognitif, alors la tâche pour toute explication mécaniste des processus de compréhension mutuelle lors d'une conversation est précisément de rendre compte de la façon dont la compréhension et la communication sont possibles étant donné la massivité de l'information potentiellement nécessaire et les contraintes temporelles et de traitement qui existent pour l'assimiler.

### Les mécanismes cognitifs à la base de l'interprétation d'énoncés lors d'une conversation

La psycholinguistique conversationnelle naît, en partie, de l'application à l'étude d'énoncés oraux de modèles théoriques et de techniques méthodologiques amplement utilisés pour étudier la compréhension de phrases écrites. L'une des dimensions clés pour l'étude des processus de compréhension lorsqu'il y a du langage en jeu est l'intégration du stimulus linguistique et de l'information non linguistique. Comme on l'a montré auparavant, une conversation peut être caractérisée par un environnement saturé d'informations potentiellement pertinentes, ce qui rend le problème de l'intégration de l'information central. Les deux positions qui sont apparues au sujet de la façon dont l'information est intégrée pour inférer ce qu'un locuteur veut dire proviennent de la recherche sur le traitement de phrases écrites. Pour l'une des positions, l'information est intégrée de façon séquentielle : une grande partie de l'information est ainsi ignorée dans un premier temps et une petite portion de l'information seulement est utilisée comme point de départ pour générer une pre-

mière interprétation ; le reste de l'information est utilisé postérieurement, soit pour compléter l'interprétation, soit pour faire un suivi des problèmes d'interprétation possibles, soit pour réparer un malentendu. Pour l'autre position, toute l'information est intégrée en parallèle : toutes et chacune des sources d'information contribuent immédiatement, dans une proportion plus ou moins importante, à l'interprétation. L'une des clés de ce processus d'intégration multiple est l'idée de concurrence entre interprétations. Cette concurrence est générée par l'intégration de toute l'information de l'environnement et la génération de plus d'une interprétation possible, qui entrent en concurrence dans un processus itératif jusqu'à ce que l'une d'entre elles acquiert une activation supérieure.

Inspirée par l'idée de base que la compréhension mutuelle implique nécessairement l'inférence des états mentaux de l'interlocuteur, plus spécifiquement de *ce que le locuteur veut dire*, la psycholinguistique conversationnelle commence à se structurer sur la base de la recherche de comment et quand l'information relative au locuteur, et en particulier ce que l'on croit que le locuteur sait ou ne sait pas, est incorporée à la compréhension.

L'une des premières idées, avancées par Clark et Marshall (1981), était que, pendant une conversation, les interlocuteurs génèrent un *Common Ground*, qui consiste en une structure de connaissance que les interlocuteurs infèrent mutuellement et qu'ils partagent. Imaginez par exemple une conversation dans laquelle les locuteurs commentent un film qu'ils ont vu tous les deux récemment et s'y réfèrent simplement en disant *le film*. Si, alors qu'ils se rencontrent le lendemain, l'un d'eux dit « *j'ai réfléchi au film* », selon Clark et Carlson (1981), le récepteur considérera comme référent de l'expression *le film* celui qu'ils commentaient la veille, car il est considéré que ce film et la manière déterminée de s'y référer est *Common Ground*. Ainsi, une première proposition est que cette structure de connaissance métareprésentative est le contexte intrinsèque de la compréhension, c'est-à-dire une condition préalable pour la compréhension mutuelle. Il est certainement d'une importance fondamentale, pour inférer ce qu'un locuteur veut dire, de savoir ce que le locuteur sait et ne

sait pas puisqu'il ne pourrait pas vouloir dire quelque chose qu'il ne sait pas.

Cette idée, très influente et pionnière, n'a pas réellement trouvé de support empirique, du moins dans sa version la plus radicale pour laquelle les locuteurs restreignent leur compréhension au Common Ground et où ceci serait la condition *sine qua non* de la compréhension. Dans le domaine de la communication référentielle, Keysar et ses collègues (Keysar et al., 1998 ; Keysar, et al., 2000) ont montré que les personnes considèrent souvent comme référents potentiels des éléments que le locuteur ne connaissait pas. Par exemple, face au commentaire « j'ai réfléchi au film », le récepteur interpréterait comme référent pour « le film » celui qu'il vient juste de voir, du moins dans le temps, même s'il sait que son ami ne sait pas qu'il vient du cinéma et que par conséquent il est impossible qu'il fasse référence à ce nouveau film ; c'est-à-dire que le nouveau film n'est pas Common Ground, puisque seul le récepteur connaît son existence. Le fait de considérer des référents que le locuteur ne connaît pas a amené Keysar et ses collègues à postuler que le Common Ground, en tant que structure de connaissance, était seulement intégré à l'interprétation d'un énoncé comme mesure de réparation dans le cas d'un éventuel malentendu et non pas en restreignant par avance l'interprétation comme cela avait été présenté auparavant. L'idée principale est que les récepteurs génèrent une première interprétation *égocentrique*, c'est-à-dire indépendante de ce que l'interlocuteur sait ou ne sait pas. Une fois cette interprétation générée, un processus de suivi pourrait ajuster l'interprétation de façon à ce que ne soient pas générés de possibles malentendus ou des problèmes de compréhension. L'information en Common Ground aurait un rôle prépondérant dans ce suivi et dans les réparations faites à l'interprétation problématique. Dans notre exemple du film, le récepteur interprétera « le film » comme le film qu'il vient de voir, car ce serait le plus remarquable ou le plus disponible dans sa mémoire (pour son caractère récent peut-être). Une fois générée cette information égocentrique, le système de suivi, faisant appel à la connaissance de ce que les locuteurs savent ou non, ajustera l'interprétation première et réinterprétera « le film » comme le film que les deux interlocuteurs ont vu ensemble. Comme on peut le voir, sont mentionnés deux mécanismes

qui agiraient de façon indépendante et, souvent, de façon séquentielle. Cette idée de l'utilisation indépendante et opportuniste de l'information dans le Common Ground est reprise également dans la proposition de Pickering et Garrod (2004). Pour eux, la compréhension lors d'un dialogue signifie fondamentalement le fait d'avoir des *représentations* alignées. Ces représentations seraient de tous les niveaux nécessaires dans une conversation : représentation de la situation communicative et représentations sémantiques, syntaxiques et phonologiques. L'alignement se mettrait en oeuvre de façon automatique à travers le mécanisme du *priming*.

La proposition de Keysar et de ses collègues a été substantiellement modifiée par Hanna, Tanenhaus y Trueswell (2003), qui ont établi que le Common Ground était intégré immédiatement à la compréhension, comme tout autre *contextual constraint*, et que son influence était déterminée par des facteurs de probabilité, c'est-à-dire qu'il ne restreindrait pas totalement la compréhension mais dépendrait de la force des autres clés informationnelles. Par exemple, du fait que Pedro venait de voir récemment un film, ce film avait davantage de force et annulait le poids du Common Ground dans l'interprétation. Cependant le Common Ground serait de toute façon intégré dès la début à l'interprétation. En termes mécanistes, le système de compréhension fonctionnerait comme un système de satisfaction contrainte, à la manière des modèles proposés dans la littérature connectionniste (McClelland, Rumelhart, and the PDP group, 1986). Ainsi, l'information en Common Ground serait l'une des contraintes, parmi toutes les autres, qui s'imposerait à l'exécution d'un acte cognitif, de la même façon que la position actuelle de la main et les obstacles qui se trouvent en face restreignent tous les mouvements pour saisir un objet qui se trouve également en face. Cette proposition, au lieu de définir des processus parallèles et indépendants, pose l'existence d'un seul mécanisme.

Le débat continue sur le terrain théorique et empirique. Des recherches récentes fournissent des preuves soit de l'effet immédiat du Common Ground (Metzing et Brennan, 2002 ; Heller, Grodner et Tanenhaus, 2008 ; Brown-Schmidt, 2009), soit de son effet retardé ou dissocié (Kronmüller et Barr, 2007 ; Barr, 2008).

## Résultats expérimentaux pour élargir le débat sur les mécanismes cognitifs de la conversation

Tentant d'incorporer de nouveaux éléments au débat, Kronmüller, Noveck, Krarzia y Charaffedine (en préparation) ont testé le cas où la référence à un objet se fait de façon indirecte, sans utiliser de nom ou de description qui puissent être appliqués directement à l'objet en question. Il s'agit, par exemple, du fait de se référer à une personne comme « pas celui qui porte un T-shirt rouge, l'autre ». La raison de l'incorporation de ce type de référence est d'éliminer l'*ajustement référentiel* entre l'expression utilisée et le référent (dans le premier exemple « j'ai réfléchi *au film* » ou dans le cas où l'on dit « regarde cette personne qui porte un T-shirt bleu »). L'ajustement référentiel étant éliminé, l'auditeur est obligé d'interpréter la référence et de reconnaître l'objet sollicité en faisant appel à l'information contextuelle uniquement et non pas au sens conventionnel d'un mot ou d'une expression, comme dans le cas des expériences qui ont motivé le débat exposé auparavant (Keysar et al., 2000 ; Hanna et al., 2003).

Dans cette expérience, les locuteurs donnaient la consigne à un récepteur de sélectionner un objet en niant que l'objet sélectionné était un autre objet présenté à côté de l'objet en question, qui avait été nommé auparavant. Par exemple, le locuteur disait « sélectionne la chose qui n'est pas l'entonnoir à l'envers », dans un contexte où trois objets non conventionnels étaient visibles : l'objet *nié*, qui avait été nommé préalablement comme *l'entonnoir à l'envers* ; l'objet *sans nom*, qui n'avait jamais été nommé avant ; et l'objet en *concurrency*, qui, en fonction de la condition expérimentale, pouvait soit avoir été nommé auparavant comme *l'immeuble futuriste*, soit – tout comme l'objet sans nom – n'avoir jamais été nommé auparavant. Les objets de l'expérience n'avaient pas de nom connu, puisqu'il s'agissait d'objets étranges ou de parties difficilement reconnaissables d'autres objets. L'usage d'objets étranges sans nom conventionnel est une pratique commune dans la recherche sur le rôle du Common Ground dans la communication (Clark et Wilkes-Gibbs, 1986 ; Brennan et Clark, 1996 ; Barr et Keysar, 2002 ; Metzinger et Brennan, 2003), car cela oblige les interlocuteurs à générer des noms *ad hoc* pour se référer aux objets qui sont hautement idiosyncrasiques (par exemple, face à un

étrange objet cylindrique, les interlocuteurs peuvent le nommer « l'entonnoir à l'envers »). Dans cette expérience en outre, les locuteurs étaient confédérés, c'est-à-dire qu'ils agissaient comme s'ils étaient des participants normaux pour faire croire au récepteur que les expressions étaient créées sur le moment de façon spontanée, mais c'était en réalité des assistants de recherche qui donnaient des consignes venant d'un script. Finalement, nous avons fait croire au récepteur que le locuteur qui donnait les instructions ne voyait à la fois que deux des trois objets que le récepteur voyait ; ainsi, du point de vue du locuteur, dire « sélectionne la chose qui n'est pas l'entonnoir à l'envers » était complètement collaboratif en termes conversationnels puisqu'il n'y avait, de son point de vue, que deux objets (l'entonnoir à l'envers et l'autre).

En général, dans les cas où l'objet en concurrence avait été nommé avant comme *l'immeuble futuriste*, les récepteurs sélectionnaient l'objet sans nom comme l'objet demandé par le locuteur à travers l'instruction « sélectionne l'objet qui n'est pas l'entonnoir à l'envers ». En revanche, quand l'objet en concurrence n'avait jamais été nommé à l'avance, tout comme l'objet sans nom, les récepteurs se sont décidés indistinctement pour l'objet sans nom et pour l'objet en concurrence (également sans nom dans ce cas). Cette réponse est cohérente avec les attentes pragmatiques des récepteurs, qui attendent des locuteurs qu'ils disent les choses de façon claire et directe, en évitant des confusions qui pourraient rendre la compréhension difficile (Grice, 1975). Ainsi, un récepteur attend que, dans le cas où il connaît le nom d'un objet, le locuteur se réfère à cet objet par ce nom et non par une expression complexe comme dans le cas de la négation d'un autre objet. C'est pourquoi, en entendant une consigne complexe avec une négation, les récepteurs ont interprété que l'objet en question n'avait pas été nommé auparavant et ont sélectionné le référent en se basant sur cette attente.

Il est intéressant de noter que, quand l'objet en concurrence avait été nommé par l'autre locuteur, qui n'était pas présent pendant l'expérience mais donnait ses consignes par une communication à distance accessible seulement au récepteur (c'est-à-dire que le locuteur présent n'avait pas accès au contenu de la conversation, ignorant totalement l'assignation d'un nom à l'objet en

concurrence), les récepteurs sélectionnaient indistinctement l'objet en concurrence et l'objet sans nom ; bien sûr, du point de vue du locuteur présent dans l'interaction, l'objet en concurrence n'avait pas de nom, puisqu'il ne pouvait pas entendre ce que l'autre locuteur distant disait au récepteur. Ce résultat montre que les récepteurs considèrent bien le Common Ground au moment de réaliser leurs interprétations finales.

Pour observer en temps réel le processus d'interprétation de la consigne et pas seulement son résultat final comme auparavant, nous avons utilisé un eyetracker. L'eyetracker nous permet d'observer le mouvement des yeux au moment même où les récepteurs écoutent et suivent les consignes des locuteurs. Ce qui a été observé est que, dans les cas où l'objet en concurrence n'avait pas de nom, les récepteurs regardaient indistinctement cet objet ou l'objet sans nom, reflétant ainsi leur décision finale. La décision finale se reflétait également dans les premiers instants de la compréhension dans le cas où l'objet en concurrence avait été nommé par l'interlocuteur présent : les récepteurs regardaient immédiatement l'objet sans nom. Il est à noter que lorsque c'était le locuteur à distance qui nommait l'objet en concurrence de façon préalable, la décision finale était différente de la décision des premiers instants de la compréhension : de même que dans le cas où l'objet en concurrence avait été nommé auparavant par le locuteur présent, les récepteurs regardaient directement l'objet sans nom et, après environ deux secondes seulement, commençaient à regarder l'objet en concurrence, ce qui les amenait, finalement, à le choisir pratiquement autant que l'objet sans nom dans la décision finale.

Cette différence entre ce qui arrive aux moments initiaux et finaux d'une interprétation laisse entendre que l'information sur ce qui est mutuellement connu, ou Common Ground, ne restreint pas immédiatement la compréhension, ni totalement, ni sur des critères de probabilité, mais que son effet est observé de façon postérieure.

Cet effet différé de l'information sur les états épistémiques du locuteur, comme cela a été rapporté par Keysar et ses collègues, peut être interprété comme preuve que, pour interpréter ce qu'un locuteur veut dire, c'est-à-dire pour inférer ses intentions communicatives, les récepteurs

utilisent des short cuts ou procédés heuristiques qui ignorent l'information (Gigerenzer et al., 2000). Notons que ces procédés heuristiques sont ancrés dans des attentes pragmatiques qui se développent probablement au cours de la vie à travers les interactions récurrentes avec d'autres interlocuteurs qui sont, comme presque tous les interlocuteurs, coopératifs, de la façon décrite par Grice (1975). Ceci expliquerait l'interprétation rapide d'une négation comme *l'objet qui n'a pas encore de nom*. Ce qui est intéressant est que cette interprétation pragmatique, ancrée dans des attentes de collaboration dans la conversation, n'est pas sensible au Common Ground, ne considérant pas les états épistémiques du locuteur présents dans l'interaction. Nous observerions donc le déploiement de procédés heuristiques d'inférence des intentions communicatives développés à travers une expérience avec des locuteurs compétents, c'est-à-dire hautement adaptatifs.

## Bibliographie

- Barr D. J. & Keysar B. (2002). Anchoring comprehension in linguistic precedents. *Journal of Memory and Language*, 46, 391-418.
- Brennan S. E. & Clark H. H. (1996). Conceptual pacts and lexical choice in conversation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, 22, 1482-1493.
- Brown-Schmidt S. (2009). Partner-specific interpretation of maintained referential precedents during interactive dialog. *Journal of Memory and Language*, 61, 171-190
- Clark H. H. & Carlson T. B. (1981). Context for comprehension. In J. Long & A. Baddeley (Eds.), *Attention and performance ix* (p. 313-330). Hillsdale N. J. : Erlbaum.
- Clark H. H. & Marshall C. R. (1981). Definite reference and mutual knowledge. In A. K. Joshe, B. L. Webber & I. A. Sag (Eds.), *Elements of discourse understanding* (p. 10-61). Cambridge : Cambridge University Press.
- Clark H. H. & Wilkes-Gibbs D. (1986). Referencing as a collaborative process. *Cognition*, 22, 1-39.
- Epley N., Keysar B., Boven L. V. & Gilovich T. (2004). Perspective taking as egocentric anchoring and adjustment. *Journal of Personality and Social Psychology*, 83, 327-339.

- Gigerenzer G., Todd P. M. & ABC Research Group the. (1999). Simple heuristics that makes us smart. U.K. : Oxford University Press.
- Grice H. P. (1957). Meaning. *The Philosophical Review*, 66, 377-388.
- Grice H. P. (1975). Logic and conversation. In S. Davis (Ed.), *Pragmatics: A reader* (p. 305-315). New York : Oxford University Press.
- Hanna J., Tanenhaus M. K. & Trueswell J. C. (2003). The effects of common ground and perspective on domains of referential interpretation. *Journal of Memory and Language*, 49, 43-61.
- Heller D., Tanenhaus M., Grodner D. (2008). The role of perspective taking in identifying domains of references. *Cognition* 108, 831-836.
- Keysar B., Barr D. J., Balin J. A. & Brauner J. S. (2000). Taking perspective in conversation: The role of mutual knowledge in comprehension. *Psychological Science*, 11, 32-38.
- Keysar B., Barr D. J., Balin J. A. & Paek T. S. (1998). Definite reference and mutual knowledge: Process models of common ground in comprehension. *Journal of Memory and Language*, 39, 1-20.
- Kronmüller E. (2008). Adaptation of the human language comprehension system to the global and local environments of a conversation. Unpublished doctoral dissertation.
- Kronmüller E. & Barr D. J. (2007). Perspective-free pragmatics: Broken precedents and the recovery-from-preemption hypothesis. *Journal of Memory and Language*, 56, 436-455.
- Kronmüller E., Noveck I., Krarzia M., Charafeddine R. (2011). A perspective-free interpretation of negation. Paper accepted to be presented in the Fourth Experimental Pragmatics Conference, Barcelona, June, 2011.
- Metzger C. & Brennan S. E. (2003). When conceptual pacts are broken: Partner-specific effects on the comprehension of referring expressions. *Journal of Memory and Language*, 49, 201-213.
- Pickering M. J. & Garrod S. (2004). Towards a mechanistic psychology of dialogue. *Behavioral and Brain Sciences*, 27, 169-225.
- Rumelhart D., McClelland and the PDP Group (1986). *Parallel Distributed Processing: Explorations in the microstructure of cognition*. Cambridge, MA : The MIT.
- Schegloff E. A. (2000). Overlapping talk and the organization of turn-taking for conversation. *Language in society*, 29, 1-63.
- Shannon & Weaver. (1949). *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, Urbana, IL.
- Simon H. A. (1956). Rational choice and the structure of the environment. *Psychological Review*, 63, 129-138.
- Stivers T., Enfield N., Brown P., Englert C., Hayashi M., Heinemann T., Hoymann G., Rosano F., De Ruiter J. P., Yoon K. & Levinson S. (2009). Universal and cultural variation in turn-taking in conversation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*, 106 (26).
- Strawson P. F. (1950). On referring. *Mind*, 59, 320-344.

### **The beginnings: the reconceptualization of “Communication”**

Today it is widely recognized among researchers that the conventional meaning of words is not enough to explain interpersonal communication, and that much more information is needed to interpret what a speaker wants to say. One traditional denomination to all this information that is needed besides conventional meaning is *context* or *paralinguistic information*. One of the first characterizations of contextual information already showed how complex and rich it is; for Strawson (1950), contextual information includes the place and time of the conversation, the identity of the speakers, the goals of the conversation, and the shared history among interlocutors. The distinction between *sentence* and *utterance* clearly shows the relevance of contextual information to communication. *Sentence* refers to a grammatical construction with lexical items combined according to certain rules. *Utterance* refers to a verbal expression of a speaker, in a particular context with particular goals related to the interaction with a particular addressee.

Once established the distinction between sentence and utterance, it became clear that some differentiation had to be made within the concept of meaning, in order to account for the sentence-utterance distinction. For this, Grice (1957) proposed two different notions of meaning: *sentence-meaning* and *speaker-meaning*. The first one



refers to the meaning of the sentences, and the second one, to the meaning of the utterances. For the sentence-meaning, conventionality and rules of composition are their main source of content. People can share sentence-meaning because they know (implicitly most of the time) the rules of their language and the conventional meaning of words. For the speaker-meaning, in contrast, the relevant content is to recognize what the speaker wants to say with a certain piece of communicative behavior. Because it implies recognition of others' intentions, the *inferential* character of communication appears as its distinctive nature: Communication is to *infer* the communicative intentions of others based on their behavior.

One important constraint to this inferential process is time: when we talk with others there are implicit timing rules that we follow. These timing rules are materialized in the turns we take, either to talk or to listen. There is some amount of time that passes when one interlocutor stops talking and the other starts talking. This is not a fixed amount, but it is distributed statistically as an unimodal distribution among many cultures in the world (Stivers et al., 2010). This timing of turns has been widely studied among conversational analysts, being considered a fundamental device for shaping conversations and scaffolding mutual understanding (Schegloff, 2000). Moreover, any deviation of the normative timing can be source of interpretation and further inference on communicative intentions, as our example above shows, where upon the question "Do you love me?", the addressee takes long time to answer, which can be interpreted as "no" or "I am not sure".

Another big constraint when articulating and interpreting an utterance is our own cognition. There are important computational limitations in human cognition for the processing of information. These limitations have been widely studied in cognitive sciences and furthermore, they are starting points for theories and models of cognition and behavior (Simon, 1956; Gigerenzer, Todd and the ABC Group, 2000). It is important to consider that these limitations are not only related to higher cognitive functions, like reasoning or memory, but also appear in lower cognitive functions, such as attention. Consequently, when interpreting an utterance, interlocutors have computational restrictions when

attending to communicative stimuli, retaining information in memory, and also inferring based on premises and new information.

If we characterize communication as a transmission of conventional meanings from a speaker to a listener, this is, as the transmission of a code, the task for any mechanistic explanation of communication would be to describe those processes of codification, transmission and reception, which is what some adaptations to conversation of an early theory of communication born within engineers and mathematicians did (Shannon, 1948; Shannon y Weaver, 1949). However, if communication among people is mainly *inferring* what a speaker wants to say, with time and computational limitations, then the task of any theory attempting to explain communication needs to account for how we infer mental states considering the massive amount of information and assuming our time and information processing limitations.

### Cognitive mechanisms for utterance interpretation

Conversational Psycholinguistics emerges in part from using theoretical models and methodological approaches that traditionally were used for text and reading research to the study of spoken language. Also, research on spoken language inherited from text comprehension research posed an important question: how is linguistic and non-linguistic information integrated in comprehension? As said above, a conversation can be characterized as an environment flooded by information potentially relevant for reaching mutual understanding, a fact that makes the problem of integration even more important. Two main approaches have emerged in this context to explain how information is integrated when inferring a speaker's communicative intentions, both grounded in previous discussion on how we process written text. In one approach, the information is sequentially integrated, such that a big portion of the information is ignored and only few informational cues are used as starting points for interpretation; the rest is used in later stages to complement the interpretation or look for misunderstanding or conflicts. In the other method, in turn, all information is integrated in parallel in the form of constraints for interpretation. Key to this method is the idea that competition between

multiple interpretations, where informational cues probabilistically activate more than one interpretation and these interpretations compete for activation, is an iterative process.

Following the idea that mutual understanding necessarily implies inferring the mental states of the interlocutor, specifically, *what the speaker wants to say*, research on conversational psycholinguistics started focusing on the questions of how and when information shared among interlocutors is integrated on comprehension.

One early account explaining how mutual understanding is reached was based on the idea of *Common Ground* (Clark & Marshall, 1981). Common Ground is a knowledge structure that interlocutors infer that they shared, and that would constitute the intrinsic context for comprehension. As such, it would be a *sine qua non* condition for mutual understanding; without it, real communication would be impossible. To give an example of how this would work, imagine two friends that have recently seen a movie together and refer to it as precisely *the movie*. If some days after, these two friends meet and one of them say "I have been thinking about the movie", following Clark and Colleagues, the listener would consider the movie they were talking about some days before as referent, because this movie is in Common Ground between the two friends. The idea is appealing because it captures the main intuition that communicating is inferring what a speaker wants to say, and for this is of main importance to consider what the speaker knows and doesn't, and what part of this is shared knowledge. Of course, nobody could refer to something he or she doesn't know exist.

This pioneer and influential idea was not supported by empirical evidence, at least its more radical version where listeners totally restrict their comprehension options to common ground. Keysar and Colleagues (Keysar et al. 1998; Keysar et al. 2000) showed that in many occasions listeners temporarily consider as potential referents for definite reference expressions (e.g. *the movie*), referents that the speaker doesn't know, therefore, cannot refer to them. For example, when hearing "I have been thinking about the movie", the friend listener can interpret it as referring to the movie he saw last night, and that his friend speaker doesn't know he saw, which makes it an impossible referent for the point of

view of the speaker: that movie was not shared knowledge, was not in Common Ground. Based on this evidence, Keysar and Colleagues proposed that Common Ground, as a knowledge structure, was integrated to the interpretation of an utterance by a comprehension monitoring process and in case of potential misunderstandings, but in no case as restricting comprehension for the very beginning, as postulates the more radical version of the hypothesis. Listeners, then, would initially build an *egocentric* interpretation, this is, an interpretation that does not consider the epistemic states of the speaker. Once this interpretation is generated, a monitoring process would check for potential misunderstandings. It is precisely in this monitoring process that Common Ground would have an important role. Following our example, after the first interpretation of "the movie" as the movie the listener saw last night (the movie the speaker is not aware of), the monitoring process would repair and reconstruct an interpretation of "the movie" as the movie both friends saw together some days ago, and that both, of course, know they saw together. This solution is a two processes account were late effects of Common Ground are explained because it is a "heavy" knowledge structure that would involve more processing, and this complexity would take more time: this is, not necessarily the early egocentric interpretation and the late monitoring process are deployed serially, but they would have a different timings for their outputs (Keysar et al. 1998).

Keysar's proposal was substantially modified by Hanna, Tanenhaus & Trueswell (2003). Consistent with Keysar's results, they proposed that Common Ground doesn't totally restrict comprehension but only constrains it probabilistically. Interestingly, Common Ground could be integrated and have influence on comprehension in the very beginning not in later stages, as proposed before. In this sense, Common Ground would be like any other contextual constraint, in which its strength in influencing comprehension would depend on its strength, mainly by association or residual activation. For example, given that Peter just saw a movie, the strength of the relation between the lexical item *movie* and the movie recently seen only by Peter is greater than the strength of the relation between the lexical item *movie* and the movie Peter and his friend

saw a couple of days ago. It is this differential strength in favor of the recent movie – not in Common Ground – that explains the *egocentric interpretation*, and not the lack of influence of Common Ground information. Mechanistically, the comprehension system would work as a constraint satisfaction system, and be implemented as a localist network, in the line of some models proposed in the connectionist literature (McClelland, Rumelhart, and the PDP group, 1986).

It is an ongoing debate whether the integration of linguistic information and information about the interlocutor, e.g. Common Ground, is better explained by a unique constraint satisfaction system or multiple processes: there is evidence for immediate effects of common ground (Metzing & Brennan, 2002; Heller et al, 2008; Brown-Schmidt, 2009), or late effects (Kronmüller & Barr, 2007; Barr, 2008).

### Indirect Reference: Referring to an object by negating another object

Trying to add new evidence to the debate, Kronmüller, Noveck, Krarzia & Charaffedine (in preparation), tested the case where the reference to an object is made indirectly, without using a name or description that can be identified directly with the object. For example, to refer to a person as “not the one with the red shirt”. The rationale to test this type of reference act is to produce a situation in which the interpretation of a referring expression is reached only based on contextual information, without relying on referential fit or the conventional meaning of words. This might be important because it eliminates these bottom-up influences on comprehension that motivated part of the past debate (Keysar et al, 2000; Hanna et al, 2003).

In the experiment, a speaker gave instructions to a listener to select an object from an array of objects. In the test cases, the speaker referred to an object by negating that the intended referent was one of the objects in the array that was previously named. For example, the speaker said “select the object that is not the black vase”, in a context in which there were three objects: a *negated object*, that had been named before twice as the black vase; an *unmentioned object*, that was present before but never mentioned (a nameless object); and a *competitor object*, that depending on the experimental condition either had been named before as *the futuristic building*, or had not

been named (like the other nameless object). The objects used in the experiment were strange objects that lacked a conventional name in French (and probably in other languages too). The use of objects without conventional names is a common practice in research seeking to understand the role of Common Ground in communication (Clark & Wilkes-Gibbs, 1986, Brennan & Clark, 1996, Barr & Keysar, 2002, Metzing & Brennan, 2003), because the only way in which communication can succeed is by generating idiosyncratic names to refer to them (like calling a string bell shaped object a *black vase*). Regarding the speakers, in this experiment they were confederates, that is, research assistants that act following a script and convinced the real participant, the listener, that they were naive participants too, and that their behavior was spontaneous. Only one of the speakers was present and interacted with the participant, the live speaker. The other speaker, the virtual speaker, recorded the instructions that were administered to the listener through headphones. Finally, and most importantly, the live speaker and the listener faced their own screens without seeing each other’s and the participants were made to believe that the live speaker could only see two of the three objects they were seeing, and that the speaker believed the listener was also seeing two. Thus, from the point of view of the speaker, saying “select the object that is not the black vase” was totally cooperative because the intended referent would be only the other object in the screen besides the black vase.

In general, in the cases where the competitor object was named before as *the futuristic building*, listeners selected the *unmentioned object* as the referent the speaker intended with the utterance “the object that is not the black vase”. In turn, when the *competitor object* was not named before (remaining a nameless object), listeners indistinctly selected the *competitor* and the *unmentioned object*. This behavior is consistent with the listeners’ pragmatic expectation that speakers are consistent and generate their conversational contributions in order to minimize misunderstandings (Grice, 1975). Thus, a listener expects that if speakers already gave a name to an object, they would use that expression to refer to that object again, and not use a different and complex expression involving negation. Then, when hearing a new complex expression, the listener

would infer that the object intended is one that has not been named yet, and select based on this inference.

Interestingly, when the competitor object was named by the virtual speaker that wasn't present in the room during the experimental session but the instructions had only been given to the listeners through headphones (that is, the live speaker never knew what object the virtual speaker asked the listener to move, nor what name this virtual speaker used), listeners selected equally the *unmentioned* and the *competitor objects*, as if this last object had never been mentioned. This shows that listeners do make their final interpretations taking into account what is mutually known with their partner. Indeed, from the perspective of the live speaker, the competitor objects remains still a nameless object, because he did not had access to the name the virtual speaker gave to it.

Important to the question of the timing of the integration of different sources of information when interpreting an utterance is the time course of the interpretation. Thus, it is important to access the interpretation process as it unfolds, and not merely the output of it. As previous research did, we tracked the participants' eye movements while they followed the instructions of the live speaker. This allowed us to observe the early and late referential choices *during* the interpretation process. We observed that in the cases in which the competitor object didn't have a name, the listener looked initially at the competitor and the unmentioned object at the same rate. This pattern appears during the moments in which they hear the referential expression, and are in line with their final referential decisions, e.g. selecting either object. The early moments of the interpretation of the utterance when the competitor object had a name given by the live speaker also reflect their final decision: they immediately looked to the unmentioned object not looking at the competitor. Interestingly, when the virtual speaker gave the name to the competitor, and the live speaker didn't know it, the final decision of listeners was quite different than their initial referential commitments:

like the case where the live speaker gave a name to the competitor object, listeners looked directly at the unmentioned object, and only after two second, did they start looking at the competitor object, maybe upon realizing that, from the point of view of the live speaker, that object was also unmentioned and thus a potential referent for the expression "not the black vase". It is this last choice that reflects their final decisions evident in their selection, and not the early moments revealed by the eye-tracker. This discrepancy between what happens in the early moments of comprehension and the final referential decision suggests that the epistemic states of the speaker, specifically shared knowledge in the form of Common Ground, doesn't restrict interpretation immediately, nor probabilistically, but only in a later stage during the inferential process.

This late effect of the information about the epistemic states of the speaker, as reported previously by Keysar and Colleagues, can be interpreted as evidence for the idea that when interpreting communicative behavior from a speaker, listeners can use heuristics that help them coping with a complex environment full of information. Fundamentally, these heuristics ignore information, and sequentially integrate potentially ignored informational cues when necessary. The idea of simple heuristics using some information sequentially in order to make inferences and decisions is widespread in the context of rationality and inference making research (Gigerenzer, ABC Group, 2000). What is interesting in the obtained results is that some of these heuristics are anchored in our pragmatic expectations, not necessarily of one particular speaker, but of general expectations for language use, developed through many interactions with cooperative speakers (Grice, 1975). These general expectations would explain the fast interpretation of the expression using negation as: *the object that doesn't have a name yet*. It is, then, a pragmatic expectation not specific to a speaker, nor to the Common Ground information, because it is independent of the consideration of epistemic states of the interlocutor.

# La transparence orthographique influence le développement de l'attention visuelle : Le cas du bilinguisme gallois-anglais

Marie LALLIER

## Résumé

Nous supposons que les lecteurs d'une langue opaque telle que l'anglais favorisent une prise d'information visuelle de taille maximale durant la lecture de stimuli orthographiques non familiers afin de compenser l'irrégularité des correspondances orthographe-phonologie des petites unités telles que de graphème à phonème. Nous montrons que 14 bilingues ayant appris à lire simultanément dans deux langues différant par leur transparence orthographique (gallois, transparente, et anglais, opaque) présentent plus de difficultés à traiter simultanément l'information orthographique dans son ensemble, par rapport à 14 adultes monolingues anglais. Ainsi, nous montrons que les bilingues ayant appris à lire dans une langue transparente en plus d'une langue opaque utilisent différemment leurs capacités visuo-attentionnelles pour traiter des séquences orthographiques non familières.

## Mots clés

Bilinguisme, décodage, transparence orthographique, attention visuelle

## Orthographic transparency shapes visual attention underlying orthographic encoding: The case of Welsh-English bilingualism

### Abstract

We hypothesized that readers of an opaque language like English preferentially use a maximal visual capture whilst processing non familiar orthographic stimuli in order to compensate for the irregularity of grapheme-to-phoneme conversion rules. We show that 14 bilingual adults who learnt to read simultaneously in two languages differing regarding their orthographic transparency (Welsh, transparent, and English, opaque) exhibit more difficulties to process orthographic information as a whole compared to 14 English monolingual adults. Thus, we show that bilinguals who learnt to read in a transparent language in addition to an opaque language differ in their visual attention skills devoted to non familiar orthographic sequences.

### Keywords

Bilingualism, decoding, orthographic transparency, visual attention

## 1. Introduction

Identifier les facteurs cognitifs génériques qui sous-tendent l'apprentissage de la lecture normale et pathologique est une aire de recherche active. En particulier, la transparence orthographique est supposée affecter l'apprentissage de la lecture (e.g., Seymour et al. 2003) puisque les langues transparentes (e.g., gallois) présentent des relations entre graphèmes et phonèmes hautement consistantes, alors que les langues opaques (e.g., anglais) présentent de multiples correspondances entre une lettre donnée et un son

donné. Plusieurs cadres théoriques ont tenté de rendre compte de l'impact de la transparence orthographique sur l'acquisition de la lecture (e.g., Frost, 1994). Parmi eux, la théorie de la taille du grain psycholinguistique (« psycholinguistic grain size theory », PGST par la suite) propose que la taille des unités sur lesquelles les représentations lexicales se développent est inversement proportionnelle à la régularité des correspondances graphème-phonème de la langue (Ziegler et Goswami, 2005). Dans les langues transparentes, la régularité phonologique carac-

térise des petites unités orthographiques et encourage des stratégies de décodage sous-lexicales. Au contraire, dans les langues opaques, seulement de larges unités orthographiques (e.g., groupes graphémiques, syllabes ou morphèmes), qui sont phonologiquement plus régulières que des unités de petites tailles, sont disponibles, favorisant un traitement d'ordre lexical/mot entier.

Il est intéressant de noter que le système cognitif visuel responsable de l'encodage des chaînes de caractères, tel que celui sous-tendant l'encodage de la position des lettres, pourrait s'ajuster selon ces variations de tailles des unités orthographiques traitées. En effet, Ktori et Pitchford (2009) ont évalué les performances chez des monolingues grecs (langue transparente), des bilingues grec-anglais, et des monolingues anglais, dans une tâche de recherche de lettre dans une chaîne de 5 caractères imprononçables. Pour les stimuli présents dans les langues maternelles (i.e., lettres grecques pour les groupes grecs et anglaises pour les groupes anglais), la modulation des temps de réaction dans la recherche de la lettre cible dépendait de la position des cibles dans la chaîne de caractères, suggérant que la performance des groupes suivait un continuum de stratégies de recherche (i.e., de stratégie sous-lexicale gauche-droite à stratégie lexicale type « chaîne entière ») parallèle à un continuum de transparence orthographique des langues (i.e., du monolinguisme grec [transparent] au monolinguisme anglais [opaque] en passant par le bilinguisme grec-anglais). Au-delà de l'encodage de la position, Bosse et al. (2007) ont suggéré qu'il était nécessaire de pouvoir distribuer de façon homogène son attention visuelle sur de multiples caractères, et cela simultanément, afin d'extraire de façon adéquate l'information orthographique lexicale. Ces mêmes auteurs ont proposé la notion d'empan visuo-attentionnel (EVA par la suite) pour rendre compte de ces compétences, qui est définie comme le nombre d'éléments visuels distincts qui peuvent être traités simultanément (i.e., en une fixation oculaire) à l'intérieur d'une chaîne de caractères.

Ici, nous supposons que l'importance de l'EVA dans la lecture puisse être influencée par la régularité orthographique puisque l'EVA contribue plus à la lecture de mots (stratégie « large grain ») que de pseudo-mots (stratégie « petit » grain)

(Bosse et Valdois, 2009). Ainsi, apprendre à lire dans une langue plus transparente pourrait entraîner un traitement des chaînes de caractères avec une plus petite fenêtre visuo-attentionnelle. Nous cherchons à voir si les compétences d'EVA, mesurées via l'encodage de la position des lettres dans une chaîne de lettres, sont affectées par des interactions entre des stratégies « petit » *versus* « large » grain encouragées respectivement par l'apprentissage simultané d'une langue transparente (gallois) et une langue opaque (anglais). Nous prédisons que la taille de l'EVA sera réduite pour les bilingues gallois-anglais par rapport aux monolingues anglais puisqu'apprendre à lire dans une langue opaque seulement encouragerait le traitement d'unités larges et par conséquent, l'augmentation des ressources visuo-attentionnelles simultanées nécessaires pour le décodage d'items nouveaux (i.e., l'EVA).

## 2. Matériel et méthode

**2.1 Participants :** 14 adultes bilingues gallois-anglais (4 hommes, 24 ans en moyenne) appariés sur l'âge ( $p > .05$ ) avec 14 monolingues anglais (5 hommes, 19 ans et demi en moyenne) ont participé à notre étude. Tous avaient une vision normale ou corrigée, pas de troubles neurologiques, de dyslexie développementale ou de légères difficultés en lecture. Le groupe bilingue se caractérisait par un apprentissage précoce et simultané des langues anglaise et galloise, du point de vue de la langue orale et de la langue écrite (i.e., lecture et écriture).

### 2.2 Évaluation de l'EVA : l'encodage de la position des lettres

**2.2.1 Stimuli :** Une liste de 216 noms communs anglais singuliers, constitués de 5 lettres, familiers et concrets, a été créée. De plus, une liste de 216 chaînes de 5 consonnes (non-mots par la suite) a été créée avec 14 consonnes (i.e., B, C, D, F, G, H, K, L, M, N, P, R, S, T, et V) apparaissant 14 ou 15 fois dans chacune des cinq positions possibles. Les non-mots n'incluaient pas de groupes consonantiques correspondant à des phonèmes anglais ou gallois (e.g., CH) et ne représentaient pas de squelettes de mots anglais ou gallois (e.g., C M P T R pour « computer »). Les stimuli n'incluaient pas la même lettre deux fois et ont été créés selon les tâches de report global et partiel utilisées précédemment pour mesurer l'EVA (e.g., Bosse et al., 2007). Les chaînes de lettres étaient présentées sur un écran blanc, en

majuscules noires avec la police Arial. La longueur des chaînes variait de  $5.3^\circ$  à  $5.55^\circ$  d'angle visuel à une distance de 60 cm. La distance centre-à-centre entre chaque lettre adjacente était de  $1.2^\circ$  afin de minimiser les effets de masquage latéral. Pour réduire la similarité visuelle entre les lettres dans les chaînes, la lettre cible était présentée en rouge, italique et gras.

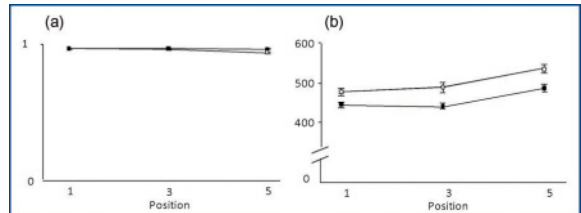
**2.2.2 Procédure :** Les participants étaient testés dans une chambre calme et légèrement éclairée. Au début de chaque essai, un point de fixation central était présenté pendant 1 000 ms, suivi par la chaîne de 5 lettres au centre de l'écran (amorces). Après 180 ms, les amorces étaient suivies d'un masque (cinq flocons de neige) pendant 100 ms, et ensuite, par une lettre au centre de l'écran (cible). Les participants devaient appuyer sur la barre d'espace aussi vite que possible quand la lettre cible était présente dans l'amorce (essai « go ») et ne pas répondre dans le cas contraire (essai « no-go »). Les participants savaient que les amorces seraient soit des mots anglais, soit des chaînes de consonnes. Pour les essais « go », la cible pouvait être soit la 1<sup>re</sup>, 3<sup>e</sup> ou 5<sup>e</sup> lettre dans l'amorce. La cible disparaissait après pression de la barre d'espace et après 2 000 ms dans le cas d'une non-réponse. Cinquante-quatre essais « no-go » et 54 essais « go » par condition étaient présentés aléatoirement.

**2.2.3. Analyses des données :** Les analyses ont été conduites séparément pour les mots et les non-mots puisque les mots étaient destinés à contrôler le niveau de lecture en anglais, et ne mesuraient pas les compétences d'EVA. Les temps de réaction (TR) et la précision des réponses pour les essais « go » ont été recueillis et traités en utilisant des analyses de variance (ANOVAs) avec le groupe en facteur inter-sujet (bilingue, monolingue) et la position (1, 3, 5) en facteur intra-sujet.

### 3. Résultats

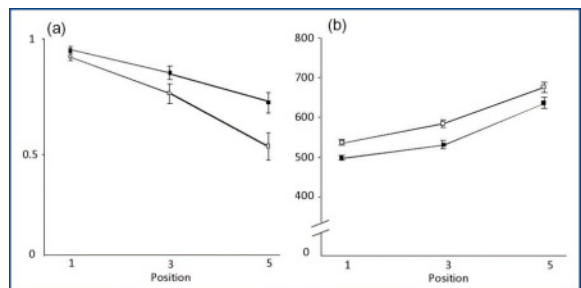
Pour les amorces mots (condition contrôle), aucun effet du groupe ou de la position n'a été obtenu sur la précision de détection de la lettre cible (pour tous les  $F$ s < 1, ps > .2), reflétant un effet plafond sur la performance (Fig. 1.a). Concernant les TRs, un effet du groupe a montré que les bilingues étaient plus lents pour détecter les cibles présentes dans les mots que les monolingues ( $F(1,26) = 10.1$ ,  $p < .01$ ), comme l'illustre le délai consistant trouvé pour toutes les positions

( $43 \text{ ms} \pm 7$ ). Un effet de position a aussi été révélé sur les TRs ( $F(2,52) = 126$ ,  $p < .001$ ) reflétant de plus longs TRs pour les cibles présentées à la position 5 dans les amorces mots comparés aux positions 1 et 3 (post-hoc tests, ps < .001). Enfin, aucune interaction groupe\*position n'a été observée sur les TRs ( $F(2,52) = 3.2$ ,  $p > .05$ ) (Fig. 1.b).



**Figure 1 :** Précision (a) et TR en ms (b) pour la détection de la lettre cible chez les monolingues (carrés noirs) et les bilingues (carrés blancs) pour les amorces mots (condition contrôle). Les barres d'erreur standard sont présentées.

Pour les amorces non-mots (condition EVA), la précision de détection de la lettre cible a différé significativement entre les groupes ( $F(1,26) = 7.1$ ,  $p < .05$ ) et a été modulée significativement par la position de la cible dans les amorces ( $F(2,52) = 40$ ,  $p < .001$ ; post-hocs, tous les ps < .001). Une tendance concernant l'interaction groupe\*position a été révélée ( $F(2,52) = 2.8$ ,  $p = .07$ ), illustrant que la précision de détection de cible était plus fortement modulée chez les bilingues (comparaisons planifiées avec correction de alpha = .008 pour 6 comparaisons : position 1 vs. 3,  $p = .0001$  ; 1 vs. 5,  $p < .0001$  ; et 3 vs. 5,  $p = .0004$ ) que chez les monolingues (1 vs. 5,  $p = .0007$  ; pour les autres contrastes, ps > .01, n.s.) (Fig. 2.a).



**Figure 2 :** Précision (a) et TR en ms (b) pour la détection de la lettre cible chez les monolingues (carrés noirs) et les bilingues (carrés blancs) pour les amorces non-mots (condition EVA). Les barres d'erreur standard sont présentées.

Les analyses sur les TRs pour la condition EVA (non-mots) ont montré que les bilingues étaient significativement plus lents pour détecter les cibles précédemment présentées dans les non-mots que les monolingues ( $F(1,26) = 6.8, p < .05$ ), comme l'illustre le délai consistant trouvé pour toutes les positions ( $44 \text{ ms} \pm 7$ ). Une détection de cible graduellement plus lente de la position 1 à 5 a aussi été observée ( $F(2,52) = 141.4, p < .001$  ; pour tous les post-hocs,  $ps < .001$ ), et cela d'amplitude identique pour les deux groupes ( $F < 1, p > .05$ ) (Fig. 2.b).

#### 4. Discussion

Dans cette étude, nous cherchions à montrer un effet de la transparence orthographique sur les compétences visuo-attentionnelles simultanées (EVA) impliquées dans l'encodage de chaînes de lettres, chez des bilingues ayant appris simultanément le gallois et l'anglais, et des monolingues anglais. Nos résultats fournissent des preuves solides par rapport aux études inter-langues précédentes, appuyant l'hypothèse selon laquelle la transparence orthographique influence le développement des ressources cognitives nécessaires à l'apprentissage de la lecture. En effet, cette expérience a été conduite chez des bilingues adultes qui ont appris à lire simultanément dans les deux langues et cela de façon très précoce. Au pays de Galles en particulier, les écoles fournissent des enseignements en gallois et anglais avec les mêmes méthodes. L'étude de telles populations bilingues permet donc de contrôler des facteurs recouvrant des aspects méthodologiques culturels et environnementaux à l'inverse des précédentes études inter-langues.

Nous avons donc montré que les performances de détection des lettres cible ont été plus affectées chez les bilingues que chez les monolingues. Ces différences inter-groupes concernant l'effet de position n'ont été trouvées que pour la condition EVA (amorces non-mots) étant critique pour évaluer des différences de stratégies concernant le décodage de nouvelles séquences de lettres. Ce résultat peut être interprété dans le cadre du modèle multitrace de lecture de mots polysyllabiques proposé par Ans et al. (1998 ; par la suite MTM). Une composante clé de ce modèle est la fenêtre visuo-attentionnelle par laquelle l'information contenue dans l'entrée orthographique est extraite, et qui correspond à l'EVA chez les sujets humains. Le modèle MTM postule que lire

requiert à la fois une procédure globale et une procédure sérielle, différant par la taille de la fenêtre attentionnelle et donc de l'EVA. En mode de lecture globale, la fenêtre s'ouvre sur la chaîne de lettres en entier alors qu'en mode de lecture sérielle, la fenêtre se rétrécit afin de focaliser l'attention sur des sous-unités de l'entrée successivement. Bien que les deux procédures ne soient *a priori* pas dédiées pour la lecture d'un type d'item, la plupart des mots familiers sont traités avec la procédure globale alors que les mots non familiers sont traités de façon sérielle. L'absence d'effet de la position sur la précision pour la condition contrôle (amorces mots) suggère que les mots ont été traités en mode global pour les deux groupes, i.e., que les deux groupes sont équivalents en niveau de lecture en anglais. Cependant, concernant les TRs, une constante augmentation, elle-même fonction de la position de la lettre cible dans l'amorce (pour les non-mots mais aussi pour les mots), suggère un mode sériel d'encodage pour les deux types d'amorces (see Pitchford et al., 2008 ; Whitney, 2001). Bien que cet effet obtenu pour les mots soit en contradiction avec les prédictions du modèle MTM, il peut être expliqué par le mélange des mots et non-mots dans un même bloc expérimental dans notre étude. Par ailleurs, cet effet étant similaire dans les deux groupes, nous suggérons que la condition contrôle (amorces mots) n'était pas plus difficile pour les bilingues que les monolingues, excluant une absence d'automatisation de la lecture en anglais chez les bilingues.

Pour la condition EVA (amorces non-mots), l'effet de la position plus important concernant la précision de détection des lettres cible (i.e., tous les contrastes entre les positions significatifs chez les bilingues *versus* seulement un chez les monolingues) suggère que lorsqu'on leur présente une chaîne de lettres non familières, les bilingues gallois-anglais réduisent la taille de l'EVA selon un degré plus important que ne le font les monolingues anglais. Cela est consistant avec les prédictions du modèle MTM selon lequel le mode de lecture global échoue lorsque le système doit traiter des items non familiers, entraînant alors une réduction de la taille de la fenêtre visuo-attentionnelle (i.e., de l'EVA). Cette différence entre nos groupes est aussi consistante avec l'hypothèse d'un ajustement différent des compétences visuo-attentionnelles sous-tendant l'encodage de chaînes de lettres. Nous proposons



que la réduction de l'EVA plus grande chez les bilingues puisse résulter de l'acquisition de la lecture dans une langue transparente parallèlement à une langue opaque.

Enfin, notons que les TRs étaient globalement plus longs chez les bilingues que chez les monolingues. Ce résultat fait écho aux conclusions de certaines études s'intéressant au traitement lexical chez les bilingues (e.g., Simon et al. 2006). Ces résultats pourraient être expliqués par un phénomène d'interférence dû à l'activation simultanée de deux lexiques. En effet, l'accès aux chaînes de lettres se réaliserait d'une façon différente entre les bilingues et les monolingues à cause de la co-activation spontanée des formes lexicales des langues 1 et 2 chez les sujets maîtrisant deux langues (Thierry et Wu, 2007).

En conclusion, les résultats de notre étude sur la condition EVA en particulier (amorces non-mots) suggèrent que les ressources de traitement sous-tendant l'encodage de la position dans une chaîne de lettres non familières s'adaptent selon le degré de transparence orthographique de(s) la langue(s) apprise(s). C'est pourquoi, il apparaît nécessaire de prendre en compte ses(leurs) propres caractéristiques pour la mise en place de méthodes d'apprentissage de la lecture ainsi que pour le diagnostique et la rééducation des troubles du langage écrit dans un contexte non seulement monolingue, mais également bilingue.

## Bibliographie

- Ans B., Carbonnel S., and Valdois S. (1998). A connectionist multiple-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychological Review*, 105(4), 678-723.
- Bosse M. L., Tainturier M. J., and Valdois S. (2007). Developmental dyslexia: the visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104(2), 198-230.
- Coltheart M., Rastle K., Perry C., Langdon R., and Ziegler J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108(1), 204-256.
- Frost R. (1994). Prelexical and postlexical strategies in reading: Evidence from a deep and a shallow orthography. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 20(1), 116-129.

- Ktori M. and Pitchford N.J. (2008). Effect of orthographic transparency on letter position encoding: A comparison of Greek and English monoscriptal and biscriptal readers. *Language and Cognitive Processes*, 23, 258-281.

- Pitchford N. J., Ledgeway T., and Master-son J. (2008). Effect of orthographic processes on letter position encoding. *Journal of Research in Reading*, 31, 97-116.

- Seymour P. H. K., Aro M., and Erksine J. M. (2003). Foundation literacy acquisition in European orthographies. *British Journal of Psychology*, 94, 143-174.

- Simon G., Bernard C., Lalonde B., and Rebai M. (2006). Orthographic transparency and grapheme-phoneme conversion: An ERP study in Arabic and French readers. *Brain Research*, 1104, 141-152.

- Thierry G., and Wu Y. J. (2007). Brain potentials reveal unconscious translation during foreign-language comprehension. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 12530-12535.

- Whitney C. (2001). How the brain codes the order of letters in a printed word: The SERIOL model and selective literature review. *Psychonomic Bulletin and Review*, 8, 221-243.

- Ziegler J. C., and Goswami U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: a psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin*, 131 (1), 3-29.

## 1. Introduction

Identifying the generic cognitive factors subtending typical and atypical reading acquisition is an active field of research. In particular, orthographic transparency is supposed to affect reading acquisition (e.g., Seymour et al. 2003), since transparent languages (e.g., Welsh) present relations between graphemes and phonemes highly consistent, whereas opaque languages (e.g., English) present multiple correspondences between a given letter and sound. Several theoretical frameworks have attempted to account for the impact of orthographic transparency on reading acquisition (e.g., Frost, 1994). Among them, the psycholinguistic grain size theory, (PGST hereafter) proposes that the size of units upon which lexical representations develop is inver-

sely proportional to the grapheme-to-phoneme correspondences of a given language (Ziegler and Goswami, 2005). In transparent languages, phonological regularity characterizes small orthographic units and encourages sub-lexical decoding strategies. On the contrary, in opaque languages, only large orthographic units (e.g., grapheme clusters, syllables or morphemes), which are phonologically more regular than small units, are available, favoring a lexical/whole word processing.

Interestingly, the cognitive system in charge of string encoding, such as the one responsible for letter position encoding, could adjust depending on the size variations of orthographic units being processed. Ktori and Pitchford (2009) assessed the performance of Greek (transparent) monolinguals, Greek-English bilinguals, and English monolinguals, in visual search task within 5-letter non pronounceable strings. For the stimuli existing in the mother tongue of participants (i.e., Greek letters for the Greek groups and English letters for the English groups), reaction times were modulated depending on the target letter position in strings, showing that groups performance followed a search strategy continuum (i.e., from left-to right sub-lexical strategies, to lexical strategy “whole string” like), going along with an orthographic transparency continuum (i.e., from Greek [transparent] monolingualism, through English [opaque] monolingualism, to Greek-English bilingualism). Beyond position encoding, Bosse et al. (2007) suggested that distributing homogeneously and simultaneously visual attention resources over a multi-element array is required in order to extract its lexical information. The same authors proposed the notion of visual attention span (VAS hereafter) to account for such skills. The VAS is defined as the number of distinct visual elements that can be processed simultaneously (in one ocular fixation) in a multi-element array.

Here, we suppose that the importance of VAS skills in reading may be influenced by orthographic transparency since VAS skills contribute preferentially to word (large grain strategy) than pseudo word (small grain strategy) reading (Bosse et Valdois, 2009). Thus, learning to read in a transparent language could lead to process orthographic strings with a smaller visual attention window/grain size.

We want to determine whether VAS skills, measured via letter position encoding in a multi-element array, are affected by interactions occurring between “small” and “large” grain strategies, favored by the simultaneous reading acquisition of a transparent (Welsh) and an opaque (English) language respectively. We predict that VAS size will be reduced for Welsh-English bilinguals as compared to English monolinguals, since learning to read in an opaque language only should favor large units processing, and therefore, the increase of simultaneous visual attention skills necessary for the decoding of new items (i.e., VAS).

## 2. Materials and method

### 2.1 Participants

Fourteen Welsh-English bilingual adults (4 males, 24 years old in average), matched for age ( $p > .05$ ) with 14 English monolingual adults (5 males, 19.5 years old in average) took part in the study. All presented normal or corrected vision and did not present any neurological impairments, nor developmental dyslexia or reading difficulties. The bilingual group had learnt to read and write simultaneously in both Welsh and English at an early age (5 or 6 years old).

### 2.2 VAS assessment: letter position encoding

#### 2.2.1 Stimuli

A list of 216 English singular and concrete nouns was created. Moreover, a list of 216 strings of five consonants (nonwords hereafter) was created based upon 14 consonants (i.e., B, C, D, F, G, H, K, L, M, N P, R, S, T, and V) displayed 14 or 15 times each at the five possible positions in the string. Nonwords did not include consonant groups corresponding to English or Welsh phonemes (e.g., CH) and did not represent skeletons of English or Welsh words (e.g., “C M P T R” for “computer”). Stimuli did not include the same letter twice and have been designed according to the global and partial report tasks previously used to measure VAS skills (e.g., Bosse et al., 2007). Consonant strings were displayed on a white screen, upper case with black Arial font. Stimuli length varied from  $5.3^\circ$  to  $5.55^\circ$  of visual angle from a distance of 60 cm. The centre-to-centre distance between each letter was  $1.2^\circ$  in order to minimize lateral masking effects. To reduce visual similarity between the target letter

and the letters in the strings, the target letter was red with italic and bold Arial font features.

### 2.2.2 Procedure

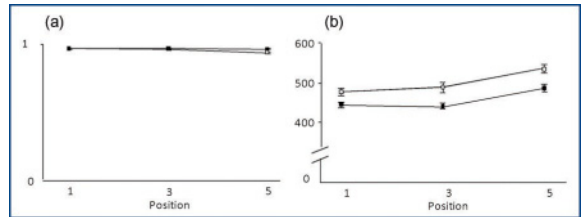
Participants were tested in a quiet dim lit room. Each trial started with a central fixation point, presented for 1000ms, followed by the string presented centrally (primes). After 180ms, primes were followed by a mask (5 snowflakes) for 100ms, and then, by a single letter at the center of the screen (target). Participants were instructed to press the space bar as fast as they could when the target letter was present in the prime ("go" trials) and to not respond when otherwise ("no go" trials). Participants knew that primes would either be English words or consonant strings. For the "go" trials. The target could be located either at the 1<sup>st</sup>, the 3<sup>rd</sup> or the 5<sup>th</sup> position in primes and disappeared after the space bar was pressed and after 2000ms in the case of no answer. Fifty-four "no go" trials and 54 "go" trials per condition were randomly presented.

### 2.2.3. Data analysis

Analyses were separately conducted for words and nonwords since words were aimed at controlling the English reading level of participants, and did not assess their VAS abilities. Reaction times (RTs) and accuracy for the "go" trials were collected and analyzed by means of analyses of variance (ANOVAs) with group (bilingual, monolingual) as a between-subject factor and position (1,3,5) as within-subject factor.

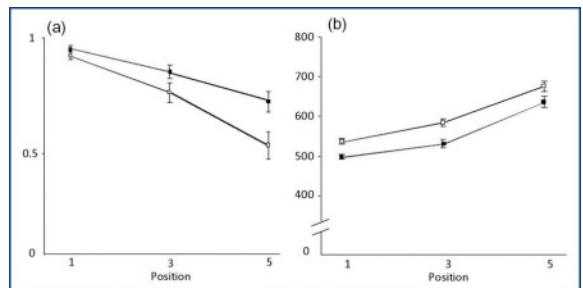
## 3. Results

For word primes (control condition), no group or position effect was found on target detection accuracy (for all  $F$ s < 1,  $p$ s > .2) reflecting a ceiling effect on performance (Fig. 1.a). Regarding RTs, a group effect showed that bilinguals were slower at detecting targets present in words than monolinguals ( $F(1,26) = 10.1$ ,  $p < .01$ ), illustrated by a consistent delay for the three positions ( $43 \text{ ms} \pm 7$ ). A position main effect was also found on RTs ( $F(2,52) = 126$ ,  $p < .001$ ), reflecting longer RTs for targets presented at the 5<sup>th</sup> position in word primes than at the 1<sup>st</sup> and the 3<sup>rd</sup> positions (post-hoc tests,  $p$ s < .001). Lastly, no group\*position interaction was observed on RTs ( $F(2,52) = 3.2$ ,  $p > .05$ ) (Fig. 1.b).



**Figure 1 :** Precision (a) and TR ms (b) for the detection of the target letter to the monolingual (squared blacks) and the bilingual (square whites) for words primes (control condition). The bars of standard error are presented

For nonword primes (VAS condition), target detection accuracy significantly differed between groups ( $F(1,26) = 7.1$ ,  $p < .05$ ) and was modulated by target position in primes ( $F(2,52) = 40$ ,  $p < .001$ ; post-hoc tests, all  $p$ s < .001). The group\*position interaction tended to reach significance ( $F(2,52) = 2.8$ ,  $p = .07$ ), illustrating that target detection accuracy was more strongly modulated in bilinguals (*a priori* contrasts with alpha correction set at .008 for six comparisons: position 1 vs. 3,  $p = .0001$ ; 1 vs. 5,  $p < .0001$ ; et 3 vs. 5,  $p = .0004$ ) than in monolinguals (1 vs 5,  $p = .0007$ ; for the other contrasts,  $p$ s > .01, n.s.) (Fig. 1.b) RT analyses on the VAS condition (nonwords) showed that bilinguals were significantly slower than monolinguals at detecting targets ( $F(1,26) = 6.8$ ,  $p < .05$ ), as illustrating the consistent delay found for the three positions ( $44 \text{ ms} \pm 7$ ). A gradually slower target detection from position 1 to 5 was also observed ( $F(2,52) = 141.4$ ,  $p < .001$ ; for all post-hoc tests,  $p$ s < .001), of same amplitude in the two groups ( $F < 1$ ,  $p > .05$ ) (Fig. 2.b).



**Figure 2 :** Precision (a) and TR ms (b) for the detection of the target letter of the monolingual (squared blacks) and the bilingual (squared whites) for non-words primes (condition EVA). The bars of standard error are presented

#### 4. Discussion

The aim of the present study was to show an effect of orthographic transparency on simultaneous visual attention skills engaged for orthographic processing (VAS skills), in bilingual participants who have learnt to read simultaneously in Welsh and English, and in English monolingual participants. Our results provide stronger evidence as compared to previous cross-linguistic studies, supporting the hypothesis according to which the orthographic transparency of a given language influences the development of the cognitive resources required for normal reading acquisition. Indeed, the present experiment was conducted in bilingual adults who learnt to read simultaneously at an early age. More specifically, in Wales, schools provide tuition in both Welsh and English with similar methods and schemes. The study of such populations therefore allows controlling for specific factors including methodological as well as environmental and cultural aspects in opposite to previous cross-linguistic studies.

We therefore showed that target detection performance was more strongly modulated in bilingual than monolingual participants. These group differences regarding the effect of target position in primes were found only on the VAS condition (nonword primes), critical for the evaluation of the use of various strategies regarding the decoding of non familiar letter strings. Such result can be interpreted in the framework of the multi trace model of polysyllabic word reading put forward by Ans et al (1998; MTM hereafter). A key component in this model is the visual attention window through which the information contained in the orthographic input is extracted, and corresponding to the VAS in human participants. The MTM model postulates that reading requires both a global and a serial procedures, differing regarding the visual attention window size, and therefore, regarding the VAS size. In global mode, the window opens over the whole letter string whereas in serial mode, the window narrows down to focus attention on sub-units successively. Although these two procedures are *à priori* not devoted to read a specific type of item, most of the familiar words are processed with in global mode whereas non familiar words are processed in serial mode. The absence of any position effect on accuracy on the control condi-

tion (word primes) suggests that words were processed with the global procedure in the two groups, i.e., that the two groups presented similar reading level in English. However, regarding RTs, a constant increase accompanying the target position in primes (not only for nonwords but also for words), suggests a serial encoding mode for the two types of items (see Pitchford et al., 2008; Whitney, 2001). Although this effect obtained for words was not predicted by the MTM model it could be explained by the mix of words and nonwords in the same block during the experiment. Furthermore, because this effect was similar in the two groups, we suggest that the control condition (English word primes) was not more difficult to perform for bilingual participants than for monolingual participants, excluding the hypothesis of an absence of automatic and fluent English reading skills in bilinguals.

Regarding the VAS condition (nonword primes), the stronger position effect on target detection accuracy observed in bilinguals (i.e., all the contrasts between the three positions were significant in bilinguals whereas only one was in monolinguals), suggests that when they are presented with non familiar letter strings, Welsh-English bilinguals reduce the VAS size to a greater extent than English monolinguals. This remains consistent with the MTM model predictions according to which the global reading mode fails when the system is presented with non familiar items, yielding the reduction of the size of the visual attention window (i.e., of the VAS). This group difference is furthermore consistent with the hypothesis of an adaptation of visual attention skills devoted to orthographic processing. We propose here that the VAS size reduction occurring to a greater extent in bilingual participants may result from their additional reading acquisition of the transparent Welsh language.

Lastly, it is noteworthy that RTs were overall slower in bilingual participants than in monolingual participants. This result echoes the conclusions of other studies investigating lexical processing in bilinguals (e.g., Simon et al. 2006) and could be explained by interferences produced because of the co activation of two lexica. Indeed, the access to orthographic strings would be performed differently in bilingual and monolingual

individuals because the lexical forms of the two languages would be activated spontaneously and simultaneously (Thierry and Wu, 2007).

To conclude, the results of the present study on the VAS condition (nonword primes) suggest that processing resources subtending non familiar orthographic input encoding adapt according

to the degree of orthographic transparency of the language(s) learnt. Therefore, it is necessary to take into account the specifics of the language(s) studied in order to design diagnostic batteries and remediation programs for written language impairments, not only in a monolingual but also in a bilingual learning context.

# Mémoire de travail et apprentissages chez l'enfant : Une question d'attention

Sophie PORTRAT

## Résumé

La mémorisation a une fonction essentielle chez l'être humain car elle constitue l'étape indispensable à l'acquisition des connaissances. Parmi les différents systèmes mnésiques, la mémoire dite « de travail » fonctionne en permanence pour mémoriser et traiter simultanément les informations. Elle est particulièrement importante chez l'enfant qui est constamment en situation d'apprentissage. On a longtemps considéré que pour mémoriser il fallait verbaliser et répéter. Nous défendons ici une toute autre conception : la mémoire de travail repose sur des mécanismes attentionnels qui sont contraints temporellement et ne dépendent pas de caractéristiques verbales. Les analyses empiriques présentées ici font non seulement émerger d'importantes conclusions théoriques mais elles laissent aussi entrevoir des pistes d'applications pratiques pour lutter contre l'échec scolaire.

## Mots-clés

Mémoire de travail, attention, développement cognitif, apprentissages scolaires

## Working memory and Learning in children: A matter of attention

### Abstract

Memorizing is crucial for human beings because it constitutes the fundamental step in acquiring knowledge. Among the different memory systems, the one called "working memory" works continuously to simultaneously memorize and process information. It is particularly important in children who are continually confronted to learning situations. It has long been considered that memorizing required verbalizing and repeating. The present paper offers an alternative conception: working memory relies on attentional mechanisms constrained by time and do not depend on verbal characteristics. The empirical analyses we present here do not only conduct to important theoretical conclusions, they also give a glimpse of practical applications for preventing school failure.

### Keywords

Working memory, attention, cognitive development, school learning

### Préambule

La mémorisation est une fonction cognitive cruciale pour l'être humain. Elle constitue une étape indispensable à l'acquisition de nouvelles connaissances. Sans mémoire, il n'y a pas de stockage des informations et sans stockage des informations, aucun apprentissage n'est possible. L'investigation de la mémoire humaine a débuté il y a plus d'un siècle avec les études introspectives de James (1890). Depuis, les chercheurs en psychologie cognitive n'ont eu de cesse de l'étudier en cherchant à identifier ses caracté-

ristiques et à comprendre son fonctionnement. On distingue aujourd'hui plusieurs types de mémoire, dont la mémoire de travail (MDT), qui constitue l'interface indispensable entre la perception, la mémoire à long terme et l'action. En effet, la MDT est une structure mentale qui possède une double fonction. D'une part, comme son nom l'indique, elle possède une fonction mnésique permettant le maintien temporaire des informations. Et d'autre part, elle est aussi responsable du traitement des informations issues de l'environnement et de la manipulation des

connaissances déjà acquises. En ce sens, elle est impliquée dans la plupart des activités cognitives auxquelles nous sommes quotidiennement confrontés. En effet, ces activités (e.g., convertir le prix d'un produit de l'Euro au Franc, lire un roman, ou même suivre une conversation) impliquent de multiples étapes de traitement des informations mais aussi le maintien temporaire des résultats intermédiaires issus de ces traitements. Par exemple, pour comprendre ce que votre interlocuteur vous dit, il faut non seulement que vous traitiez le flux de parole que vous entendez actuellement, mais il faut aussi que vous ayez mémorisé le début de la phrase, sans quoi vous ne pouvez pas comprendre le message. La MDT est donc en réalité une mémoire *qui* travaille.

Depuis les travaux princeps de Baddeley et Hitch (1974), la MDT est considérée comme la pierre angulaire du système cognitif. De nombreuses études ont d'ailleurs montré que les capacités de MDT sont étroitement liées aux capacités générales de raisonnement, de compréhension de la lecture, de résolution de problème (e.g., Kyllonen & Christal, 1990). Si la MDT est nécessaire pour que l'adulte réalise des activités cognitives quotidiennes, elle est, à fortiori, primordiale chez l'enfant qui est constamment en situation d'apprentissage. Comment les enfants font-ils pour traiter et mémoriser des informations en même temps ? Et par conséquent, comment font-ils pour acquérir de nouvelles connaissances et compétences ? Quels paramètres cognitifs contraignent les performances de MDT ? Et par conséquent, quels facteurs influent sur les apprentissages ? Les éléments de réponse que nous apporterons dans cet article émanent d'une recherche à caractère initialement fondamental tout en ayant des applications directes sur les méthodes d'apprentissage notamment scolaire.

### État de la question

Même dans ses étapes les plus élémentaires comme le maintien à court terme d'une petite quantité d'éléments (e.g., se souvenir d'un numéro de téléphone quelques instants après l'avoir entendu), la mémorisation a très longtemps été associée aux capacités langagières des individus (i.e., « pour mémoriser quelque chose, il faut le répéter », pour une synthèse, voir Baddeley, 2007). Les apprentissages passant indéniablement par une étape de mémorisation, cette

mémorisation s'avérerait difficile voire même inefficace chez les enfants disposant de capacités langagières restreintes ou présentant certaines pathologies (e.g., dysarthrie).

Cependant, les travaux initiés par P. Barrouillet et V. Camos depuis le début des années 2000 font émerger une conception alternative s'appuyant sur un nouveau modèle théorique de MDT (le modèle TBRS pour Time-Based Resource Sharing model ; Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004). Comme nous allons le voir, ce modèle place l'attention au centre du système mnésique et donc au cœur du fonctionnement cognitif permettant les apprentissages.

### Le modèle de Partage Temporel des Ressources (TBRS)

Le modèle TBRS est un modèle fonctionnel de MDT. En ce sens, il décrit l'enchaînement temporel des processus cognitifs impliqués lors de la réalisation d'une tâche de MDT. Grâce à l'élaboration de nouvelles techniques d'investigation expérimentale, il soutient une conception originale des relations qui existent entre les activités cognitives de traitement et de stockage de l'information. Concrètement, notre paradigme expérimental fait intervenir une situation de double tâche dans laquelle les participants doivent mémoriser des séries de stimuli tout en réalisant, de manière concurrente, des traitements sur d'autres stimuli intervenant entre deux éléments à mémoriser. Ce nouveau paradigme permet non seulement de manipuler une grande variété de paramètres (la nature des stimuli à mémoriser et à traiter, le type de traitement à effectuer, la longueur des séries à mémoriser, le nombre de stimuli à traiter) mais il possède également le grand avantage de contrôler avec précision l'enchaînement temporel des activités mentales réalisées par les sujets. Contrairement aux tâches classiques pour lesquelles les participants sont libres de réaliser les activités au rythme qui leur convient et de les interrompre comme bon leur semble, dans notre paradigme, les stimuli apparaissent sur un écran d'ordinateur selon un rythme préétabli. En contraignant ainsi les participants à se conformer à un rythme relativement élevé (que nous pouvons manipuler), nous évitons qu'ils mettent en place des stratégies que nous ne contrôlerions pas. Comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant, un contrôle précis du déroulement temporel des processus mis en

œuvre dans la réalisation des tâches est en effet primordial.

Le modèle TBRS est basé sur quatre postulats. Premièrement, aussi bien le traitement que le maintien en mémoire des informations nécessitent de l'attention qui est une ressource limitée et doit donc être partagée entre les deux composantes de la tâche. Deuxièmement, dès lors que l'attention est détournée des traces mnésiques des items à mémoriser, leur activation souffre d'un déclin temporel. En d'autres termes, dès que le sujet ne porte plus délibérément son attention sur les informations à maintenir, elles disparaissent peu à peu de la mémoire, un peu comme une image devenant de plus en plus floue. Cela rend leur récupération difficile, voire impossible à un moment donné. Ainsi, avant qu'elles ne disparaissent totalement de la mémoire, les traces mnésiques déclinantes doivent être réactivées grâce à une focalisation attentionnelle. Troisièmement, le focus attentionnel ne peut être dévolu qu'à une seule activité centrale à la fois. En d'autres termes, lorsque l'attention est dédiée à une activité comme lire un chiffre à un instant T, il est impossible de réaliser une autre activité contrôlée en même temps (e.g., réactiver les traces mnésiques des items à mémoriser). De ce fait, le fonctionnement de la MDT est nécessairement séquentiel. Quatrièmement et en conséquence, tout traitement qui capture l'attention perturbe le maintien concurrent d'information car il empêche la réactivation des traces. Ainsi, pour réaliser une tâche de MDT, l'attention doit être partagée grâce à un déplacement rapide et fréquent entre traitement et maintien d'information.

Au vu de cette nouvelle théorie, comment fait-on pour mémoriser des informations et acquérir de nouvelles connaissances ? En les verbalisant et en les répétant encore et encore ? Et bien, non, pas seulement. Selon notre conception, le mécanisme responsable du maintien des informations est un mécanisme de nature attentionnelle : l'attention doit être partagée de manière temporelle entre les différentes activités requises par la tâche. Conformément, des études menées chez l'adulte et publiées récemment (e.g., Barrouillet, Bernardin, Portrat, Vergauwe & Camos, 2007 ; Barrouillet, Portrat & Camos, 2011 ; Portrat, Barrouillet & Camos, 2008) indiquent de manière consistante que la mémorisation est détériorée par une activité cognitive

concurrente et ce d'autant plus que la proportion de capture attentionnelle induite par cette activité est élevée. Qu'en est-il chez l'enfant ? Les enfants disposent-ils d'un tel mécanisme attentionnel ?

### Le fonctionnement de la MDT chez les enfants de 10 ans

La question de la nature du mécanisme responsable du maintien temporaire des informations a son importance, non seulement pour le fonctionnement de la MDT mais aussi pour l'efficacité globale du système cognitif. Comme nous l'avons souligné au début de cet article, on a longtemps considéré que les capacités de mémorisation étaient fortement liées aux mécanismes langagiers. En ce sens, nombres de chercheurs considéraient que pour mémoriser un matériel, il fallait le verbaliser et le répéter. Toutefois, la seule répétition (qu'elle soit vocale ou subvocale) d'un matériel verbal engendre un encodage de ses caractéristiques superficielles (essentiellement phonologiques). Or, pour avoir une chance de mémoriser des informations à long terme et ainsi acquérir de nouvelles connaissances, les informations doivent être encodées de manière profonde (Cowan, 1999). Par exemple, nous sommes souvent incapables de retrouver le nom de la firme pour laquelle ce fameux mannequin américain est l'emblème publicitaire. Même si cette campagne publicitaire est affichée aux quatre coins de la ville, tant que nous ne portons pas délibérément attention à ces affiches, nous ne retenons que les caractéristiques superficielles de l'affiche (e.g., la posture du mannequin). Ni le promoteur de la publicité, ni le message véhiculé ne sont encodés. L'attention joue un rôle important dans la construction de la représentation de l'information en permettant un codage à la fois plus riche et plus durable (Craik & Lockhart, 1973). L'encodage et le maintien attentionnel des informations semblent donc être gages de réussite dans les apprentissages.

L'objectif des travaux que nous avons réalisés chez l'enfant était de démontrer que les mécanismes attentionnels décrits précédemment sont présents et fonctionnels avant l'âge adulte (Portrat, Camos & Barrouillet, 2009). Dans cette optique, nous avons étudié l'effet de la durée de capture attentionnelle induite par une activité cognitive sur les performances de mémorisation d'enfants de 10 ans. Les enfants devaient mémo-



riser des séries de lettres tout en réalisant une tâche de jugement spatial concernant la position de carrés qui apparaissaient successivement à l'écran. Nous avons manipulé la durée de ces activités de jugement spatial en faisant varier soit la discriminabilité entre les positions des cibles, soit le contraste entre les cibles et le fond de l'écran. Ces manipulations sont connues pour accroître la demande attentionnelle induite par les étapes de recherche de cibles au cours de l'analyse d'une scène visuelle (e.g., Heitz & Engle, 2007). Ainsi, nous nous attendions à ce que les conditions induisant une capture attentionnelle plus longue (faible discriminabilité et faible contraste) engendrent les plus faibles performances de rappel.

Conformément à cette hypothèse, les enfants mettaient plus de temps pour décider de la position spatiale des carrés lorsqu'ils étaient difficilement discriminables entre eux ou faiblement contrastés vis à vis du fond de l'écran. Cette augmentation de capture attentionnelle dans le traitement cognitif induisait une réduction des performances de mémorisation chez l'enfant. Bien que ces empiries soient conformes à nos attentes, elles sont loin d'être intuitives. Comment imaginer que le fait de traiter une scène visuelle perturbe le maintien concurrent d'informations verbales ? Nous présenterons dans un premier temps les conséquences théoriques de nos résultats concernant les mécanismes de maintien chez l'enfant ainsi que leurs pendant au niveau du développement cognitif. Puis, pour finir, nous proposerons quelques applications possibles au niveau des apprentissages scolaires et de leurs échecs.

### Interprétations théoriques

Les résultats présentés ici sont issus de la comparaison entre des conditions expérimentales qui impliquent exactement la même tâche de traitement (i.e., jugement spatial) sur le même type de matériel (i.e., des carrés). De ce fait, on peut raisonnablement avancer que, même si ces tâches visuelles impliquent une quelconque verbalisation (e.g., « si le carré est en haut, j'appuie à droite »), elle est la même dans les deux cas. Or, nos résultats indiquent qu'une des deux tâches (celle dont le coût cognitif est le plus élevé) induit des performances de mémorisation concurrente plus faibles. C'est bien la preuve que le langage n'est pas le seul médiateur des aptitudes mnési-

ques. Si c'était le cas, les enfants auraient été capables de mémoriser autant de lettres dans les deux conditions. La seule façon de concevoir l'effet que nous observons est de considérer que le maintien d'informations verbales n'est pas uniquement tributaire de mécanismes langagiers mais dépend aussi du partage temporel des ressources attentionnelles entre les différentes activités cognitives impliquées dans la tâche.

Toutefois, si les enfants disposent effectivement du même mécanisme de maintien des informations que les adultes, ces deux groupes d'âge ne sont pas pour autant sur un pied d'égalité. En effet, dans des conditions comparables, les enfants semblent souffrir d'une perte mnésique trois fois supérieure à celle observée chez les jeunes adultes (Barrouillet et al., 2007 ; Exp. 2). Deux facteurs peuvent expliquer la sensibilité accrue des traces mnésiques au passage du temps chez les enfants. (1) Le mécanisme de rafraîchissement attentionnel est sans doute moins efficace chez l'enfant. Ainsi, alors que l'adulte pourra utiliser les pauses libres entre deux traitements très efficacement, l'enfant lui ne réactivera que légèrement les traces. (2) Il peut également s'agir d'une capacité restreinte d'alternance du focus attentionnel entre les activités de traitement et de maintien. Il serait ainsi moins évident pour les enfants de passer d'une activité de traitement à une activité de maintien rapidement et fréquemment. On sait d'ailleurs que cette aptitude de déplacement attentionnel n'est pas à l'œuvre avant l'âge de 7 ans (Henry & Millar, 1993). De manière générale, nos résultats suggèrent que les changements développementaux entre l'enfance et l'âge adulte affectent l'efficacité des mécanismes impliqués dans le traitement, le stockage et leur coordination plutôt que la structure ou le fonctionnement même de la MDT.

### Applications

Comme nous l'avons vu tout au long de cet article, notre conception du fonctionnement de la MDT et les résultats de nos études confèrent un poids particulier aux mécanismes attentionnels dans la mémorisation à court terme et par conséquent dans l'acquisition des connaissances. En ce sens, notre théorie offre un cadre explicatif privilégié aux difficultés scolaires associées aux troubles attentionnels dont on parle de plus en plus aujourd'hui : TDAH (Trouble Déficitaire de l'Attention avec Hyperactivité), communément

appelé hyperactivité. Pour simplifier, les symptômes présentés par les enfants souffrant d'hyperactivité comportent notamment un manque d'attention soutenue et l'incapacité à se concentrer. Dans ces circonstances et grâce à l'identification du mécanisme de maintien attentionnel utilisé chez les enfants, il devient parfaitement possible d'expliquer les difficultés d'apprentissage scolaire rencontrées par les enfants hyperactifs en terme de dysfonctionnement des mécanismes attentionnels. On peut raisonnablement imaginer que ces enfants, ne disposant que de trop faibles capacités attentionnelles, n'utilisent tout simplement pas ce mécanisme élaboré de focalisation attentionnelle et se contentent d'une répétition verbale des informations à mémoriser. Or, comme nous l'avons mentionné plus haut, cette stratégie de bas niveau permet uniquement l'encodage et le maintien des caractéristiques superficielles des informations. Ainsi, si dès les premières étapes basiques, et pourtant essentielles, de l'encodage d'un stimulus, ce dernier n'est représenté que de manière trop peu complète, il n'est pas étonnant, dans ces circonstances, que des problèmes d'apprentissage plus globaux émergent. On peut également penser que les enfants souffrant d'hyperactivité, même s'ils utilisent effectivement le même mécanisme attentionnel que leurs pairs, sont désavantagés en raison d'un manque de puissance de ce mécanisme ou bien d'une labilité attentionnelle trop importante, empêchant l'alternance adaptée et adéquate de l'attention entre les différentes activités cognitives.

Pour finir, notre théorie permet également de dégager certaines préconisations pratiques susceptibles de favoriser les apprentissages scolaires. La principale difficulté dans les activités cognitives requérant à la fois de maintenir et de manipuler des informations est de gérer la quantité limitée de ressources dont nous disposons d'une manière la plus économique et la plus efficace possible sur le plan temporel. Comme nous l'avons fait remarquer plus haut, la MDT est extrêmement sollicitée au cours des apprentissages scolaires (Gavens & Camos, 2006). Il est donc primordial d'éviter qu'elle soit surchargée par des informations à manipuler et/ou à maintenir simultanément. Selon l'objectif de l'enseignant ou les difficultés rencontrées par l'élève, l'une des deux fonctions de la MDT (maintien ou traitement) peut être allégée afin de faciliter la mise en

œuvre de l'autre fonction. Une possibilité pour minimiser la quantité d'informations à maintenir en mémoire afin de laisser un maximum de ressources disponibles pour les traitements est de fournir aux élèves un maximum de supports (souvent visuels tels que des affiches collectives, un répertoire de mots, etc...). Peu à peu, lorsque l'information a été fréquemment rencontrée et qu'elle est représentée convenablement en mémoire à long terme, sa récupération et son maintien actif deviennent moins coûteux et l'enfant peut alors se détacher de ces outils provisoires. La seconde possibilité pour soulager la MDT est de décomposer l'activité de traitement en plusieurs sous étapes (progression pas à pas) tout en utilisant un support écrit pour conserver les résultats intermédiaires de ces étapes de traitement. Par exemple, au début de l'acquisition de la technique opératoire de la division, on demande classiquement aux enfants de poser la soustraction pour déterminer le reste. Cette technique, qui consiste tout simplement à éviter que la mémoire ne soit surchargée par un résultat intermédiaire, peut être appliquée à toutes sortes d'apprentissages (e.g., compréhension de texte, arithmétique). Dans tous les cas, le plus important est d'éviter au maximum de contraindre temporellement les activités. Comme nous l'avons vu ici, plus une activité cognitive doit être réalisée rapidement, plus elle empêche toute autre activité de prendre place et plus son coût cognitif est élevé.

## Bibliographie

- Baddeley A. D. (2007). *Working memory, thought, and action*. Oxford: Oxford University Press.
- Baddeley A. D. & Hitch G. (1974). Working memory. In G. A. Bower (Ed.), *Recent advances in learning and motivation* (vol. 8, pp. 647-667). New York : Academic Press.
- Barrouillet P., Bernardin S. & Camos V. (2004). Time constraints and resource-sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 83-100.
- Barrouillet P., Bernardin S., Portrat S., Vergauwe E. & Camos V. (2007). Time and cognitive load in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 33, 570-585.

- Barrouillet P., Portrat S. & Camos V. (2011). On the law relating processing to storage in working Memory. *Psychological Review*, 118, 175-192.

- Cowan N. (1999). An embedded-process model of working memory. In A. Miyake & P. Shah (Eds.); *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 62-101). Cambridge: Cambridge University Press.

- Craik F. I. M. & Lockhart R. S. (1973). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11, 671-684.

- Gavens N. & Camos V. (2006). La mémoire de travail : une place centrale dans les apprentissages scolaires fondamentaux. In E. Gentaz & P. Dessus (Eds.), *Apprentissages et enseignement : Sciences cognitives et éducation* (pp. 91-106). Paris : Dunod.

- Heitz R. P. & Engle R. W. (2007). Focusing the spotlight: Individual differences in visual attention control. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136, 217-240.

- Henry L. A. & Millar S. (1993). Why does memory span improve with age? A review of the evidence for two current hypotheses. *European Journal of Cognitive Psychology*, 5, 214-287.

- James W. (1890). *The principles of psychology*. New York: Henry Holt and Company.

- Kyllonen P. C. & Christal R. E. (1990). Reasoning ability is (little more than) working-memory capacity?! *Intelligence*, 33, 1-64.

- Portrat S., Camos V. & Barrouillet P. (2009). Working memory in children: A time-constrained functioning similar to adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102, 368-374.

- Portrat S., Barrouillet P. & Camos V. (2008). Time-Related Decay or Interference-Based Forgetting in Working Memory? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*. 34(6), 1561-1564.

## Preamble

Memory is a crucial cognitive function for human beings. It constitutes a fundamental step in acquiring new knowledge. Without memory, there is no storage of information, and without storage of information, no learning is possible.

Human memory exploration started more than a century ago with James (1890) introspective studies. From that time on, cognitive psychology researchers never stopped studying it and trying to identify its characteristics and understand its functioning. Nowadays, several kinds of memory are distinguished: Among those, working memory (WM) constitutes the essential interplay between perception, long-term memory and action. Indeed, WM is a mental structure that has a double function. On one hand, as its name indicates, it is devoted to a memory function permitting a temporary maintenance of information. On the other hand, it is also responsible for the processing of information coming from the environment and for the manipulation of already acquired knowledge. In this sense, it is involved in most of the cognitive activities we have to deal with each day. Indeed, these activities (e.g., to convert the price of a product from euro to franc, read a novel, or even follow a conversation) consist in numerous stages of information processing but also in the temporary maintenance of the intermediary outcomes of these processing phases. For example, in order for you to understand what your interlocutor is saying, you have not only to process his/her continuous stream of words, but you also have to keep the start of the sentence in memory, otherwise you cannot understand the message. Working memory is thus actually a memory that is working.

From the seminal work of Baddeley and Hitch (1974), WM is considered as the cornerstone of the cognitive system. For that matter, many studies demonstrated that WM capacities are closely linked to general capacities of reasoning, reading comprehension and problem solving (e.g., Kyllonen & Christal, 1990).

If WM is required for adult to perform daily cognitive activities, it is, all the more, essential for child who is continuously learning. How do children manage to process and memorize information simultaneously? And, as a consequence, how do they acquire new knowledge and skills? What are the cognitive parameters constraining WM performance? And, as a consequence, what factors affect learning? The first answers we propose in the present paper come from a research project that has a fundamental aim; all the while having direct applications on learning methods and more particularly school learning.

## State of the art

Even in its more elementary stages as the short-term maintenance of a few stimuli (e.g., remembering a phone number a short while after having encoded it), memorizing has long been associated with language capacities (i.e., “to memorize, you have to rehearse”, see Baddeley, 2007 for a review). Learning being undeniably mediated by a memory stage, this memorization would be difficult or even ineffective in children with restricted language capacities or with specific pathologies (e.g., dysarthria).

However, an alternative conception came up with works initiated by Barrouillet and Camos in the early 2000's. It is based on a new theoretical model of WM: the TBRs model for Time-Based Resource Sharing model (Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004). As we will see, this model places attention at the heart of the memory system and hence, at the heart of the cognitive functioning permitting learning.

## The Time-Based Resource Sharing model (TBRs)

The TBRs model is a functional model of WM. In this sense, it describes the temporal sequence of cognitive processes involved in the execution of a WM task. Thanks to the development of a new experimental paradigm, this model supports an original conception of the relations existing between processing and storage activities. Our experimental paradigm is a double task situation in which participants have to memorize series of stimuli while concurrently performing processing on other stimuli interleaved between two memory stimuli. This paradigm permits the manipulation of a wide variety of parameters (the nature of the to-be-maintained and to-be-processed stimuli, the kind of processing, the length of the to-be-maintained series, the number of to-be-processed stimuli). Most importantly, it also has the great advantage of controlling carefully the temporal sequences of the mental activities realized by the participants. Contrary to the classical tasks in which participants are free to perform activities at their own rhythm and to interrupt these activities as they want, in our paradigm, stimuli appear in a computer screen according to a preset and controlled rhythm. Thus participants are constrained to conform to a relatively high rhythm (which we can manipulate). As such, it is difficult for them to engage in

any strategy that we might not be able to control. As we will see in the following section, it is essential to perfectly control the temporal course of the cognitive processes involved in performing the tasks.

The TBRs model is based on four assumptions. First, processing as well as memory maintenance require attention, which is a limited resource that hence has to be shared between both components of the task. Second, as soon as attention is switched away from memory traces, their activation suffers from a time-based decay. In other words, as soon as participant's attention is diverted from the to-be-maintained elements, their traces disappear little by little from memory, more or less as a picture becoming more and more blurred. This makes their retrieval difficult, or even impossible at a given time. Hence, before their complete disappearance, decaying memory traces have to be reactivated by means of attentional focalisation. Third, the focus of attention can be devoted to one activity at a time only. In other words, when attention is dedicated to an activity such as reading a digit at a given time, it is impossible to perform any other controlled activity at the same time (e.g., reactivating to-be-maintained memory traces). Therefore, WM functioning is necessarily sequential. Henceforth, any processing activity that captures attention impedes concurrent maintenance of information because it prevents the reactivation of memory traces. Then, to perform a WM task, attention has to be shared between processing and maintenance of information through a rapid and frequent switching.

Given this theory, how do we manage to memorise information and acquire new knowledge? By verbalising or repeating them again and again? No, not only! According to our conception, the mechanism responsible for the maintenance of information is an attentional mechanism: attention must be shared in a time-based manner between activities involved in the task at hand.

Accordingly, recent studies conducted in adults (e.g., Barrouillet, Bernardin, Portrat, Vergauwe & Camos, 2007; Barrouillet, Portrat & Camos, 2011; Portrat, Barrouillet & Camos, 2008) are consistent in indicating that memory performance is impaired by a concurrent cognitive activity and even more so under high propor-

tions of attentional capture induced by this activity. What happens in children? Do children have such an attentional mechanism, and if so, do they use it?

### WM functioning in 10 years-old children

The question of the nature of the mechanism responsible for the temporary maintenance of information is important, not only for WM functioning but also for the global efficiency of the cognitive system. As we highlighted above, memory capacities have long been considered as highly linked to language mechanisms. In this sense, many researchers considered that to memorize stimuli, we had to verbalize and rehearse them. However, the sole rehearsal (being vocal or subvocal) of a verbal material induces a coding of its shallow characteristics (phonological essentially). However, to have a chance of memorizing information at long term and hence to acquire new knowledge, information has to be deeply encoded (Cowan, 1999). For example, we are frequently unable to retrieve the name of the brand this American famous model is representing. Even if this advertising campaign is displayed all over the town, as long as we do not deliberately focus our attention to these posters, we will only retain superficial characteristics (e.g., the model's position or clothes). Neither the advertising investigator, nor the precise carried message is encoded. Attention plays a major role in the construction of our representation of information by permitting a richer as well as longer lasting coding (Craik & Lockhart, 1973). Attentional encoding and maintenance of information seem thus to be important factors for successful learning.

The aim of the studies we conducted in children was to demonstrate that the previously described attentional mechanisms are present and functional before adulthood (Portrat, Camos & Barrouillet, 2009). With that in mind, we studied the effect of the duration of the attentional capture induced by the processing activity on memory performance of 10 years-old children. Children had to memorize series of letters while performing a location judgment task about the position of squares appearing successively on the computer screen. We manipulated the duration of these location judgement activities by varying either the discriminability

between spatial location of the targets or the contrast between the targets and the background. These manipulations are known to increase the attentional demand induced by the target search stages during a visual scene analyse (e.g., Heitz & Engle, 2007). Hence, we expected that the condition inducing a longer attentional capture (low discriminability and low contrast) would give rise to the lowest recall performance.

As expected, it took children more time to judge the spatial position of the squares when those were hardly discriminable or poorly contrasted from the background. This increased attentional capture in cognitive processing led to reduced memory performance. Even if these data are in accordance with our expectations, they are far from being intuitive. How can it be that processing a visual scene impedes concurrent maintenance of verbal information? We will firstly present the theoretical consequences of our results regarding the maintenance mechanism in children as well as the corresponding consequences for cognitive development in general. Then and finally, we will propose some possible applications for school learning as well as for school failure.

### Theoretical interpretations

The main results presented here come from the comparison between experimental conditions involving the exact same processing task (i.e., location judgment) on the same material (i.e., squares). Thus, one can easily assert that, even if these visual tasks do involve any verbalisation (e.g., "if the square is in the upper side of the screen, I press the right key"), it is the same in both cases. However, our results show that one of these two tasks (the one for which the cognitive cost is higher) induces lower concurrent memory performance. This clearly constitutes evidence that language is not the sole mediator of the memory capabilities. If it were the case, children would have been able to memorize the same amount of letters in both conditions. The only way to interpret our results is to consider that the maintenance of verbal information does not only depend on language mechanisms but also on a time-based sharing of attentional resources between the different cognitive activities required by the task.

However, if children do actually use a maintenance mechanism similar to adults, these two groups are not on an equal footing for all that. Indeed, all other things being equal, children seem to suffer from a memory loss that is three times as large as the one observed in young adults (Barrouillet et al., 2007; Exp. 2). Two factors can explain the fact that time is more deleterious for the memory traces of children. (1) The attentional refreshing mechanism is presumably less effective in children. Hence, while adult will be able to efficiently use the free pauses between any two successive processing episodes, children will only be able to perform some light reactivation of the traces. (2) It is also possible that children suffer from a restricted capacity to switch attention between processing and maintenance activities. It would be less easy for children to switch rapidly and frequently from a processing activity to a maintenance activity. Besides, it is known that attentional switching is not efficient before 7 years of age (Henry & Millar, 1993). Broadly speaking, our results suggest that developmental changes from childhood to adulthood affect the efficiency of the mechanisms involved both in processing and in storage, as well as in their coordination, rather than the structure or the functioning of WM per se.

### Applications

As we have seen, our conception of the WM functioning and our results highlight the particular importance of the attentional mechanisms in short term memory and, as a consequence, in knowledge acquisition. In this sense, our theory offers a privileged explanatory framework for school difficulties associated with attentional disorders: Attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). Broadly speaking, the symptoms that are shown by ADHD children include more particularly a lack of sustained attention and an inability to concentrate. Thus, with the identification of the attentional mechanisms of maintenance used by children in mind, it is possible to explain learning difficulties encountered by ADHD children in terms of a dysfunction of those attentional mechanisms. One can reasonably imagine that these children, relying on low attentional capacities only, simply do not use this advanced attentional focusing mechanism and just verbally rehearse the to-be-maintained information. However, as mentioned above, this low-

level strategy allows only the coding and maintenance of the shallow characteristics of information. If a stimulus is only poorly represented since the very first basic but nonetheless essential stages of encoding, it is not surprising, then, that more comprehensive learning difficulties emerge. One can also assume that ADHD children, even if they actually use the same attentional mechanism as their peers, are penalized by a lack of efficiency of this mechanism or by an attentional lability that would impede adapted and adequate switching of attention between several cognitive activities.

Finally, our theory also yields practical recommendations likely to sustain school learning. In cognitive activities requiring maintenance as well as manipulation of information, the core difficulty is to manage with the limited resources in the most economic and efficient way given the temporal constraints. As highlighted above, WM is extremely solicited during learning (Gavens & Camos, 2006). It is thus essential to avoid its overload by information that has to be maintained and/or processed simultaneously. Depending on the objective of the teacher or the difficulties encountered by the pupil, either one of the two WM activity (maintenance or processing) could be simplified and lightened to facilitate the carrying out of the other. To minimize the amount of to-be-maintained information in order to leave a maximum of resources available for processing, one possibility is to supply a maximum of supports to pupils (often visual as collective posters, words notebook, etc...). Little by little, when information has been frequently encountered and when it is properly represented in long term memory, its retrieval and its active maintenance become less and less costly and the child can thus grow away from these temporary tools. The second possibility to relieve WM is to break the processing activity down into several sub-stages (step by step progress) while using written support to maintain intermediary outcomes of these processing stages. For example, at the beginning of the acquisition of the arithmetic operation of division, children are asked to write down the subtraction to determine the remainder. This technique, that simply consists in avoiding memory to be overloaded by an intermediary processing outcome, can be applied to many learning domains (e.g., text comprehension, arithmetic, and so on). In all cases, the most

important point is to avoid the time-based constrain of activities as much as possible. As seen here, the more a cognitive activity has to be

rapidly performed, the more it impedes any other activity to be carried out and the more its cognitive load is important.

## Apprendre à gérer la variation phonologique :

Les enfants de 2 ½ ans connaissent les règles d'assimilation en français et en anglais

Katrin SKORUPPA

### Résumé

Utilisant une tâche de pointage d'images, nous étudions les connaissances précoces des enfants français et anglais sur les alternances phonologiques qui causent des changements de sons dans la parole continue. Nous présentons deux expériences qui s'intéressent à la perception des assimilations, c'est-à-dire des règles qui rapprochent les caractéristiques de deux sons adjacents (en Français, par exemple, la séquence *boite verte* peut être prononcée comme *boidverte*). Nous démontrons que, tout comme les adultes, les enfants français (exp. 1) et anglais (exp. 2) compensent pour les assimilations permises dans leur langue dès l'âge de 2 ½ ans.

### Mots-clés

Acquisition du langage, phonologie, assimilation, variabilité phonologique

## Learning to cope with phonological variation:

2 ½ – year – old children know french and english assimilation rules

### Abstract

Using a picture pointing task, we study French and English children's early knowledge of phonological alternations that cause sound changes in continuous speech. We present two experiments on the perception of assimilation, that is, the rules that adapt the characteristics of two adjacent sounds (in English, for example, the sequence *green box* can be pronounced as *greembox*). We show that, like adults, French (exp. 1) and English children (exp. 2) compensate for assimilations permitted in their native language from the age of 2 ½ years.

### Keywords

Language acquisition, phonology, assimilation, phonological variability

### Introduction

Pendant les dernières décennies, de nombreuses études psycholinguistiques ont révélé que les enfants adaptent leur perception aux catégories sonores de leur langue maternelle dès la première année de vie (p. ex. Werker & Tees 1984, Kuhl et al. 1992). En outre, leurs représentations mentales des mots comprennent autant de détail phonétique que celles des adultes peu après leur premier anniversaire (p. ex. Swingley & Aslin 2000, 2002).

Cependant, peu d'études se sont intéressées au traitement de la variation phonologique par les jeunes enfants, bien qu'elle soit omniprésente

dans le signal de parole qu'ils perçoivent. En fait, les mots sont rarement prononcés en isolation et dans leur forme de « citation » (la prononciation standard qui est décrite dans un dictionnaire). Dans la parole continue, il existe de nombreuses variantes de prononciation qui diffèrent selon le locuteur, le dialecte et le contexte phonologique. Tandis que certaines études se sont intéressées aux deux premiers facteurs (p. ex. Kuhl 1983, Nazzi et al. 2000), nous ne savons que très peu sur les connaissances des enfants concernant les alternances phonologiques dépendantes du contexte, telles que les assimilations.



Le Français, par exemple, permet l'assimilation du trait phonologique de voisement. Ce trait est normalement distinctif, c'est-à-dire le contraste entre consonnes voisées (comme [b]) et sourdes (comme [p]) permet de distinguer entre deux mots (p. ex. *bain* – *pain*). Mais dans la parole continue, le voisement d'une consonne peut être adapté à celui de la consonne suivante : une consonne sourde (comme [t] dans *boite*) peut devenir voisée (ici, [d]) si elle est suivie d'une autre consonne voisée (la séquence *boite verte* peut être prononcée comme *boïdverte*), et vice versa (*robe sale* → *ropsale*). Darcy et collègues (2009) rapportent que les adultes français prennent en compte ces assimilations et leurs contextes lors de l'accès au lexique : ils acceptent la prononciation *rop* comme une variante du mot *robe* dans des séquences où l'assimilation est possible (p. ex. *ropsale*), mais pas dans des séquences où elle ne l'est pas (p. ex. *ropnoire*). Des expériences d'amorçage intermodal confirment que les adultes français sont sensibles à l'assimilation de voisement (Snoeren, Segui & Halle 2008a, 2008b).

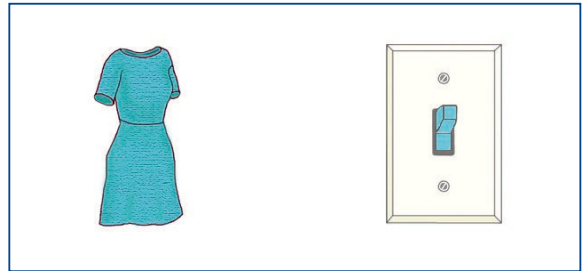
Les langues du monde diffèrent par rapport aux assimilations qu'elles permettent (pour une revue typologique voir Cho 1999). En Anglais, par exemple, la place d'articulation, et non le voisement, est assimilée : Une consonne alvéolaire (telle que [n]) peut devenir labiale (ici, [m]) si elle est suivie d'une autre consonne labiale (p. ex. *ten pounds* → *tempounds*). Comme les Français, les adultes anglais sont sensibles aux assimilations de leur langue maternelle (Marslen-Wilson, Nix & Gaskell 1995, Darcy et al. 2009). Comme celles-ci diffèrent selon les langues, les enfants doivent apprendre quelles assimilations s'appliquent dans leur langue maternelle. Le développement de la compensation pour l'assimilation n'a été étudié qu'avec des enfants en âge scolaire. Les enfants anglais de 7 ans (Marshall et al., soumis) et les enfants néerlandais de 8 ans (Blomert, Mitterer & Paffen 2004) montrent des effets de compensation pour l'assimilation comparables à ceux trouvés chez les adultes. Cependant, il semble plausible que la compensation pour l'assimilation développe bien plus tôt, comme d'autres études montrent que les nourrissons américains de moins d'un an ont déjà quelques connaissances concernant les allophonies (Pegg & Werker 1997, Seidl et al. 2009), un autre type d'alternances phonologiques dépendantes du contexte.

La présente étude examine si les enfants français et anglais de 2 ½ ans prennent en compte les assimilations permises dans leur langue maternelle lors de l'accès au lexique. Nous utilisons une tâche de pointage adaptée aux jeunes enfants.

### Expérience 1 : Assimilation de voisement en Français

#### Matériel

Douze mots français monosyllabiques, qui finissaient par une consonne obstruente voisée ou sourde (p. ex. *boite*, *robe*) et qui étaient familiers aux enfants français de 2 ½ ans, étaient sélectionnés pour la phase de test. Douze images colorées dépeignant ces mots étaient appariées à douze images d'objets dont les noms sont inconnus aux jeunes enfants (p. ex. un astrolabe) de la même taille et avec complexité visuelle approximative (pour un exemple voir figure 1).



**Figure 1** : Exemple de paires d'objets connu (robe, à gauche) et inconnu (interrupteur, à droite)

A partir de chaque mot, quatre phrases de test étaient construites. Dans les phrases expérimentales, les formes assimilées des mots de test (p. ex. *boïde*, *roppe*) étaient utilisées, soit dans un contexte où l'assimilation était possible (condition Assimilation), soit dans un contexte où elle ne l'était pas (condition Non-assimilation) :

#### Conditions expérimentales

**Assimilation** : Montre la boï[dj]uste ici !

**Non-assimilation** : Montre la boï[dm]aintenant !

Notons que dans le premier cas, si les enfants sont sensibles à l'assimilation, ils peuvent interpréter la séquence *boïdjuste* comme une assimilation du mot *boite*, et donc choisir l'objet connu,

tandis qu'ils doivent interpréter la séquence *boide-maintenant* comme référant à un nouveau mot qu'il ne connaît pas encore (*boide*).

Dans les conditions de contrôle, le mot prononcé correctement (condition Familier) et la forme assimilée (condition Nouveau) étaient présentés en fin de phrase.

### Conditions de contrôle

**Familier** : *Montre la boîte !*

**Nouveau** : *Montre la boide !*

Ces phrases servent de contrôle si les enfants sont sensibles au trait de voisement en fin de mot. Notons qu'ici, nous attendons que les enfants choisissent l'image familière quand il entend la prononciation correcte (*boite*), et l'image de l'objet inconnu quand ils entendent la forme assimilée hors contexte (*boide*). Pour la phase d'entraînement, dix mots supplémentaires (p. ex. *sac*) et dix paires d'images étaient choisis et utilisés dans les conditions de contrôle uniquement.

Le matériel était enregistré par une locutrice de langue maternelle française dans un style de parole dirigée aux enfants, sans pauses entre les formes assimilées et le contexte. En plus des phrases décrites plus haut, elle lisait aussi des phrases de présentation où la prononciation correcte (*Ceci est une boîte*) et la forme assimilée (*Et ça, c'est une boide !*) apparaissaient en fin de phrase, des phrases de feedback (*Très bien !, Tu es sûr ?*), une histoire de récit-cadre et douze phrases supplémentaires pour une phase de familiarisation avec la tâche (p. ex. *Montre la balle !*).

### Procédure

L'enfant était assis devant un écran d'ordinateur, à côté de l'expérimentatrice qui dirigeait l'expérience par des clics de souris. Un parent pouvait être présent. L'enfant était filmé de dos.

Le récit-cadre invitait l'enfant à aider un nounours à ranger sa chambre, en désignant les objets qu'il devait mettre dans un placard. Après une brève familiarisation avec la tâche de pointage, la phase d'entraînement commençait. Comme il est difficile pour les jeunes enfants de distinguer des mots avec des contrastes subtiles à la fin dans des tâches explicites (Garnica 1973), ils étaient entraînés à faire attention aux chan-

gements de voisement en fin de mot. Les essais d'entraînement étaient structurés de la manière suivante :

1. **Présentation** : L'objet familier apparaissait d'un côté de l'écran (choisi aléatoirement). 1,5 secondes plus tard, il était dénommé par sa phrase de présentation (p. ex. *Ceci est un sac*). Après sa disparition, cette procédure était répétée pour l'objet inconnu de l'autre côté de l'écran.
2. **Demande** : Les deux objets réapparaissaient côte à côte. Après 1,5 secondes, une demande de pointage était jouée (p. ex. Nouveau : *Montre le sague !*). En se basant sur les essais antérieurs, l'expérimentatrice choisissait si c'était une phrase de la condition Familier ou Nouveau. L'expérimentatrice enregistrerait par la souris le côté que l'enfant désignait.
3. **Feedback** : Si la réponse était correcte, l'enfant recevait du feedback positif. Sinon, la demande était répétée jusqu'à ce que la réponse soit juste. A la fin de chaque essai, l'expérimentatrice décidait si elle voulait lancer une autre demande pour la même paire d'objets, ou si elle voulait continuer avec une nouvelle paire.

Si quatre réponses parmi cinq étaient correctes du premier coup, l'entraînement était terminé et l'enfant passait en phase de test. Sinon, l'expérience finissait au bout de 15 essais d'entraînement.

Pendant la phase de test, l'expérimentatrice mettait un casque avec des voix de masquage pour ne pas pouvoir entendre les stimuli et influencer l'expérience. La phase de test comprenait douze essais dans un ordre aléatoire. Les essais de test suivait la même structure que ceux de l'entraînement, sauf qu'il n'y avait pas de feedback, mais de la musique de dessins animés était jouée à la fin de chaque essai pour motiver l'enfant. De plus, le nombre de phrases dans chaque condition était fixe : chaque enfant entendait quatre phrases de la condition Assimilation, quatre de la condition Non-Assimilation, deux de la condition Familier et deux de la condition Nouveau. L'attribution des mots de test aux différentes conditions était contrebalancée à travers trois groupes de sujets.

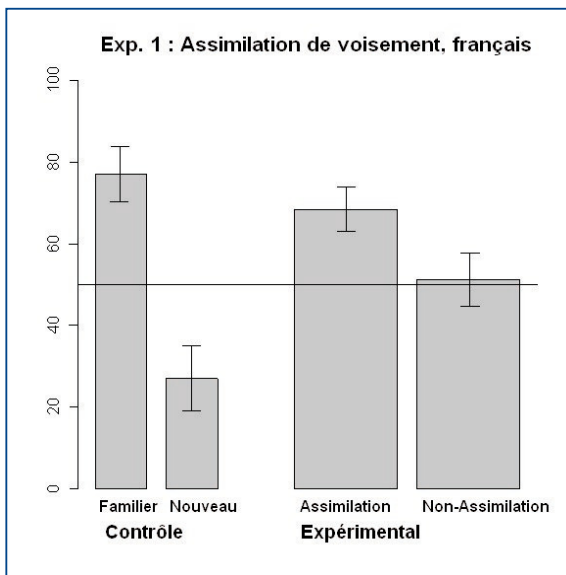
L'expérience durait entre cinq et 15 minutes au total.

## Sujets

Vingt-sept enfants français monolingues, 15 filles et 12 garçons, participaient à cette expérience. Ils avaient entre 29 et 36 mois (32 mois en moyenne). Les données de 28 enfants supplémentaires étaient exclues parce que ceux-ci n'atteignaient pas le critère d'entraînement ( $n=15$ ), ne finissaient pas la phase de test ( $n=5$ ), ne désignaient que d'un côté ( $n=1$ ) ou parce que plus de 50 % des essais de test étaient exclus (voir critères de rejet ci-dessous,  $n=7$ ).

## Résultats et Discussion

Basé sur le recodage des vidéos, nous avons rejeté tous les essais de test ou (1) l'enfant, l'expérimentatrice, et/ ou le parent parlaient pendant la présentation de la demande de pointage, (2) l'enfant ne désignait aucun objet spontanément, (3) l'enfant pointait trop tôt (avant la présentation du mot de test) ou désignait tous les deux objets (simultanément ou en alternant). Si plus de 50 % des essais devaient être exclus ainsi pour un enfant, l'entièreté de ses données rejetée. Dans l'échantillon final, 16 % des essais étaient exclus. Ensuite, les taux moyens de pointage vers l'objet connu dans les quatre conditions (voir figure 2) étaient calculés pour chaque enfant.



**Figure 2 :** Taux moyens de choix de l'objet connu par condition dans l'expérience 1. La largeur des barres est proportionnelle au nombre d'essais par condition. Les barres d'erreurs indiquent l'erreur standard de la moyenne, la ligne solide indique le niveau du hasard (50 %).

Dans les essais de contrôle, les enfants désignaient l'objet connu significativement plus souvent dans la condition Familier (moyenne 77,1 %) que dans la condition Nouveau (moyenne 26,9 %) dans un test Wilcoxon apparié avec correction pour continuité ( $V=156$ ,  $p < .01$ ). Cette bonne performance démontre qu'ils faisaient attention aux changements de voisement en fin de mot dans la phase de test. Dans les essais expérimentaux, les enfants désignaient l'objet connu significativement plus souvent dans la condition Assimilation (moyenne 68,5 %) que dans la condition Non-Assimilation (moyenne 51,2 %). Ces résultats démontrent que les enfants français de 2 ½ ans compensent déjà pour l'assimilation de voisement.

Afin d'analyser si la compensation pour l'assimilation change avec l'âge, nous avons calculé un score d'assimilation pour chaque enfant en soustrayant son score dans la condition Non-Assimilation de celui dans la condition Assimilation. Ces scores d'assimilation n'étaient pas corrélés avec l'âge dans un test Spearman ( $\rho = .07$ ,  $p = .74$ ), suggérant que l'effet de compensation ne change pas dans le groupe d'âge testé.

Dans l'expérience suivante, nous examinons si les enfants anglais du même âge compensent également pour l'assimilation de place d'articulation qui s'applique dans leur langue.

## Expérience 2 : Assimilation de place en Anglais

### Matériel

Dix-huit mots monosyllabiques qui finissaient par une consonne occlusive alvéolaire orale ou nasale (p. ex. *boat* « bateau », *pen* « stylo ») et qui étaient familiers aux enfants anglais de 2 ½ ans étaient sélectionnés pour la phase de test. Comme dans l'expérience 1, quatre phrases de test étaient construites pour chaque mot.

### Conditions expérimentales

**Assimilation :** *Can you find the pemplease?*  
 "Peux-tu montrer le stylo/ [pem], s'il te plaît?"

**Non-assimilation :** *Can you find the pemdear?*  
 "Peux-tu montrer le [pem], ma/mon chéri/e?"

### Conditions de contrôle

**Familier** : *Can you find the pen?* "Peux-tu montrer le stylo ?"

**Nouveau** : *Can you find the pem?* "Peux-tu montrer le [pem] ?"

Notons que, comme dans la première expérience, nous attendons que les enfants choisissent l'image familière plus souvent dans la condition Assimilation que dans la condition Non-Assimilation s'il/ elle compense pour l'assimilation. Nous attendons également qu'ils choisissent l'image de l'objet connu quand ils entendent la prononciation correcte, et l'image de l'objet inconnu quand ils entendent la forme assimilée hors contexte, s'ils font attention aux changements de place en fin de mot.

Comme pour l'expérience 1, des images colorées dépeignant les mots de test étaient appariées à des images d'objets inconnus. Pour la phase d'entraînement, dix mots supplémentaires finissant par des consonnes occlusives non-alvéolaires (p.ex. *lamb* « agneau », *soap* « savon ») et dix paires d'images étaient choisis et utilisés dans les conditions de contrôle uniquement.

Le matériel était enregistré par une locutrice de langue maternelle anglaise britannique dans un style de parole dirigée aux enfants. Comme pour la première expérience, elle enregistrerait aussi des phrases de présentation (p. ex. *This is a boat.* « Ceci est un bateau. »), du feedback, un récit-cadre et des phrases supplémentaires pour la familiarisation avec la tâche.

### Procédure

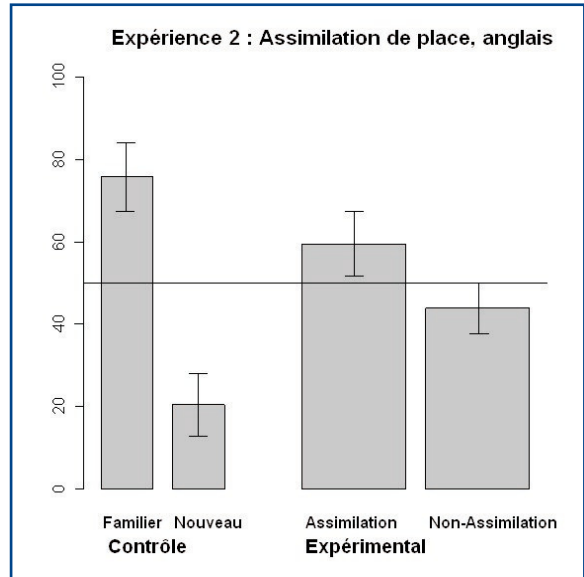
La procédure était la même que dans l'expérience 1, à la seule différence que 18 essais de test étaient présentés, au lieu de douze dans la première expérience.

### Sujets

Dix-huit enfants anglais monolingues, 11 filles et 7 garçons, participaient à cette expérience. Ils avaient entre 29 et 32 mois (30 mois en moyenne). Les données de 17 enfants supplémentaires étaient exclues parce que ceux-ci n'atteignaient pas le critère d'entraînement ( $n=8$ ), ne finissaient pas la phase de test ( $n=4$ ) ou parce que plus de 50 % des essais de test étaient exclus ( $n=5$ ).

## Résultats et Discussion

Basé sur les mêmes critères de recodage que dans l'expérience 1, nous avons rejeté 20,4 % des essais de test dans l'échantillon final. Ensuite, les taux moyens de pointage vers l'objet connu (voir Figure 3) étaient calculés et analysés comme pour l'expérience 1.



**Figure 3** : Taux moyens de choix de l'objet connu par condition dans l'expérience 2. La largeur des barres est proportionnelle au nombre d'essais par condition. Les barres d'erreurs indiquent l'erreur standard de la moyenne, la ligne solide indique le niveau du hasard (50 %).

Dans les essais de contrôle, les enfants désignaient l'objet connu significativement plus souvent dans la condition Familier (moyenne 75,9 %) que dans la condition Nouveau (moyenne 20,4 %,  $V=86$ ,  $p < .01$ ), suggérant qu'ils étaient sensibles aux changements de place en fin de mot. Dans les essais expérimentaux, les enfants désignaient l'objet connu significativement plus souvent dans la condition Assimilation (moyenne 59,6 %) que dans la condition Non-Assimilation (moyenne 43,8 %). Ces résultats démontrent que les enfants anglais de 2 ½ ans compensent déjà pour l'assimilation de place.

Les scores d'assimilation des enfants anglais dans cette expérience (moyenne 15,9 %) ne différaient pas significativement de ceux des enfants français dans l'expérience 1 (moyenne 17,3 %) dans un test Wilcoxon indépendant ( $W=237$ ,

$p=.90$ ), suggérant que les enfants français et anglais compensent pour les assimilations natives au même degré.

### Discussion générale

En utilisant une tâche de pointage d'images, nous montrons que ces enfants français et anglais de 2 ½ ans qui sont capables de discriminer des contrastes phonologiques subtils en fin de mot, sont aussi sensibles aux assimilations dans leurs langues natives respectives. Ils se comportent donc comme les locuteurs adultes des deux langues, qui montrent des effets d'assimilation similaires dans une tâche de détection de mots (Darcy et al. 2009), et dans des tâches d'amorçage intermodal (Marslen-Wilson et al. 1995, Snoeren et al. 2008a, 2008b). Cependant, les effets de compensation chez les jeunes enfants (autour de 15 %) sont moins importants que les effets chez les adultes (35 – 65 %, Darcy et al. 2009), probablement parce que nous avons dû utiliser moins d'essais et parce que les enfants sont moins concentrés sur la tâche.

C'est probablement à cause de la petite taille de nos effets que nous n'avons pas retrouvé dans nos expériences l'asymétrie entre les deux langues que Darcy et collègues (2009) décrivent chez les locuteurs adultes – dans cette étude, les locuteurs français compensent deux fois plus que les locuteurs britanniques (35 vs. 65 %).

Nous n'avons pas trouvé d'effet d'âge non plus, ce qui suggère que la compensation pour l'assimilation se développe avant l'âge testé. Les enfants sont donc sensibles aux assimilations avant 2 ½ ans, 5 ans plus tôt que démontré par des études précédentes (Marshall et al., soumis, Blomert et al. 2004). Il n'existe que peu d'études sur le développement d'autres règles phonologiques que l'on pourrait comparer à la nôtre sur l'assimilation. La compensation pour la liaison se développe plus tard – certains aspects ne sont pas acquis même à l'âge de 6 ans (Chevrot, Dugua & Fayol 2009, Dugua, Spinelli & Fayol, 2009). La sensibilité aux règles allophoniques, cependant, se développe déjà avant l'âge d'un an (Pegg & Werker 1997, Seidl et al. 2009). Il serait intéressant de tester des enfants plus jeunes pour savoir si les règles d'assimilation de l'anglais et du français sont acquises après les allophonies, comme postulé par Peperkamp & Dupoux (2002), car elles sont plus complexes et nécessitent le développement d'un lexique de formes de mots.

Malheureusement, la tâche de pointage est trop compliquée pour les enfants plus jeunes, mais d'autres méthodes, telles que le regard intermodal ou les potentiels évoqués, pourraient être utilisées.

Comme il a été étudié l'âge le plus jeune auquel les enfants compensent pour les assimilations natives déterminées, nous pourrions aussi tester si les enfants de cet âge compensent par des assimilations hypothétiques non-natives (comme l'assimilation de place en Français), afin d'étudier la question de l'état initial du système phonologique concernant les assimilations. Des études confrontant des locuteurs adultes à des assimilations qui n'existent pas dans leur langue (comme l'assimilation des liquides en Néerlandais) ont trouvé que ces locuteurs étaient en effet sensibles à ces assimilations non-natives (Gow & Im 2004, Mitterer et al. 2006). Néanmoins, les effets des assimilations natives étaient beaucoup plus importants que ceux des assimilations non-natives (Mitterer, Csepe & Blomert 2006, Darcy, Peperkamp & Dupoux 2007, Darcy et al. 2009). Ces données adultes suggèrent que la compensation pour l'assimilation repose et sur des mécanismes universels et sur des connaissances spécifiques à la langue en question. Il serait intéressant de comparer le développement de ces deux composantes chez les jeunes enfants.

### Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier la Fondation Fyssen pour son support, ainsi que Stuart Rosen pour son accueil à l'University College London. La première expérience était réalisée en tant que partie de mon projet de thèse, qui a été financée par le Ministère de l'Education Supérieure et de la Recherche français. Je remercie aussi ma directrice de thèse Sharon Peperkamp et ma collaboratrice Nivedita Mani, sans qui ces expériences n'auraient pas pu être réalisées, et tous les membres du Department of Speech, Hearing and Phonetic Sciences (UCL) et du Laboratoire de Sciences Cognitives et Psycholinguistique (EHESS-DEC(ENS)-CNRS) pour les discussions stimulantes.

### Bibliographie

- Blomert, L., Mitterer, H., & Paffen, C. (2004). In search of the auditory, phonetic, and/or phonological problems in dyslexia: context

effects in speech perception. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 47, 1030-1047.

- Chevrot, J., Dugua, C., & Fayol, M. (2009). Liaison acquisition, word segmentation and construction in French: a usage-based account. *Journal of Child Language*, 36, 557-596.

- Cho, Y.-M. T. (1999). *Parameters of Consonantal Assimilation*. München, Newcastle: Lincom Europa.

- Darcy, I., Peperkamp, S., & Dupoux, E. (2007). Bilinguals play by the rules: perceptual compensation for assimilation in late L2-learners. In J. Cole & J. Hualde (Eds.), *Laboratory Phonology 9* (pp. 411-442). Berlin: Mouton De Gruyter.

- Darcy, I., Ramus, F., Christophe, A., Kinzler, K., & Dupoux, E. (2009). Phonological knowledge in compensation for native and non-native assimilation. In F. Kügler, C. Féry & R. van de Vijver (Eds.), *Variation and Gradience in Phonetics and Phonology*. (pp. 265-309). Berlin: Mouton De Gruyter.

- Dugua, C., Spinelli, E., Chevrot, J., & Fayol, M. (2009). Usage-based account of the acquisition of liaison: Evidence from sensitivity to the singular/plural orientation of nouns. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102, 342-350.

- Garnica, O. (1973). The development of phonemic speech perception. In T. E. Moore (Ed.), *Cognitive Development and the Acquisition of Language* (pp. 215-221). New York: Academic Press.

- Gow, D. W., & Im, A. M. (2004). A cross-linguistic examination of assimilation context effects. *Journal of Memory and Language*, 51, 279-296.

- Kuhl, P. (1983). Perception of auditory equivalence classes for speech in early infancy. *Infant Behavior and Development*, 6, 363-285.

- Kuhl, P., Williams, K. A., Lacerda, F., Stevens, K. N., & Lindblom, B. (1992). Linguistic experience alters phonetic perception in infants by 6 months of age. *Science*, 255, 606-608.

- Marshall, C. R., Harcourt-Brown, S., Ramus, F., & van der Lely, H. K. J. (submitted). Do children with SLI and/ or dyslexia compensate for place assimilation? Insight into phonological grammar and representations.

- Marslen-Wilson, W., Nix, A., & Gaskell, G. (1995). Phonological variation in lexical access: abstractness, inference and English place assimilation.

*Language and Cognitive Processes*, 10, 285-308.

- Mitterer, H., Csépe, V., & Blomert, L. (2006). The role of perceptual integration in the recognition of assimilated word forms. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59, 1395-1424.

- Mitterer, H., Csépe, V., Honbolygo, F., & Blomert, L. (2006). The recognition of phonologically assimilated words does not depend on specific language experience. *Cognitive Science*, 30, 451-479.

- Nazzi, T., Jusczyk, P. W., & Johnson, E. K. (2000). Language discrimination by English-learning 5-month-old: Effects of rhythm and familiarity. *Journal of Memory and Language*, 43, 1-19.

- Pegg, J., E., & Werker, J. F. (1997). Adult and infant perception of two English phones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102, 3742-3753.

- Peperkamp, S., & Dupoux, E. (2002). Coping with phonological variation in early lexical acquisition. In I. Lasser (Ed.), *The Process of Language Acquisition* (pp. 359-385). Berlin: Peter Lang.

- Seidl, A., Cristià, A., Onishi, K. H., & Bernard, A. (2009). Allophonic and phonemic contrasts in infants' learning of sound patterns. *Language Learning and Development*, 5, 191-202.

- Snoeren, N. D., Ségui, J., & Hallé, P. A. (2008a). On the role of regular phonological variation in lexical access: Evidence from voice assimilation in French. *Cognition*, 108, 512-521.

- Snoeren, N. D., Ségui, J., & Hallé, P. A. (2008b). Perceptual processing of partially and fully assimilated words in French. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance*, 34, 193-204.

- Swingley, D., & Aslin, R. (2000). Spoken word recognition and lexical representation in very young children. *Cognition*, 76, 147-166.

- Swingley, D., & Aslin, R. N. (2002). Lexical neighborhoods and the word-form representations of 14-month-old. *Psychological Science*, 13, 480-484.

- Werker, J. F., & Tees, R. C. (1984). Cross-language speech perception: Evidence for perceptual reorganization during the first year of life. *Infant Behavior and Development*, 7, 49-63.

## Introduction

During the last decades, many psycholinguistic studies have shown that children adapt their perception to the sound categories of their mother tongue during the first year of life (eg. Werker & Tees 1984, Kuhl et al. 1992). Furthermore, their mental word form representations include as much phonetic detail as those of adults shortly after their first birthday (eg. Swingley & Aslin 2000, 2002).

However, few studies have focused on young children's processing of phonological variation, although it is ubiquitous in the speech signal that they hear. In fact, words are rarely uttered in isolation and in their citation form (the standard pronunciation, which is listed in a dictionary). In continuous speech, there are many pronunciation variants that differ according to speaker, dialect and phonological context. While some studies have examined the first two factors (eg. Kuhl 1983, Nazzi et al. 2000), we know very little about children's knowledge on context-dependent phonological alternations, such as assimilations.

English, for example, allows for the assimilation of the consonant place of articulation. This feature is normally distinctive, that is, the contrast between alveolar (eg. [n]) and labial (eg. [m]) consonants can differentiate two words (e.g. *nice* – *mice*). But in continuous speech, the place of articulation of one consonant can be adapted to that of the following consonant: an alveolar (like [n] in *ten*) can become labial (here, [m]) if it is followed by another labial, that is, the sequence *tenpounds* can be pronounced as *tempounds*. Darcy and colleagues (2009) report that English adults take into account these assimilations and their contexts during lexical access: they accept the pronunciation *tem* as a variant of the word *ten* more often in a sequences where assimilation is possible (eg. *tempounds*) than in sequences where it is not (eg. *temdollars*). Intermodal priming experiments confirm that English adults are sensitive to place assimilation (Marslen-Wilson, Nix & Gaskell 1995).

The languages of the world differ with respect to which assimilations they allow (for a typological review see Cho 1999). In French, for instance, the voicing feature, and not the place feature, is assimilated: a voiceless consonant (like [t] in *boite*) can become voiced (here, [d]) if it is followed

by another voiced consonant (like in *boite verte* → *boidverte*), and vice versa (*robe sale* → *ropsale*). Like their English counterparts, French adult speakers are sensitive to voicing assimilations in their native language (Snoeren, Segui & Halle 2008a, 2008b, Darcy et al. 2009).

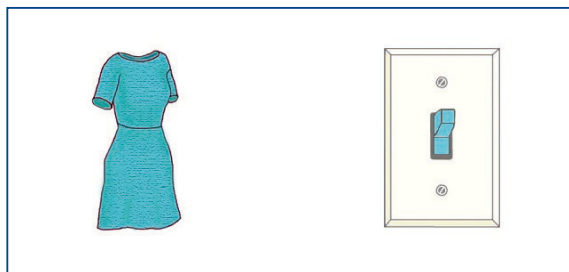
Since assimilations differ across languages, children must learn which ones apply in their native language. The development of compensation for assimilation has only been studied in school age children. English 7-year-old (Marshall et al., submitted) and Dutch 8-years-old (Blomert, Paffen & Mitterer 2004) show compensation effects for assimilation comparable to those found in adults. However, it seems plausible that compensation for assimilation could develop much earlier, as other studies show that American infants under one year of age already have some knowledge about allophonies (Pegg & Werker 1997, Seidl et al. 2009), another type of context-dependent phonological alternations.

The present study examines whether French and English 2 ½-year-old take into account assimilations permitted in their native language during lexical access. We use a child-friendly picture pointing task.

## Experiment 1: Voicing assimilation in French

### Materials

Twelve monosyllabic French words that ended with a voiced or voiceless obstruent (eg. *boite* “box”, *robe* “dress”) and that were familiar to French children of 2 ½ years were selected for the test phase. Twelve colorful images depicting the words were matched to twelve images of objects unknown to young children (eg. *astrolab*) of approximately the same size and visual complexity (for an example see Figure 1).



**Figure 1** : Example object pair (familiar: robe “dress”, left; unfamiliar: light switch, right)

For each word, four test sentences were constructed. In the experimental sentences, assimilated forms of the test words (eg. *boïd*, *rop*) were used either in a context where assimilation was possible (Assimilation condition) or in a context where it was not (Non-assimilation condition):

#### *Experimental conditions*

**Assimilation:** *Montre la boïdjuste ici!* "Point to the box/ [bwad] here"

**Non-assimilation:** *Montre la boïdmaintenant!* "Point to the [bwad] now"

Note that in the first case, if children are sensitive to assimilations, they can interpret the sequence *boïdjuste* as an assimilation of the word *boite* "box" and select the known object; but they would have to interpret the sequence *boïdmaintenant* as referring to a new word [bwad] in the second case.

In the control conditions, the test words were pronounced correctly (Familiar condition) or in the assimilated form (Novel condition) sentence-finally.

#### *Control conditions*

**Familiar:** *Montre la boite!* "Point to the box!"

**Novel:** *Montre la boïd!* "Point to the [bwad]!"

These sentences served as a control if children are sensitive to the voicing feature at the end of words. Note that here, we expect them to choose the familiar image when they hear the correct pronunciation (eg. *boite* "box"), and to the unknown image when they hear the assimilated form in isolation (eg. *boïd* [bwad]). For the training phase, ten more words (eg. *sac* "bag") and ten pairs of images were selected and used in the control conditions only.

The material was recorded by a native French speaker in child-directed speech, without breaks between assimilated forms and context. In addition to the sentences described above, the speaker also read presentation sentences with sentence-final correct pronunciations (*Ceci est une boite*. "This is a box.") and assimilated forms (*Et ça, c'est une boïd!* "And that's a [bwad]"), feedback sentences (*Très bien!* "Very good", *Tu es sûr?*

"Are you sure?"), a background story and twelve additional sentences for a familiarization phase with the task (eg. *Montre la balle!* "Point to the ball!").

#### **Procedure**

The child was seated in front of a computer screen, next to an experimenter who directed the experiment via mouse clicks. A parent could be present. The child was filmed from behind.

The background story asked the child to help a teddy bear to tidy his room, by pointing to the objects he had put into a closet. After a brief familiarization with the pointing task, the training phase began. Since it is difficult for young children to distinguish words with subtle word-final contrasts explicitly (Garnica 1973), they had to be trained to pay attention to voicing changes at the end of words. Training trials were structured as follows:

1. **Presentation:** The familiar object appeared on one side of the screen (randomly chosen). 1.5 seconds later, it was labelled by a presentation sentence (eg. *Ceci est un sac*. "This is a bag."). After its disappearance, this procedure was repeated for the unknown object on the other side of the screen.
2. **Pointing request:** The two objects reappeared side by side. After 1.5 seconds, a request sentence was played (eg. Novel condition: *Montre le sague!* 'Point to the [sag!]). Based on previous trials, the experimenter chose if it belonged to the familiar or the novel condition. The experimenter recorded the side to which the child pointed via mouse click.
3. **Feedback:** If the answer was correct, the child received positive feedback. Otherwise, the request sentence was repeated until the response is correct. After each trial, the experimenter decided whether to launch another request for the same object pair, or if she wanted to continue with a new pair.

If four out of five answers were correct at first try, the training ended and the child progressed to the test phase. Otherwise, the experiment ended after 15 training trials.

During the test phase, the experimenter wore headphones with masking voices so as not to hear the stimuli and not to influence the experiment. The twelve test trials followed the same structure



as training trials, except that there was no corrective feedback, but cartoon music was played at the end of each trial to motivate the child. Furthermore, the number of sentences in each condition was fixed: Each child heard four sentences in the Assimilation condition, four in the Non-Assimilation condition, two of the Familiar condition and two in the Novel condition, in random order. The allocation of test words to the different conditions was counterbalanced across three groups of subjects.

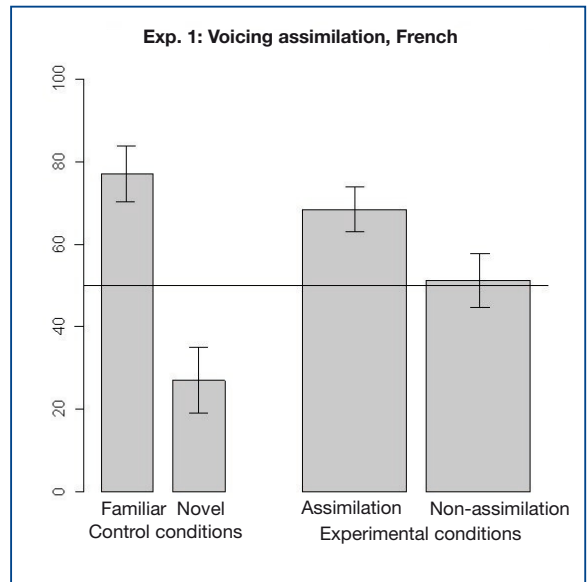
The experiment lasted between five and 15 minutes in total.

### Participants

Twenty-seven monolingual French children, 15 girls and 12 boys, participated in this study. They were between 29 and 36 months old (32 months on average). Data from 28 additional children were excluded because they did not reach the training criterion ( $n = 15$ ), did not finish the test phase ( $n = 5$ ), pointed only to one side ( $n = 1$ ), or because more than 50% of their test trials had to be excluded (see rejection criteria below,  $n = 7$ ).

### Results and Discussion

Based on video recoding, we rejected all test trials where (1) the child, the experimenter, and / or parent spoke during the presentation of the application scoring, (2) the child did not point spontaneously, (3) the child pointed too early (before presentation of the critical test word) or to both objects (simultaneously or alternately). If more than 50% of the trials were excluded for one child, his/ her entire data set was rejected. For the final sample, 16% of trials were excluded. Then, the mean proportion of pointing to the known object for the four conditions was calculated for each child (see Figure 2).



**Figure 2** : Mean percentage of choice of the familiar object in Experiment 1. Bar width is proportionate to the number of trials per condition. Error bars indicate standard error of the mean, the solid line represents chance performance (50%).

For the control conditions, the children pointed significantly more often to the known object in the Familiar condition (mean 77.1%) than the Novel condition (mean 26.9%) in a paired Wilcoxon test with continuity correction ( $V = 156$ ,  $p < .01$ ). This good performance demonstrates that they paid attention to voicing changes at the end of words in the test phase. In the experimental trials, children pointed significantly more often to the known object in the Assimilation condition (mean 68.5%) than in the Non-Assimilation condition (mean 51.2%). These results show that French children of 2 ½ years already compensate for voicing assimilation.

To analyze whether compensation for assimilation changes with age, we calculated an assimilation score for each child by subtracting the score in the Non-Assimilation condition from that in the Assimilation condition. These scores were not correlated to assimilate with age in a Spearman test ( $\rho = .07$ ,  $p = .74$ ), suggesting that the effect of compensation does not change within the age group tested.

In the next experiment, we examine whether English children of the same age also compensate for the assimilation of place of articulation that applies in their language.

## Experiment 2: Place assimilation in English

### Materials

Eighteen monosyllabic words that ended with an alveolar stop or nasal (eg. *boat*, *pen*) and that were familiar to English children of 2 ½ years were selected for the test phase. As in Experiment 1, four test sentences were constructed for each word.

#### Experimental conditions

**Assimilation:** *Can you find the pemplease?*

**Non-assimilation:** *Can you find the pemdear?*

#### Control conditions

**Familiar:** *Can you find the pen?*

**Novel:** *Can you find the pem?*

Note that, as in the first experiment, we expect children to choose the known object more often in Assimilation than in the Non-Assimilation condition, if they compensate for assimilation. We also expect that they choose the known object in the Familiar and the unknown object in the Novel condition, if they pay attention to word-final place changes.

As in Experiment 1, color images depicting the test words were paired with images of unknown objects. For the training phase, ten more words ending with non-alveolar consonants (eg. *lamb*, *soap*) and ten pairs of images were selected and used in controlled conditions only.

The material was recorded by a native British English speaker in fluent child-directed speech. As in the first experiment, she also recorded presentation sentences (eg. *This is a boat.*), feedback, a background story and additional sentences for familiarization with the task.

### Procedure

The procedure was the same as in Experiment 1, except that 18 test trials were presented, instead of twelve in the first experiment.

### Participants

Eighteen monolingual English children, 11 girls and 7 boys, participated in this experiment. They were between 29 and 32 months old (30 months on average). Data from 17 additional children were excluded because they did not reach the training criterion ( $n = 8$ ), did not finish

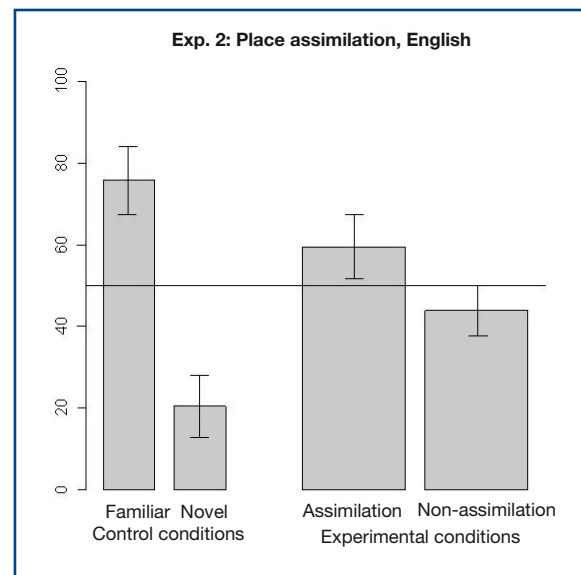
the test phase ( $n = 4$ ) or because more than 50% of their tests test were excluded ( $n = 5$ ).

### Results and Discussion

Based on the same recoding criteria as in Experiment 1, we rejected 20.4% of test trials in the final sample. Then, the mean proportions of pointing to the known object (see Figure 3) were calculated and analyzed as in Experiment 1.

For the control conditions, children pointed significantly more often to the known object in the Familiar condition (mean 75.9%) than the Novel condition (mean 20.4%,  $V = 86$ ,  $p < .01$ ), suggesting they were sensitive to word-final place changes. In the experimental trials, children pointed significantly more often to the known object in the Assimilation condition (mean 59.6%) than in the Non-Assimilation condition (mean 43.8%). These results demonstrate that English children 2 ½ years already compensate for place assimilation.

The assimilation scores of the English children in this experiment (mean 15.9%) did not differ significantly from those of French children in Experiment 1 (mean 17.3%) in an independent Wilcoxon test ( $W = 237$ ,  $p = .90$ ), suggesting that French and English children compensate for native assimilations to the same extent.



**Figure 3 :** Mean percentage of choice of the familiar object in Experiment 2. Bar width is proportionate to the number of trials per condition. Error bars indicate standard error of the mean, the solid line represents chance performance (50%).

## General Discussion

Using a picture pointing task, we show that English and French 2 ½-year-old who are capable of discriminating subtle phonological contrasts at the end of words are also sensitive to assimilations in their native language. They thus behave like adult speakers, who show similar assimilation effects in word detection (Darcy et al. 2009) and crossmodal priming tasks (Marslen-Wilson et al. 1995, Snoeren et al. 2008a, 2008b). However, compensation effects in young children (around 15%) are smaller than in adults (35-65%, Darcy et al. 2009), probably because we had to use fewer test trials and because children were less focused on the task than adults.

It is probably due to the small size of our effects that we did not replicate the asymmetry between French and English assimilation effects that Darcy and colleagues (2009) report for adult speakers - in this study, speakers French compensate twice as much as than British English speakers (35 vs. 65%).

We found no age effects, either, suggesting that compensation for assimilation develops before the age at which we tested. Thus, children are sensitive to assimilations by 2 ½ years, five years earlier than shown in previous studies (Marshall et al., submitted, Blomert et al. 2004). There are only few studies on the development of other phonological rules that could be compared to our assimilation studies. On one hand, compensation for the French *liaison* develops later - some aspects of this morpho-phonological phenomenon are not acquired even at the age of 6 years (Chevrot & Fayol Dugua 2009, Dugua, Spinelli & Fayol, 2009). On the other hand, sensitivity to allophonic rules already develops before the age of one year (Pegg & Werker 1997, Seidl et al. 2009). It would be interesting to test younger children in order to find out whether assimilations are acquired after allophonies, as postulated by Peperkamp & Dupoux (2002), because the

latter are more complex and require a word form lexicon. Unfortunately, our pointing task is too complicated for younger children, but other methods, such as eye gaze or electrophysiological measures, could be used.

In order to study the question of the initial status of assimilations in the phonological system, we could also test whether the children of this age compensate for hypothetical non-native assimilations (such as place assimilation in French), once the youngest age at which children compensate for native assimilation is determined. Studies comparing adult speakers' perception of assimilations that do not occur in their native language (such as liquid assimilation in Dutch speakers) found that these speakers indeed show some sensitivity for these non-native assimilations (Gow & Im, 2004 and Mitterer al. 2006). However, the effects for native assimilation were much larger than those for non-native assimilation (Mitterer, Csepe & Blomert 2006, Darcy, Peperkamp & Dupoux 2007, Darcy et al. 2009). These results suggest that adult compensation for assimilation relies both on universal and on language-specific mechanisms. It would be interesting to compare the development of these two components in young children.

## Acknowledgments

I would like to thank the Fyssen Foundation for their support and Stuart Rosen for hosting me at University College London. The first experiment was realised as part of my PhD project, which was funded by the French Ministry of Higher Education and Research. I also thank my PhD supervisor Sharon Peperkamp and my collaborator Nivedita Mani, without whom this study would not have been possible, and all members of the Department of Speech, Hearing and Phonetic Sciences (UCL) and the Laboratoire de Sciences Cognitives et Psycholinguistique (EHESS-DEC(ENS)-CNRS) for stimulating discussions.

# Rôle du sommeil dans la consolidation de la mémoire procédurale chez l'homme exploré à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Geneviève ALBOUY

## Résumé

De nombreuses études indiquent que le sommeil favorise la consolidation de la mémoire. L'exploration des mécanismes cérébraux permettant ces processus est importante pour mieux comprendre les fascinantes capacités humaines à mémoriser ainsi que les fonctions de cet état physiologique intrigant qu'est le sommeil. Nos travaux ont permis de mettre en évidence les mécanismes cérébraux conditionnant et supportant la consolidation, favorisée par le sommeil, des mémoires procédurales de séquences motrices chez l'homme. Nos résultats révèlent le rôle crucial de l'hippocampe dans ces processus et indiquent que le sommeil semble favoriser la restructuration des réseaux cérébraux permettant l'optimisation du comportement suite au processus de consolidation.

## Mots clés

Sommeil, Mémoire Procédurale, Apprentissage de Séquences Motrices, Consolidation Mnésique, IRMf, Hippocampe, Striatum, Homme

## Role of sleep in procedural memory consolidation in humans explored by functional magnetic resonance imaging (fMRI)

### Summary

There is now ample evidence indicating that sleep participates to memory consolidation. The exploration of the cerebral mechanisms underlying this process is thus crucial, if one wants to better understand the physiological determinants of such a fascinating human ability to “remember things”, as well as the functional contribution of this intriguing physiological state that is sleep. Our work has highlighted the neuronal mechanisms conditioning and supporting procedural motor sequence memory consolidation, which is facilitated by sleep in humans. Our findings reveal that the hippocampus plays a crucial role in these processes and indicate that sleep appears to promote the restructuration of cerebral networks, hence allowing behavioural optimisation during memory consolidation.

### Keywords

Sleep, Procedural Memory, Motor Sequence Learning, Memory Consolidation, fMRI, Hippocampus, Striatum, Humans

### Les différents systèmes de mémoire chez l'homme

La mémoire chez l'homme est composée de différents systèmes qui peuvent être dissociés de manière comportementale, fonctionnelle et même anatomique (Eichenbaum and Cohen, 2001). D'une part, la mémoire déclarative représente la mémoire des faits et des événements et

dépendrait principalement de l'intégrité de structures cérébrales temporales médiales incluant l'hippocampe (Eichenbaum, 2004). D'autre part, la mémoire procédurale concerne l'acquisition et la rétention des habiletés motrices, cognitives et perceptives (Cohen and Squire, 1980). En particulier, l'apprentissage d'habiletés motrices, par lesquels les mouvements du quotidien sont

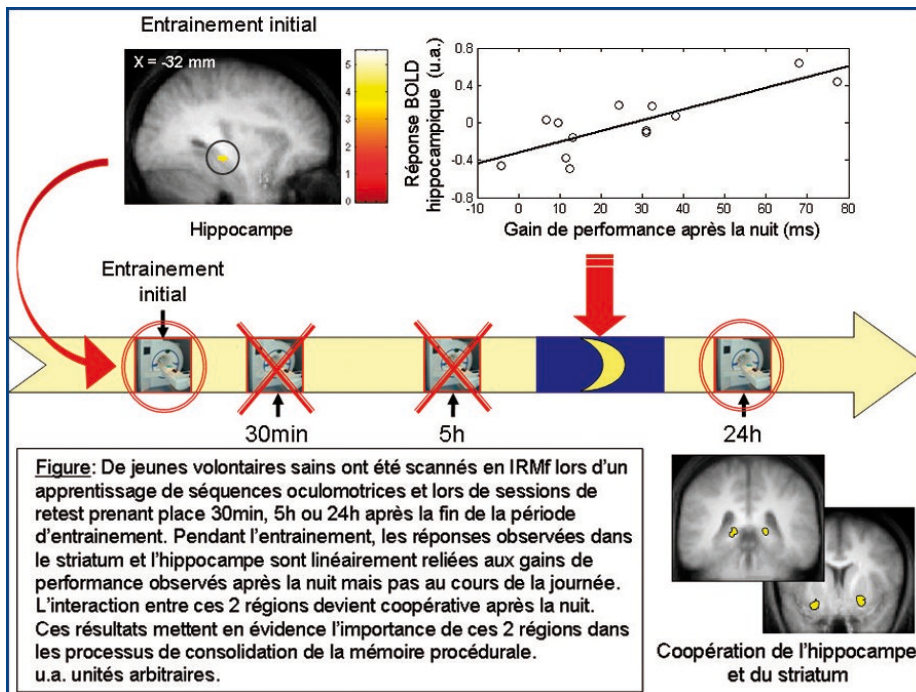
appris suite à une pratique répétée, recruterait davantage des réseaux cérébello- et striato-corticaux (Doyon et al., 2002 ; Doyon et al., 2003 ; Doyon and Benali, 2005). Toutefois, plusieurs travaux suggèrent que ces deux systèmes de mémoire (déclaratif et procédural) peuvent interagir (Poldrack et al., 2001). De fait, des études convaincantes ont montré que les systèmes à la fois hippocampiques et striataux peuvent être recrutés pendant un apprentissage procédural (Poldrack et al., 2001 ; Poldrack and Packard, 2003 ; Poldrack and Rodriguez, 2004). Par exemple, il a été montré que l'hippocampe pourrait être recruté pendant les apprentissages de séquences motrices, même si les participants ne connaissent pas de manière explicite la succession séquentielle des mouvements appris (Schenkel et al., 2003 ; Albouy et al., 2008 ; Albouy et al., Submitted).

### Consolidation de la mémoire procédurale

La consolidation de la mémoire réfère aux processus par lesquels une trace mnésique fragile récemment acquise devient plus stable. Pour la mémoire procédurale, la consolidation de l'apprentissage peut se traduire par la résistance de la trace mnésique à l'interférence créée par l'acquisition d'une nouvelle habileté motrice,

ainsi que par l'amélioration différée, appelée « offline » des performances entre les sessions de pratique sans entraînement supplémentaire (Maquet, 2001 ; Robertson et al., 2004a ; Doyon et al., 2009). Dans le cas d'apprentissage de séquences motrices, des gains de performance ont parfois été observés quelques heures après la fin de l'entraînement initial (Robertson et al., 2004b ; Press et al., 2005). Toutefois, dans la majorité des cas, ces gains de performance sont rapportés seulement après une période de sommeil nocturne (Korman et al., 2003 ; Robertson et al., 2004b ; Fischer et al., 2005 ; Walker et al., 2005) ou après une sieste (sommeil diurne) de 60 à 90 minutes (Korman et al., 2007 ; Nishida and Walker, 2007).

Les corrélats cérébraux de la consolidation mnésique des apprentissages de séquences motrices ont été explorés dans notre laboratoire, et nos résultats suggèrent que les phases précoces de l'apprentissage soient prises en charge par les réseaux cérébello- et striato-corticaux, tandis que la rétention à long terme des mémoires de séquences motrices utiliserait le circuit striato-cortical (Doyon et al., 2002 ; Doyon et al., 2003 ; Doyon and Benali, 2005). De plus, nous avons récemment mis en évidence, en utilisant une tâche de temps de réaction sériel oculomotrice (Albouy et



al., 2006), que les réponses cérébrales observées durant l'entraînement initial dans le striatum et l'hippocampe pouvaient prédire les mécanismes de consolidation menant à l'apparition de gains de performance après la nuit, mais pas après des périodes d'éveil (Albouy et al., 2008). Nos travaux, présentés dans la figure, montrent donc que le recrutement de l'hippocampe pendant l'apprentissage initial de séquences motrices semblerait conditionner spécifiquement les mécanismes de consolidation dépendants du sommeil de la mémoire de séquences motrices (Albouy et al., 2008). De manière intéressante, nous avons également pu mettre en évidence que le sommeil semble favoriser la restructuration des interactions fonctionnelles entre l'hippocampe et le striatum (Albouy et al., 2008).

### Rôle de l'hippocampe dans la consolidation de la mémoire procédurale

L'ensemble de nos travaux suggère que l'hippocampe joue un rôle de « marqueur » des populations neuronales qui participeraient aux mécanismes de consolidation de la mémoire séquentielle motrice pendant la nuit. Cette hypothèse concorde avec une récente étude comportementale décrivant des gains de performances dépendant du sommeil sur des apprentissages de séquences motrices, mais seulement si ceux-ci nécessitent la formation d'associations contextuelles (Spencer et al., 2006), phénomène dans lequel l'hippocampe jouerait un rôle central (Chun and Phelps, 1999) et plus particulièrement encore dans les apprentissages de séquences (Poldrack and Rodriguez, 2003). Le pré-requis cérébral de la consolidation dépendante du sommeil des apprentissages de séquences motrices consisterait donc en la création d'un « signal » hippocampique dans les phases initiales de l'apprentissage.

La signification fonctionnelle des réponses hippocampiques reste, cependant, encore incertaine. D'une part, l'activité neuronale dans l'hippocampe pourrait refléter sa capacité à associer des informations temporelles discontinues mais structurées (Schendan et al., 2003), et ainsi à « démêler » les séquences (Kumaran and Maguire, 2006) lors de la phase initiale de l'apprentissage séquentiel moteur. Ces réponses précoces favoriseraient donc la détection rapide du matériel séquentiel et permettraient la formation d'associations de ces éléments (Eichen-

baum, 2004) afin d'améliorer rapidement le comportement moteur dès les premières minutes de l'entraînement. D'autre part, compte-tenu du rôle de l'hippocampe dans le traitement des informations spatiales (Burgess, 2008), son implication dans les apprentissages de séquences motrices pourrait aussi refléter la nature spatiale de la tâche d'apprentissage. L'hippocampe pourrait ainsi participer à la création d'une carte allocentrique des séquences motrices pendant l'apprentissage initial.

L'hypothèse que l'hippocampe participe à la création d'une carte allocentrique des séquences motrices pourrait concorder et expliquer certains résultats récemment publiés dans la littérature. Tout d'abord, cette hypothèse pourrait expliquer l'observation de transferts de connaissance du matériel séquentiel appris à la main non-entraînée 48 heures après l'apprentissage initial (Korman et al., 2003). En effet, la carte allocentrique construite par l'hippocampe pendant l'entraînement initial et consolidée pendant la nuit serait indépendante de l'effecteur et permettrait le transfert de l'information séquentielle consolidée à un autre effecteur. Ensuite, il a récemment été montré que l'amélioration des performances motrices dans des coordonnées allocentriques (spatiales, extrinsèques) se développe spécifiquement après une période de sommeil, alors qu'elle se développe après une période d'éveil quand les coordonnées sont égocentriques (motrices, intrinsèques) (Cohen et al., 2005 ; Cohen and Robertson, 2007). En nous basant sur une analogie avec la mémoire spatiale (Doeller et al., 2008), il est donc possible de prédire que l'hippocampe et le striatum participeraient, respectivement, à la construction de cartes allocentrique et égocentrique pendant un apprentissage de séquences motrices. Il est aussi possible que la consolidation de la représentation allocentrique de la séquence dépende du sommeil, alors que celle de la représentation égocentrique dépende d'une période d'éveil.

### Conclusions

Le sommeil fait partie de notre vie quotidienne et chacun peut apprécier l'impact de sa restriction, devenue chronique dans nos sociétés, sur les activités de la vie courante en termes de performances cognitives, d'attention, de concentration, d'humeur et même d'habileté motrice. L'hypothèse que le sommeil soit favorable à la

consolidation des événements et des apprentissages régissant nos vies, de l'enfance à l'âge adulte, est fascinante.

L'ensemble de nos travaux a permis de mieux comprendre les mécanismes cérébraux conditionnant et supportant la consolidation, favorisée par le sommeil, des mémoires procédurales de séquences motrices grâce à des approches comportementales et de neuroimagerie (IRMf). De la synthèse des études multi-approches, que nous avons réalisée, émerge le rôle majeur et inattendu de l'hippocampe dans les processus de consolidation dépendant du sommeil, de la mémoire procédurale mais également l'impact du sommeil sur la restructuration des réseaux cérébraux permettant l'optimisation des comportements moteurs séquentiels à long terme. Nous croyons que nos travaux constituent une importante avancée conceptuelle dans le domaine de la compréhension du rôle du sommeil dans les mécanismes de consolidation de la mémoire procédurale, et que ces derniers ouvrent un nouveau champ de recherche, encore vierge et d'autant plus excitant, sur le rôle de l'hippocampe dans ces processus.

## Références

- Albouy G., Ruby P., Phillips C., Luxen A., Peigneux P., Maquet P. (2006) Implicit oculomotor sequence learning in humans: Time course of offline processing. *Brain Res* 1090 :163-171.
- Albouy G., Sterpenich V., Balet E., Vandewalle G., Desseilles M., Dang-Vu T., Darsaud A., Ruby P., Luppi P. H., Degueldre C., Peigneux P., Luxen A., Maquet P. (2008) Both the hippocampus and striatum are involved in consolidation of motor sequence memory. *Neuron* 58 :261-272.
- Albouy G., Sterpenich V., Vandewalle G., Darsaud A., Gais S., Rauchs G., Desseilles M., Boly M., Dang-Vu T., Balet E., Degueldre C., Phillips C., Luxen A., Maquet P. (Submitted) Neural Correlates of Performance Variability during Motor Sequence Learning.
- Burgess N. (2008) Spatial cognition and the brain. *Ann N Y Acad Sci* 1124 :77-97.
- Chun M. M., Phelps E. A. (1999) Memory deficits for implicit contextual information in amnesic subjects with hippocampal damage. *Nat Neurosci* 2 :844-847.
- Cohen D. A., Robertson E. M. (2007) Motor sequence consolidation: constrained by critical time windows or competing components. *Exp Brain Res* 177 :440-446.
- Cohen D. A., Pascual-Leone A., Press D. Z., Robertson E. M. (2005) Off-line learning of motor skill memory: a double dissociation of goal and movement. *Proc Natl Acad Sci U S A* 102 :18237-18241.
- Cohen N. J., Squire L. R. (1980) Preserved learning and retention of pattern-analyzing skill in amnesia: dissociation of knowing how and knowing that. *Science* 210 :207-210.
- Doeller C. F., King J. A., Burgess N. (2008) Parallel striatal and hippocampal systems for landmarks and boundaries in spatial memory. *Proc Natl Acad Sci U S A* 105 :5915-5920.
- Doyon J., Benali H. (2005) Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Curr Opin Neurobiol* 15 :161-167.
- Doyon J., Penhune V., Ungerleider L. G. (2003) Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia* 41 :252-262.
- Doyon J., Song A. W., Karni A., Lalonde F., Adams M. M., Ungerleider LG (2002) Experience-dependent changes in cerebellar contributions to motor sequence learning. *Proc Natl Acad Sci U S A* 99 :1017-1022.
- Doyon J., Bellec P., Amsel R., Penhune V., Monchi O., Carrier J., Lehericy S., Benali H. (2009) Contributions of the basal ganglia and functionally related brain structures to motor learning. *Behav Brain Res* 199 :61-75.
- Eichenbaum H. (2004) Hippocampus: cognitive processes and neural representations that underlie declarative memory. *Neuron* 44 :109-120.
- Eichenbaum H., Cohen N. J. (2001) From Conditioning to Conscious Recollection: Memory Systems of the Brain. New-York : Oxford University Press.
- Fischer S., Nitschke M. F., Melchert U. H., Erdmann C., Born J. (2005) Motor memory consolidation in sleep shapes more effective neuronal representations. *J Neurosci* 25 :11248-11255.
- Korman M., Raz N., Flash T., Karni A. (2003) Multiple shifts in the representation of a motor sequence during the acquisition of skilled performance. *Proc Natl Acad Sci U S A* 100 :12492-12497.

- Korman M., Doyon J., Doljansky J., Carrier J., Dagan Y., Karni A. (2007) Daytime sleep condenses the time course of motor memory consolidation. *Nat Neurosci* 10 :1206-1213.
- Kumaran D., Maguire E. A. (2006) The dynamics of hippocampal activation during encoding of overlapping sequences. *Neuron* 49 :617-629.
- Maquet P. (2001) The role of sleep in learning and memory. *Science* 294 :1048-1052.
- Nishida M., Walker M. P. (2007) Daytime naps, motor memory consolidation and regionally specific sleep spindles. *PLoS ONE* 2 :e341.
- Poldrack R. A., Packard M. G. (2003) Competition among multiple memory systems: converging evidence from animal and human brain studies. *Neuropsychologia* 41 :245-251.
- Poldrack R. A., Rodriguez P. (2003) Sequence learning: what's the hippocampus to do? *Neuron* 37 :891-893.
- Poldrack R. A., Rodriguez P. (2004) How do memory systems interact? Evidence from human classification learning. *Neurobiol Learn Mem* 82 :324-332.
- Poldrack R. A., Clark J., Pare-Blagoev E. J., Shohamy D., Creso Moyano J., Myers C., Gluck M. A. (2001) Interactive memory systems in the human brain. *Nature* 414 :546-550.
- Press D. Z., Casement M. D., Pascual-Leone A., Robertson E. M. (2005) The time course of off-line motor sequence learning. *Brain Res Cogn Brain Res*.
- Robertson E. M., Pascual-Leone A., Miall R. C. (2004a) Current concepts in procedural consolidation. *Nat Rev Neurosci* 5 :576-582.
- Robertson E. M., Pascual-Leone A., Press D. Z. (2004b) Awareness modifies the skill-learning benefits of sleep. *Curr Biol* 14 :208-212.
- Schendan H. E., Searl M. M., Melrose R. J., Stern C. E. (2003) An fMRI study of the role of the medial temporal lobe in implicit and explicit sequence learning. *Neuron* 37 :1013-1025.
- Spencer R. M., Sunm M., Ivry R. B. (2006) Sleep-dependent consolidation of contextual learning. *Curr Biol* 16 :1001-1005.
- Walker M. P., Stickgold R., Alsop D., Gaab N., Schlaug G. (2005) Sleep-dependent motor memory plasticity in the human brain. *Neuroscience* 133 :911-917.

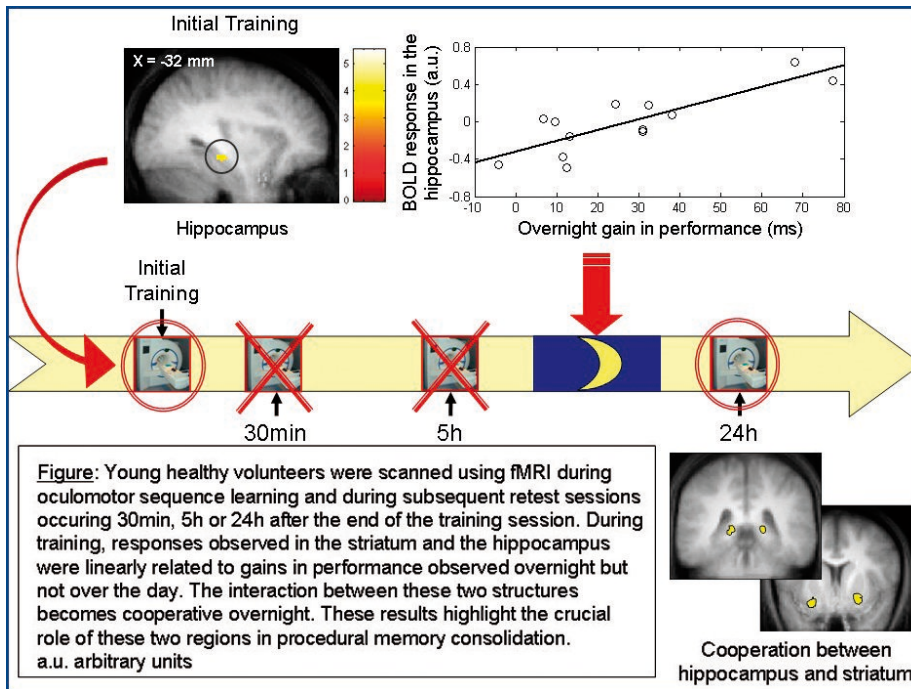
## Different memory systems in humans

Memory in humans are composed of different systems that can be behaviourally, functionally and anatomically dissociated (Eichenbaum and Cohen, 2001). On one hand, declarative memory refers to memory for facts and events and is known to depend mainly on the integrity of the medio-temporal lobe structures including the hippocampus (Eichenbaum, 2004). On the other hand, procedural memory refers to the acquisition and retention of motor, perceptual and cognitive skills (Cohen and Squire, 1980). More specifically, motor skill learning, through which daily movements are learned with repeated practice, is thought to rely more heavily on activity within cerebello- and striato-cortical networks (Doyon et al., 2002; Doyon et al., 2003; Doyon and Benali, 2005). However, there is compelling data supporting the idea that these two memory systems (declarative and procedural) do interact with each other (Poldrack et al., 2001). Indeed, there is now increasing evidence that both the hippocampal and striatal systems are recruited together during procedural learning (Poldrack et al., 2001; Poldrack and Packard, 2003; Poldrack and Rodriguez, 2004). It has been shown, for example, that the hippocampus is recruited during motor sequence learning, even when participants do not present explicit awareness of the sequential succession of learned movements (Schendan et al., 2003; Albouy et al., 2008; Albouy et al., Submitted).

## Procedural memory consolidation

Memory consolidation refers to the process by which a fresh and newly acquired memory trace becomes more stable and fixed into the physical structure of the brain through a cascade of events occurring at both cellular and systems levels. With respect to procedural memory, the occurrence of such phenomenon can be inferred based on evidence that the memory trace has become resistant to the interference caused by the acquisition of a new motor skill, for example, and by delayed offline gains in performance occurring between practice sessions without further training (Maquet, 2001; Robertson et al., 2004a; Doyon et al., 2009). In the case of motor sequence learning, gains in performance have sometimes been observed a few hours after the end of an initial training session (Robertson et al., 2004b; Press et al., 2005). In most instances, however,





such gains in performance have only been observed after a period of nocturnal sleep (Korman et al., 2003; Robertson et al., 2004b; Fischer et al., 2005; Walker et al., 2005) or after a daytime nap of 60 to 90 minutes (Korman et al., 2007; Nishida and Walker, 2007).

Cerebral correlates of motor sequence memory consolidation have been explored in our laboratory and our findings show that the early phases of learning recruit cerebello-cortical networks while the long-term retention of motor sequence memories would rather depend on striato-cortical networks (Doyon et al., 2002; Doyon et al., 2003; Doyon and Benali, 2005). Furthermore, we have recently shown, using an oculomotor serial reaction time task (Albouy et al., 2006), that cerebral responses observed in the striatum and the hippocampus during initial training could predict consolidation processes leading to the emergence of overnight gain in performance that were not observed over the day (Albouy et al., 2008). Our results, presented in the accompanying figure, show that the recruitment of the hippocampus during initial motor sequence learning does specifically condition sleep-dependent motor sequence memory consolidation (Albouy et al., 2008). Interestingly, our results show that sleep fosters the restructuration of the functional interactions between the

hippocampus and the striatum during the consolidation process (Albouy et al., 2008).

### Role of the hippocampus in procedural memory consolidation

Our work suggests that activity in the hippocampus might act as a tag for the neuronal population that would participate to motor sequence memory consolidation during the night. This hypothesis concords with a recent behavioural study that reported sleep-dependent gains in performance after motor sequence learning, but only when learning necessitates the creation of contextual associations (Spencer et al., 2006), a phenomenon that is highly dependent upon the hippocampal formation (Chun and Phelps, 1999) and that is especially elicited during sequence learning (Poldrack and Rodriguez, 2003). Thus our findings strongly advocate that one cerebral prerequisite for sleep-dependent motor sequence memory consolidation consists in the creation of an hippocampal «signal» during initial learning.

However, the functional significance of such hippocampal responses still remains unclear. On one hand, activity in the hippocampus could reflect its ability to associate temporally discontinuous but structured information (Schendan et al., 2003), hence helping to disentangle event

sequences (Kumaran and Maguire, 2006) in the initial phase of motor sequence learning. Such early responses could facilitate the detection of the sequential material to be learned, and would then allow the association of these elements (Eichenbaum, 2004) in order to improve drastically motor behaviour right at the beginning of the training session. On the other hand, in view of the role of the hippocampus in spatial processing (Burgess, 2008), its implication in motor sequence learning could reflect the spatial nature of the task. The hippocampus could thus participate to the creation of an allocentric map of motor sequence during initial learning.

The hypothesis that the hippocampus would participate to the building up of an allocentric map of the motor sequence could concord and explain some recently published data in the literature. First, such a map could account for the transfer of sequence knowledge to the untrained hand that is seen 48 hours after initial training (Korman et al., 2003). Indeed, the allocentric map built by the hippocampus during initial training and consolidated during the night would be effector-independent and would favour the transfer of the consolidated sequential information to another effector. Second, it has recently been shown that the improvement in motor performance in allocentric coordinates (spatial, extrinsic) specifically develops overnight, whereas it develops over a period of wake when the coordinates are egocentric (motor, intrinsic) (Cohen et al., 2005; Cohen and Robertson, 2007). Based on an analogy with spatial memory (Doeller et al., 2008), we are now testing the hypothesis that the hippocampus and the striatum do participate,

respectively, to the building of allocentric and egocentric maps of motor sequences during learning. Yet consolidation of the allocentric representation of the sequence would depend on sleep, while the consolidation of the egocentric representation would depend on wake.

## Conclusions

Sleep is part of our everyday life and everyone can appreciate the impact of its restriction, which has become chronic in our society, on the everyday activities in terms of cognitive performance, attention, concentration, mood and motor skills. The hypothesis that sleep favours consolidation of events and learning governing our lives, from childhood to adulthood, is fascinating.

Based on our results from behavioral and neuroimaging approaches, we believe that our work provides a better comprehension of the neural correlates that condition and underlie sleep-dependent procedural motor sequence memory consolidation. Importantly, from this short review emerges an unexpected and crucial role of the hippocampus in sleep-dependent procedural memory consolidation as well as an effect of sleep on the restructuration of the cerebral networks leading to motor sequence behavior optimization in the course of consolidation.

Our line of research constitutes an important conceptual advance for understanding the role of sleep in the mechanisms of procedural memory consolidation, and open a new field of research, still virgin and all the more exciting, on the role of the hippocampus in this biological process.

# Neuro-topographie des effets de fréquence lexicale et de longueur de mots au cours d'une tâche d'écriture

## Participation du cortex prémoteur dorsal gauche au buffer graphémique

Olivier DUFOR

### Résumé

Les composantes centrales de l'écriture et du buffer graphémique peuvent être étudiées via l'utilisation des effets de fréquence lexicale et de longueur de mots. Dans l'écriture, les premiers révèlent l'organisation de notre mémoire à long terme des représentations orthographiques tandis que les seconds sont représentatifs du système de mémoire de travail. À l'aide d'une tâche d'écriture sous la dictée en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), nous avons révélé un réseau distribué d'aires cérébrales hautement différenciées de part leur sensibilité respective à ces effets.

### Mots-clefs

Écriture, buffer graphémique, fréquence lexicale, longueur, IRMf

## The neurotopography of length and frequency effects in written production

### Role of the left premotor dorsal cortex in graphemic buffer substrates

### Abstract

The central components of writing and graphemic buffer can be studied via/through the use of lexical frequency effects and word length. In writing, the former reveals the organization of our long-term memory of orthographic representations while the latter is representative of the working memory system. Using a spelling task in functional magnetic resonance imaging (fMRI), we revealed a distributed network of cerebral areas highly differentiated by their respective sensitivity to these effects.

### Keywords

Writing, graphemic buffer, lexical frequency, length, fMRI

### Introduction

L'écriture joue un rôle important dans notre quotidien. Écrire une lettre ou un e-mail, remplir un chèque ou noter un rendez-vous, elle nous est indispensable chaque jour. Malheureusement, il n'est pas rare qu'à la suite d'accidents vasculaires cérébraux ou de traumatismes crâniens, ses fonctions soient touchées. Dès lors ce qui constituait la routine du quotidien devient une épreuve parfois insurmontable. Ces atteintes de l'écriture portent

le nom d'agraphies ou dysgraphies et sont généralement prises en charge par la rééducation, cependant on sait encore peu de chose sur les fonctions des bases neuronales altérées dans ces pathologies. À l'aide de l'IRM fonctionnelle, nous nous sommes intéressés aux questions suivantes : 1°) Quels sont les substrats neuronaux des processus centraux de l'écriture, sensibles à la variation de fréquence lexicale ? Et 2°) Quels sont ceux des processus sensibles aux variations de longueur ?

## L'architecture cognitive de l'écriture

En science cognitive, il est classique d'imaginer qu'un déficit de l'écriture est consécutif de l'atteinte d'une ou plusieurs de ses composantes ; fonction mentale d'un système plus complexe qui donne naissance à l'écriture. Les processus centraux et périphériques forment des sous-ensembles de composantes. Les processus centraux permettent la récupération de l'orthographe correcte du mot à partir du lexique orthographique qui constitue une forme de mémoire à long terme des mots que nous connaissons et qui nous sont familiers. Cette forme abstraite est alors maintenue active dans une mémoire de travail que nous appelons buffer graphémique. Ce dernier élément est crucial dans le maintien de l'identité des graphèmes (ou lettres abstraites) et de leurs positions respectives dans le mot. Les processus périphériques rassemblent les composantes en aval du buffer graphémique dans les modèles cognitivistes. Ils ne sont généralement pas communs entre l'écriture et la lecture. On dénombre au moins deux niveaux de processus périphériques : le système allographique et celui de la planification motrice connu sous le nom de niveau graphomoteur. La composante allographique a pour rôle principal d'assigner à la représentation abstraite, contenue dans le buffer graphémique, sa forme désirée appelée allographe (a, A, a, A). Elle intègre tout particulièrement les notions de casse (haut de casse ou majuscule et bas de casse ou minuscule) et de script (écriture cursive ou d'imprimerie). Dès lors que la forme est sélectionnée, une représentation de la séquence graphomotrice (direction, nombre de traits) va pouvoir être choisie et se traduire en termes de plan moteur. Il faut noter qu'au stade du buffer graphémique, la représentation graphomotrice est toujours indépendante de l'effecteur qui devra la produire. Et ce n'est que lorsque l'effecteur sera connu (la main par exemple) que les commandes neuromusculaires mettront nos muscles en action.

En neuroimagerie, les études sur la production écrite restent encore assez rares. D'autant plus si on recherche parmi celles-ci les quelques unes qui s'attachent à distinguer les processus centraux des processus périphériques. Dans l'une de ces études, (Beeson et al., 2003), les auteurs ont utilisé trois tâches simples qu'ils ont contrasté les unes avec les autres pour isoler chaque compo-

sante. Les composantes les plus centrales ont été retrouvées lorsque qu'une tâche d'écriture de l'alphabet était soustraite à une autre tâche d'écriture de mots. L'analyse des substrats neuronaux d'un tel contraste a révélé l'implication des régions frontales inférieures et moyennes gauches (BA 45/47 et BA 46/10) ainsi que la jonction temporo-occipitale gauche au niveau de l'aire BA 37. Plus généralement ils ont également démontré par un contraste plus permissif (écriture de mots – tracé de cercles) que l'ensemble des régions cérébrales impliquées dans le processus se situait principalement dans l'hémisphère gauche. Les auteurs font l'hypothèse que les régions supplémentaires qui apparaissent dans ce contraste sont responsables de processus plus périphériques dans le système de l'écriture. Parmi celles-ci on note la présence du cortex fronto-dorsal gauche dans la région de Brodmann n° 6 (BA6) et du cortex pariétal supérieur gauche dans l'aire BA7.

Ces résultats révèlent un réseau important d'aires cérébrales dont la localisation est en accord avec les études lésionnelles sur l'agraphie (Roeltgen, 1993). Des données similaires ont été obtenues par d'autres équipes de recherche et reproduisent fréquemment ce résultat même si parfois les tâches qui servent de contrôle n'ont pas exactement les mêmes propriétés, dénomination d'objets, répétition de mots, lecture de mots, tâche motrice. (Katanoda et al., 2001 ; Sugihara et al., 2006 ; Longcamp et al., 2003 ; Roux et al., 2009 etc.).

Deux autres études (Rapp & Hsieh 2002, Hsieh & Rapp 2004 ; Rapp & Lipka, 2010), mettent en avant un paradigme original permettant de tester certaines composantes de l'écriture en évitant de faire intervenir la main. Dans leurs expériences, ces auteurs utilisent une tâche qui consiste à dire si une lettre présentée visuellement appartenait ou non au mot préalablement entendu (condition SPELL). La tâche contrôle de cette dernière étant de dire si la lettre visuellement présentée était en majuscule ou en minuscule (condition CASE). Le résultat du contraste des deux conditions révèle les processus centraux car la condition CASE ne nécessite pas, d'un point de vue cognitif, que les participants se remémorent l'orthographe du mot entendu et ne demande pas non plus que celui-ci soit stocké en mémoire de travail le temps de prendre une décision. Les

auteurs obtiennent alors les mêmes régions que celles de l'étude de Beeson et al., 2003 mais cette fois ci, toutes les aires incluses dans le contraste général (écriture de mots – tracé de cercles) apparaissent comme appartenant aux processus centraux. Ainsi et selon cette étude, le cortex pariétal gauche et le cortex fronto-dorsal de l'hémisphère gauche font désormais partie des aires qui soutiennent certains des processus centraux de l'écriture. Les auteurs présentent les fonctions de ces régions comme révélatrices du lexique orthographique de sortie et du buffer graphémique. Dans l'étude de Beeson en 2003, le contraste qui permet d'isoler les processus périphériques de l'écriture consiste à soustraire la tâche d'écriture de l'alphabet à celle de tracé de cercle. Ce faisant, les auteurs trouvent une région plus antérieure du lobe pariétal de l'hémisphère gauche à la jonction de BA7 et BA5. Ce n'est pas la région activée dans l'étude de Rapp & Hsieh ni celle active dans le contraste mettant en jeu les tâches d'écriture et de tracé de cercles. Les auteurs suggéreront malgré tout que cette partie de notre cortex est importante dans la planification et l'exécution motrice spécifique des lettres et y associeront la région frontale prémotrice dorsale dont l'activité fluctue avec les différents contrastes sans jamais être ni présente ni absente.

Nous avons publié en 2009 une étude (Roux et al., 2009) qui montre que la région prémotrice gauche (BA6) est impliquée dans l'écriture en utilisant la double approche neurochirurgie et neuroimagerie. En soustrayant une tâche de répétition à celle d'écriture (tâche d'intérêt), et en masquant cette analyse par des contrastes moteurs pour les mouvements générés par la main (tracé de cercle) et par la bouche (répétition de syllabes), nous avons pu démontrer que seul le cortex fronto-dorsal de l'hémisphère gauche est spécifique des processus centraux de l'écriture vis-à-vis de ceux de la répétition.

En chirurgie il nous est apparu que cette même région (anciennement connue sous le nom d'aire d'Exner) était responsable d'un arrêt de l'écriture lorsqu'elle était soumise à une stimulation. Pourtant, les patients pouvaient toujours bouger leur main. Ce deuxième point indique que l'information traitée dans cette région est indispensable à l'écriture mais dissociée du processus moteur quand celui-ci n'est pas consacré au tracé de lettres.

Enfin, tant les données d'IRMf que celles de chirurgie incluent des participants gauchers. Or chez ces derniers l'aire observée comme étant indispensable à l'écriture est également située dans l'hémisphère gauche. Ce dernier point vient renforcer l'idée que cette région serait plutôt « effecteurs indépendante » tout comme le démontre une analyse en conjonction chez le groupe des participants droitiers lorsque ceux-ci ont eu à écrire les mots avec leur main droite puis leur main gauche. Les régions pariétales supérieures, révélées par les autres études et qui n'apparaissent pas dans cette dernière, auraient été supprimées au moment de la création du contraste soit par l'utilisation de la tâche de répétition, soit par l'utilisation des masques générés pour les conditions contrôles.

L'hypothèse a été émise que, parmi les processus centraux, l'un de ceux qui pouvait réellement montrer un différentiel d'activité entre l'écriture et la répétition était le buffer graphémique (Caramazza et al., 1996). Et la nature abstraite et amodale de l'information traitée par la région frontale sont un faisceau d'arguments intéressants quant à son intervention possible dans le rôle du buffer graphémique ou d'une partie de celui-ci. Dans cet article nous proposons une nouvelle approche de l'étude des processus centraux de l'écriture et des substrats neuronaux du buffer graphémique en interrogeant ces derniers via l'utilisation de deux marqueurs qui leurs sont respectivement spécifiques : les effets de **fréquence lexicale** et les effets de **longueur**. Nous avons utilisé l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle chez un groupe de participants adultes sains et droitiers (n = 8) au cours d'une tâche d'écriture.

## Méthodologie

### « Longueur et fréquence dans le processus d'écriture »

Huit participants adultes ont été inclus dans cette première expérience. Tous étaient droitiers, de langue maternelle anglaise et sans troubles neurologiques. Après un examen des capacités en dictée, nous les avons inclus au protocole en IRMf.

### Écriture

La tâche expérimentale débute par une croix de fixation (500ms) puis apparaît une consigne à l'écran pouvant être « SPELL », « ALPHABET »

ou « CIRCLE » (1000ms). À la suite de cette consigne visuelle, un mot est entendu par le participant. Ce mot est suivi d'un son qui donne le signal de départ pour réaliser la tâche. À partir de ce son le participant dispose de 6 secondes, soit pour écrire le mot entendu en capitales d'imprimerie (SPELL), soit pour écrire l'alphabet en commençant par la lettre A, soit pour tracer des cercles disjoints. À chaque essai, les participants ont 6 secondes pour écrire le mot, les lettres ou tracer les cercles. Cette durée est calculée pour que les participants puissent écrire autant de lettres en répétant les mots courts que les mots longs (e.g. : fork fork = computer). La fin du temps imparti (6 sec) est marquée par la réapparition de la croix de fixation pour l'essai suivant. Le participant sait qu'il doit lever le crayon même s'il n'a pas fini d'écrire un mot.

Quatre sessions incluant les conditions décrites ci-dessus ont été réalisées. Chaque session comprenait 16 blocs de 6 essais alternant de manière randomisée les différentes consignes. Au sein de chaque bloc, la répartition des mots de haute et basse fréquence ainsi que celle des mots longs et courts étaient connues et ont pu être analysées.

### Matériel

Nous avons utilisé 192 mots. La moitié correspond à des mots courts (4 lettres) et l'autre moitié à des mots longs (8 lettres). Parmi les mots longs et courts, nous avons fait en sorte que la moitié soit de haute fréquence (> 50 par millions d'occurrences, Kucera et Francis 1967) et l'autre de basse fréquence (< 3 par millions d'occurrences, Kucera et Francis 1967).

### Paramètres d'imagerie

Les données d'IRM ont été acquises sur une caméra 1.5T au F.M. Kirby Research Center for Functional Brain Imaging at the Kennedy Krieger Institute (Baltimore, MD).

### Analyse des données

Toutes les analyses d'imagerie ont été réalisées avec le logiciel Brain Voyager QX (Maasricht, Netherlands). Les images fonctionnelles ont été corrigées sur le temps d'acquisition, réalignées, ré-échantillonnées et normalisées dans l'espace de Talairach. Enfin nous avons appliqué un lissage gaussien de 8 mm isotropique.

Nous avons utilisé un masque permettant d'exclure essentiellement les ventricules cérébraux et le squelette autour du cerveau.

## Résultats

Dans un premier temps ont été analysées les activations induites par la tâche d'écriture de mots sous la dictée (tous types confondus : longs, courts, de haute et de basse fréquence). Ensuite, ont été soustraites à celles-ci les activations induites par la tâche de tracé de cercles dans le but de délimiter un réseau de l'écriture propre à notre groupe de participants dans lequel nous avons conduit des analyses plus fines sur les effets de fréquence et de longueur.

Ces résultats montrent l'implication d'un vaste réseau d'aires corticales et sous-corticales. Ce réseau d'activations très larges présente la caractéristique d'être quasi-exclusivement concentré dans l'hémisphère gauche. Il comprend des régions frontales, pariétales et temporo-occipitales fréquemment retrouvées dans les études d'imageries sur l'écriture. Ceci qu'il s'agisse des systèmes de langues alphabétiques (voir par exemple Beeson et al., 2003) mais également dans les systèmes idéographiques lorsqu'ils permettent de manipuler des phonogrammes comme le japonais (e.g. Kana) (voir par exemple Katanoda et al., 2001, Sugihara et al., 2006). Ce contraste met également en jeu des régions cérébrales impliquées dans la récupération de connaissances orthographiques (Rapp & Lipka, 2010).

L'analyse suivante a consisté à utiliser cette carte d'activation en tant que masque inclusif pour disséquer les effets de fréquence et de longueur.

### Résultats comportementaux vis-à-vis des facteurs longueur et fréquence

Bien que le paradigme ait été construit de manière à laisser le même temps d'écriture pour chaque catégorie de mots, nous avons constaté une différence significative du nombre de lettres produites entre les mots longs et les mots courts pour la catégorie des mots de haute fréquence. Cette différence va en faveur des mots longs ( $t = 5.64$ ,  $p = 0.002$ ) pour lesquels plus de lettres ont été produites. Il apparaît que cette différence (longs > courts) n'est pas significative pour les mots de basse fréquence ( $t = 1.72$ ,  $p = 0.14$ ). Dès

lors nous avons confirmé les analyses d'imagerie révélant les effets de longueur en restreignant celle-ci aux mots de basse fréquence (Figure 2, partie droite).

### Résultats d'imagerie

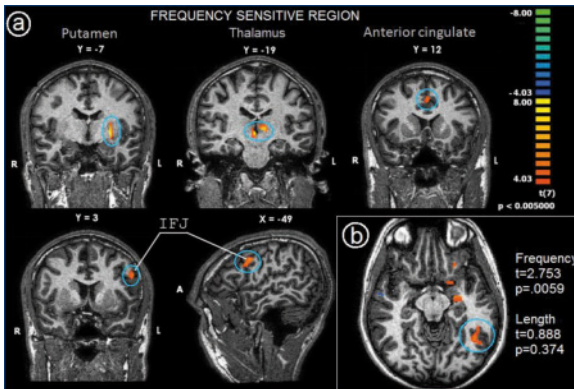
Les résultats d'imagerie cérébrale correspondants à ces effets de longueur et de fréquence montrent l'importance de 7 régions parmi le réseau préalablement activé. Cinq sont réactives à l'effet de fréquence tandis que deux réagissent à la longueur (Figures 1, 2 et Tableau 1). Aucune de ces régions ne montre de sensibilité aux deux effets à la fois. Étant donné les résultats observés

en comportement, les régions sensibles aux effets de longueur ont été testées pour les deux catégories de mots (haute fréquence et basse fréquence).

Les cinq régions sensibles à la fréquence (figure 1, tableau 1) sont la jonction frontale inférieure gauche, le cortex cingulaire antérieur, les noyaux thalamiques, le putamen de l'hémisphère gauche et la jonction temporo-occipitale de l'hémisphère gauche dans la zone de la visual word form area (Cohen et Dehaene, 2004) (VWFA). Pour cette dernière, une analyse en région d'intérêt (ROI) a été réalisée.

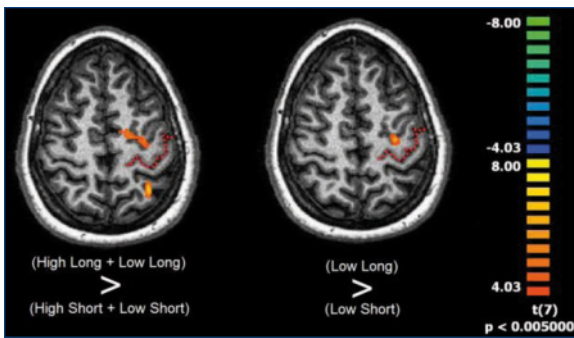
**Tableau 1 : Coordonnées et valeurs statistiques des effets de fréquence lexicale et de longueur : régions apparues significativement actives au sein du réseau révélé par le contraste [écrire – dessiner des cercles]**

FRÉQUENCE		Région / Aire de Brodmann (BA)	Coordonnée du Pic (du barycentre) en x	Coordonnée du Pic (du barycentre) en y	Coordonnée du Pic (du barycentre) en z	Taille du cluster en voxels	Valeur t	Valeur p
Cortical	jonction frontale inférieure gauche	BA6	- 49 (- 48)	1 (2.1)	33 (31)	312	6,45	0.0003
	cingulum antérieur	BA32	- 1 (- 0.71)	13 (11)	39 (38)	168	5.07	0.0014
Sous-cortical	thalamus bilatéral	thalamus	1 (- 1.7)	- 17 (- 18)	0 (3.1)	767	10.76	0.0000
	noyau lenticulaire gauche	Putamen	- 25 (- 26)	- 8 (- 11)	3 (0.94)	701	9.67	0.0000
VOI	vwfa gyrus fusiforme	BA37	- 37 (- 43)	- 59 (- 54)	- 6 (- 7.2)	888	2.753	0.0059
LONGUEUR								
Cortical	sulcus frontal supérieur, gyrus frontal médian/moyen	BA6	- 13 (- 20)	- 11 (- 16)	51 (52)	629	5.84	0.0006
	lobule pariétal supérieur	BA7	- 28 (- 29)	- 50 (- 52)	52 (49)	289	7.46	0.0001



**Figure 1 :** (a) visualisation sur coupes coronales des clusters d'activation sensibles à la fréquence listée dans le tableau 1. Le cluster à la jonction entre le gyrus précentral et le gyrus frontal inférieur gauche est également visualisé sur une coupe para-sagittale. (b) cluster d'activation analysé en VOI à la jonction temporo-occipitale de l'hémisphère gauche (image en convention radiologique). À droite, valeurs statistiques résultantes de l'analyse en VOI pour la fréquence et la longueur.

Les deux régions sensibles à la longueur sont le cortex prémoteur dorsal de l'hémisphère gauche, au niveau du sulcus frontal supérieur et le lobule pariétal supérieur du même hémisphère (figure 2 à gauche et tableau 1).



**Figure 2 :** à gauche : visualisation sur coupes axiales des clusters sensibles à l'effet de longueur listé dans le tableau 1. (Convention radiologique). À droite, visualisation du cluster sensible à la longueur lorsqu'on analyse uniquement l'effet sur la catégorie de mots de basse fréquence. (Le sillon central est indiqué par des pointillés rouges).

Ces résultats nous montrent deux groupes d'aires bien distinctes. Il faut entendre par longueur non pas le nombre de lettres qui ont été produites au cours de la tâche mais la quantité d'information orthographique que représente le

mot lui-même (e.g. séquence plus longue ou plus complexe dans sa structure, charge cognitive plus importante).

Étant donné que les mots de haute fréquence ont révélé un effet de longueur possiblement lié au nombre de lettres écrites ( $p = 0.002$ , cf. ci-dessus), nous avons analysé les effets de longueur uniquement sur les mots de basse fréquence. Cette analyse a montré que l'activation liée à l'effet de longueur était toujours présente dans le cluster frontal supérieur de façon significative ( $x, y, z = -25, -20, 51$ ;  $p = .0001$ ) tandis que le cluster pariétal disparaissait. Pour ce dernier, c'est la combinaison des mots de haute et de basse fréquence qui fait que ce cluster apparaît dans l'analyse où les deux catégories de mots sont mélangées.

## Discussion

Le premier résultat qu'il nous faut mentionner est que les régions que nous avons retrouvées actives dans les tâches d'écriture sont pour la plupart d'entre elles localisées dans l'hémisphère gauche. D'autres études ont présenté une latéralisation similaire chez des participants droitiers mais également chez des gauchers (Roux et al., 2009 ; Sugihara et al., 2006) et des gauchers contrariés (Siebner et al., 2002, cluster prémoteur entre autre).

Il est fréquent de lire que les composantes centrales de l'écriture, du fait qu'elles sont communes aux systèmes de la lecture et de la parole, sont latéralisées, comme pour ces dernières, dans l'hémisphère gauche. Cette assertion fait cependant abstraction du buffer graphémique dont le rôle dans la lecture reste mineur (Caramazza et al., 1996).

Aujourd'hui, rien encore n'a été publié sur la latéralisation hémisphérique des processus périphériques de l'écriture et encore moins du buffer graphémique.

L'expérience que nous avons réalisée sur les effets de fréquence et de longueur permet de révéler que trois des régions cérébrales ayant un rôle important dans ces processus centraux étaient latéralisées à gauche (IFJ, VWFA et Putamen) tandis que deux étaient médianes bilatérales (cortex cingulaire et thalamus) ces régions avaient déjà été identifiées pour participer aux processus centraux (Beeson et al., 2003 ; Rapp & Lipka, 2010). Nous répliquons ces données avec fidélité



compte tenu des distances qui séparent les clusters des différentes études. Pour les régions sensibles aux effets de longueur, marqueurs du buffer graphémique (Caramazza et al., 1987), les deux régions observées sont également situées dans l'hémisphère gauche (SFS gauche et SPL gauche). Au niveau du sulcus frontal supérieur, le caractère encore relativement abstrait du codage de la longueur nous fait suggérer que cette région appartient encore aux processus centraux.

## Conclusion

Nous avons démontré qu'il existe dans le sulcus frontal supérieur une région qui traite une information caractéristique du rôle fonctionnel du buffer graphémique : associant la sensibilité aux effets de longueur au caractère possiblement abstrait de l'information en cours de traitement (ou du moins qui se démarque du paramètre moteur « nombre de lettres produites »). Via l'utilisation d'une tâche de lecture que nous n'avons pas décrite ici, nous avons découvert qu'à l'inverse des régions sensibles à la fréquence lexicale et révélatrices des processus les plus centraux, cette région prémotrice n'était pas activée. Or comme nous l'avons mentionné, cette in-intervention avait été suggérée pour le buffer graphémique au cours des tâches de lecture.

Enfin, nous avons reproduit des résultats antérieurs qui montrent que cette région appartient aux processus centraux de l'écriture en révélant son activation dans le contraste des tâches d'écriture et de tracé de cercles.

L'ensemble de ces indices font de cette région cérébrale un bon candidat au rôle de substrat du buffer graphémique ou d'une de ses parties (eg. niveau des « items » dans le modèle de compétitive Queing de Glasspool et Houghton) En démontrant aujourd'hui sa sensibilité aux effets de longueur, nous ajoutons un indice important en faveur de cette hypothèse. De nombreuses études sont cependant nécessaires pour confirmer celle-ci et apporter plus de précisions sur le rôle spécifique de cette région dans les processus de mémoire de travail dédiés à l'écriture.

## Remerciements

Je tiens à remercier en tout premier lieu, la Fondation Fyssen, qui m'a donné la chance de partir faire ce stage post-doctoral aux États-Unis et je remercie aussi la professeure Brenda Rapp pour son encadrement et son aide précieuse.

## Bibliographie

- Beeson P., Rapcsak S., Plante E., Charguaf J., Chung A., Johnson S., et al. (2003). The neural substrates of writing: A functional magnetic resonance imaging study. *Aphasiology*, 17(6-7), 647-665.
- Caramazza A., Capasso G. & Miceli, G. (1996). The role of the graphemic buffer in reading. *Cognitive Neuropsychology*, 13, 673-698.
- Cohen L., Lehericy S., Chochon F., Lemer C., Rivaud S. & Dehaene S. (2002). Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the visual word form area. *Brain*, 125, 1054-1069.
- Cohen L. & Dehaene S. (2004). Specialization within the ventral stream: the case for the visual word form area. *NeuroImage*, 22(1), 466-76.
- Glasspool D. W. & Houghton G. (2005). Serial order and consonant-vowel structure in a graphemic output buffer model. *Brain and Language*, 94, 304-330.
- Katanoda K., Yoshikawa K. & Sugashita M. (2001). A functional MRI study on the neural substrates for writing. *Hum. Brain Mapp.*, 13, 34-42.
- Kucera H. & Francis N. (1967). *Computational Analysis of Present Day American English*. Brown University Press.
- Longcamp M., Anton J.-L., Roth M. & Velay J.-L. (2003). Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing. *NeuroImage*, 19(4), 1492-500.
- Rapp B. & Hsieh L. (2002). Functional magnetic resonance imaging of the cognitive components of the spelling process. Poster presented at the Cognitive Neuroscience Society Meeting. San Francisco.
- Hsieh L. & Rapp B. (2004). Functional magnetic resonance imaging of the cognitive components of the spelling process. *Brain and language* 91(1), 40-41.
- Rapp B. & Lipka K. (2010). The Literate Brain: The Relationship between Spelling and Reading. *Journal of cognitive neuroscience*.
- Roeltgen D. P. (1993). Agraphia. In K. M. Heilman & E. Valenstein (Eds.), *Clinical Neuropsychology* (pp. 63-89). New York: Oxford University Press.

- Roux F.-E., Dufor O., Giussani C., Wamain Y., Draper L., Longcamp M. and Démonet J.-F. (2009). The graphemic/motor frontal area Exner's area revisited. *Annals of neurology*, 66(4), 537-45.

- Siebner H. R., Limmer C., Peinemann A., Drzezga A., Bloem B. R., Schwaiger M., Conrad B. (2002). Long-Term Consequences of Switching Handedness: A Positron Emission Tomography Study on handwriting in "Converted" Left-Handers. *The Journal of Neuroscience*, 22(7), 2816-2825.

- Sugihara G., Kaminaga T. & Sugishita, Morihiro. (2006). Interindividual uniformity and variety of the "Writing center": a functional MRI study. *NeuroImage*, 32(4), 1837-49.

## Introduction

Writing has an important role in our daily life. Writing a letter or an e-mail, filling out a check or writing down an appointment, it is essential for us every day. Unfortunately, it is not rare that brain functions are affected after a cerebral vascular accident or a head trauma. Henceforth, what used to be the daily routine becomes an insurmountable ordeal. These writing impairments are called agraphia or dysgraphia for which therapy and rehabilitation are generally proposed. However, we still know little about the neural bases underlying the affected functions in these impairments. Using fMRI, we took an active interest in the following questions: 1) what are the neural substrates of the central process of writing? and 2) what are those of the process sensitive to length variations?

## Cognitive architecture of writing

In cognitive science, it is typical to imagine that a writing deficit is subsequent to the disruption of one or more of its components; mental function of a more complex system that gives rise to writing. The central and peripheral processes form subsets of components. Central processes allow recovery of correct spelling of the word from the orthographic lexicon that constitutes a form of long term memory of the words that we know and we are familiar with. This abstract form is therefore maintained active in working memory that we call graphemic buffer. This latter element is essential in maintaining the identity of graphemes (or letters or abstract forms) and their respective positions in the word. Peripheral processes

gather together the components downstream from the graphemic buffer in cognitive models. They are generally not common between writing and reading. We count at least two levels of peripheral processes: allographic system and that of motor planning known as graphomotor level. The main role of allographic component is to assign to abstract representation contained in the graphemic buffer, its desired form called allograph (a, A, *a*, *A*). It incorporates especially the concepts of case (uppercase or lowercase) and script (cursive or print). Since the shape is selected, a representation of graphomotor sequence (direction, number of strokes) can be chosen and result in terms of motor plan. It should be noted that graphomotor representation at this stage is still effector independent. And it is only when effector will be known (hand, for example) that neuromuscular commands will put our muscles into action.

In neuroimaging, studies on writing are still rare. All the more if we search for those that set out to distinguish central processes from peripheral processes. In one of these studies (Besson et al., 2003), authors used three simple tasks that they contrasted with one another in order to isolate each component. The most central components were found when an alphabet writing task was subtracted from another word writing task. Analysis of neuronal substrates of such a contrast revealed the involvement of inferior and left middle frontal regions (Brodmann area 45/47 and BA 46/10) and the left temporo-occipital junction around the Brodmann area 37. More generally they also demonstrated by means of a more permissive contrast (writing words – drawing circles) that the set of cerebral regions involved in the process was located mainly in the left hemisphere. The authors formulate the hypothesis that the supplementary regions that appear in this contrast are responsible for more peripheral process in writing system. Among these regions, we notice the left dorsal frontal cortex in the Brodmann area no. 6 (BA6) and the left superior parietal cortex in the area BA7.

These results reveal an important network of cerebral areas whose localization is in line with lesion studies on agraphia (Roeltgen, 1993). Similar data have been obtained by other research teams and have frequently replicated this outcome even though the tasks used as a control did not share exactly the same properties (e.g.

naming objects, repeating words, motor task) (Katanoda et al., 2001; Sugihara et al., 2006; Longcamp et al., 2003; Roux et al., 2009 etc.).

Two other studies (Rapp & Hsieh 2002, Hsieh & Rapp 2004; Rapp & Lipka, 2010) point up an original paradigm that allows testing certain components of writing while avoiding using the hand. In their experiments, these authors use a task that is to say if a visually presented letter belonged or not to the previously heard word (SPELL condition). Its control task was to say if a visually presented letter was in upper or lower case (CASE condition). The result of contrast between these two conditions reveals the central processes because the CASE condition does not require, from a cognitive point of view, that participants recall the spelling of the heard word and does not demand that it be stored in working memory during decision making time. The authors then obtain the same regions than those of the study of Beeson et al., 2003 but this time all the areas included in the general contrast (writing words – drawing circles) appear to belong to the central processes. So, according to this study, the left parietal cortex and the dorsal frontal cortex of the left hemisphere are henceforth part of the areas that underlie some of the central processes of writing. The authors present the functions of these regions as indicative of the orthographic output lexicon and the graphemic buffer. In Beeson's study in 2003, the contrast that allows isolating the peripheral processes of writing is to subtract the alphabet writing task to that of circle drawing. In doing so, the authors find a more anterior region in the parietal lobe of the left hemisphere at the junction of BA7 and BA5. It is neither the activated region in the study of Rapp & Hsieh nor the active region in the contrast involving writing and circle drawing tasks. The authors will, however, suggest this part of our cortex is important in planning and specific motor execution of letters and will associate the premotor dorsal frontal region whose activity fluctuates with different contrasts without ever being present or absent.

We published in 2009 a study (Roux et al., 2009) showing that the left premotor region (BA6) is involved in writing by means of two-track approach, that is, neurosurgery and neuroimaging. By subtracting a repetition task to writing task (task of interest) and by masking this analysis with the motor contrasts for the movements

generated by the hand (circle drawing) and the mouth (syllable repetition), we could demonstrate that only the dorsal frontal cortex of the left hemisphere is specific to the central processes of writing vis-à-vis those of repetition.

In surgery, it appeared to us that this same region (formally known as Exner's area, (Exner 1881)) was responsible for a writing arrest when subjected to stimulation. However, patients could still move their hands. This second point indicates that the information processed by this region is essential to writing but dissociated from the motor process when the latter is not dedicated to letter writing.

Finally, fMRI data as well as those from surgery include left-handed participants. And in these individuals the area observed as indispensable to writing is also located in the left hemisphere. This last point reinforces the view that this region would be rather "effector independent" as it was shown in an analysis in conjunction in right-handed participants when they had to write word with their right hand, then left hand. The superior parietal regions, revealed by other studies and that do not appear in this study, would have been deleted at the moment of creating the contrast by either the use of repetition task or the use of generated masks for the control conditions.

The hypothesis was formulated that, among the central processes, one of them that could effectively show an activity differential between writing and repetition was the graphemic buffer (Caramazza et al., 1996). And the abstract and amodal nature of the information processed by the frontal region are an interesting set of arguments as to its possible intervention in the role of the graphemic buffer or a part of it. In this article, we propose a new approach of study on the central processes of writing and the neuronal substrates of the graphemic buffer by means of two markers that are respectively specific to each other: **lexical frequency** effects and **length** effect. We used functional magnetic resonance imaging in healthy and right-handed adult participants (n = 8) during a writing task.

## Method

### "Length and frequency in the writing process"

Eight adult participants were included in this first experiment. All were right-handers, native

English speakers and with no neurological disorders. After a capacity test for dictation, we included them in the protocol using fMRI.

### Writing

The experimental task begins with a fixation cross (500ms), and then appears instructions on the screen showing “SPELL”, “ALPHABET” or “CIRCLE” (1000ms). Following these visual instructions, a word is heard by participants. This word is followed by a sound giving the starting signal to carry out the task. From this sound participants have 6 seconds to write the heard word in print uppercase (SPELL), to write alphabet beginning with the letter A, or to draw separated circles. On each trial, participants have 6 seconds to write the word, the letters or draw circles. This duration is calculated in order that participants can write as many letters repeating short words as long words (e.g. fork fork = computer). The end of time limit (6 seconds) is signaled by reappearance of the fixation cross for the next trial. Participants know that they have to lift the pencil even if they did not finish writing a word. Four sessions including the conditions described above were carried out. Each session comprises 16 blocks of 6 trials randomly alternating different instructions. Within each block, repetition of high and low frequency words as well as that of long and short words were known and could be analyzed.

### Material

We used 192 words. Half correspond to short words (4 letters) and the other to long words (8 letters). Among the long and short words, it has been ensured that half the words had high frequency (> 50 occurrences per million words, Kucera and Francis, 1967) and the other low frequency (< 3 occurrences per million words, Kucera and Francis, 1967).

### Imaging parameters

fMRI data were acquired at 1.5T at the F.M. Kirby Research Center for Functional Brain Imaging at the Kennedy Krieger Institute (Baltimore, MD).

### Data analysis

All imaging analyses were carried out using Brain Voyager QX (Maastricht, the Netherlands). The functional images were corrected using slice timing, realignment, and normaliza-

tion in Talairach space. Finally, we applied an isotropic 8mm Gaussian smoothing.

We used a mask allowing excluding mainly the cerebral ventricles and the skeleton around the brain.

### Results

We firstly analyzed activations induced by the spelling task (all types: long, short, high and low frequency words). Then, activations induced by the circle drawing task in order to determine a network for writing peculiar to our participant group in which we carried out more subtle analyses on the frequency and length effects.

These results show involvement of a wide network of cortical and subcortical areas. This network of very large activations presents a feature of being almost exclusively concentrated in the left hemisphere. It includes frontal, parietal and temporo-occipital regions frequently found in the studies on writing using imaging in alphabetic language systems (see Beeson et al., 2003, for example) and also in ideographic systems when these allow manipulating phonograms like in Japanese (e.g. Kana) (see Katanoda et al., 2001, Sugihara et al., 2006). This contrast also entails cerebral regions involved in retrieving orthographic knowledge (Rapp & Lipka, 2010).

The following analysis was to use this activation map as an inclusive mask to dissect the frequency and length effects.

### Behavioral results in relation with length and frequency factors

Even though the paradigm was designed to give the same time for writing for each word category, we noticed a significant difference of the number of letters produced between long words and short words for the high frequency word category. This difference goes in favor of long words ( $t = 5.64$ ,  $p = 0.002$ ) for which more letters were produced. It appears that this difference (long > short) is not significant for low frequency words ( $t = 1.72$ ,  $p = 0.14$ ). Consequently we confirmed the imaging analysis revealing the length effect by restricting it to low frequency words (Figure 2, right part).

### Imaging results

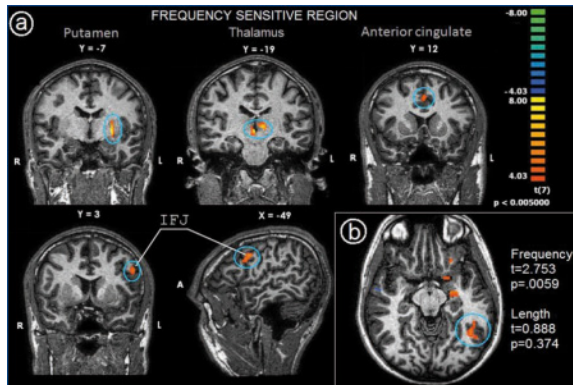
The results of cerebral imaging corresponding to these length and frequency effects show importance of 7 regions in the previously activated

network. Five were reactive to the frequency effect while two reacted to length (Figure 1, 2 and Table 1). Any of these regions does not show sensitivity to the two effects at the same time. Given the results observed in behavior, the regions sensitive to the length effects were tested for the two word categories (high frequency and low frequency).

The five regions sensitive to frequency (Figure 1, Table 1) are the left inferior frontal junction, the anterior cingulate cortex, the thalamic nodes, the putamen of the left hemisphere and the temporo-occipital junction of the left hemisphere in the visual word form area zone (Cohen & Dehaene, 2002 & 2004) (VWFA). For this last, a Region Of Interest (ROI) analysis was carried out.

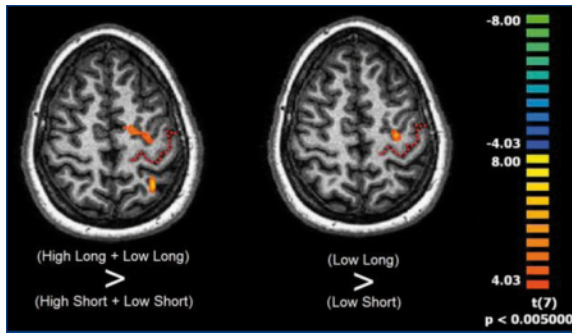
**Table 1 : Coordinates and statistical values for frequency and length effects. Cluster's activity were significant for the contrast [writing – circle drawing]**

FREQUENCY		Region/ Brodmann area (BA)	x Peak coordinate (geometric peak)	y Peak coordinate (geometric peak)	z Peak coordinate (geometric peak)	Clus- ter size	t value	p value
Cortical	Left inferior frontal junction	BA6	- 49 (- 48)	1 (2.1)	33 (31)	312	6,45	0.0003
	Anterior cingulate	BA32	- 1 (- 0.71)	13 (11)	39 (38)	168	5.07	0.0014
Sub-cortical	Bilateral thalami	thalamus	1 (- 1.7)	- 17 (- 18)	0 (3.1)	767	10.76	0.0000
	Left lenticular nucleus	Putamen	- 25 (- 26)	- 8 (- 11)	3 (0.94)	701	9.67	0.0000
VOI	vwfa fusiforme gyrus	BA37	- 37 (- 43)	- 59 (- 54)	- 6 (- 7.2)	888	2.753	0.0059
LENGTH								
Cortical	Superior frontal sulcus Median/Middle frontal gyrus	BA6	- 13 (- 20)	- 11 (- 16)	51 (52)	629	5.84	0.0006
	Superior parietal lobule	BA7	- 28 (- 29)	- 50 (- 52)	52 (49)	289	7.46	0.0001



**Figure 1:** (a) coronal slices of frequency sensitive clusters listed in table 1. The cluster located near the junction between the precentral sulcus and the left inferior frontal gyrus is also presented on a para-sagittal view. (b) VOI analysis of the cluster located to the occipito-temporal junction of the left hemisphere. (radiological convention for axes is used). Bottom right: statistical values obtained within the VOI for length and frequency effects.

The two regions sensitive to length are the dorsal premotor cortex of the left hemisphere, at the level of the superior frontal sulcus and the



**Figure 2** : Left: axial view of the length sensitive cluster listed in table 1. (Radiological convention for axes is used). Right: axial view of length sensitive cluster when high frequency words are discarded from the analysis. (Central sulcus is marked with a red dashed line).

superior parietal lobule of the same hemisphere (Figure 2 (left) and Table 1).

These results show us two distinct groups of areas. What is meant by length is not the number of letters that were produced during the task but the quantity of orthographic information that the word itself represents (e.g. longer or more complex sequence in its structure, more important cognitive load).

Since high frequency words revealed a length effect possibly related to the number of written letters ( $p = 0.002$ , see above), we analyzed the length effects only on low frequency words. This analysis showed that the activation related to the length effect was always significantly present in the superior frontal cluster ( $x, y, z = -25, -20, 51$ ;  $p = .0001$ ) while the parietal cluster disappeared. For the latter, it is the combination of high and low frequency words that makes this cluster appear in the analysis where the two word categories are mixed.

## Discussion

The first result that we should mention is that the regions that we found active in writing tasks are for most of them located in the left hemisphere. Other studies presented a similar lateralization in right-handed participants but also in left-handers (Roux et al., 2009; Sugihara et al., 2006) and forced left-handers (Siebner et al., 2002, premotor cluster among others).

It is common to read that the central components of writing, as they are common to reading and speech systems, are lateralized in the left

hemisphere. This assertion however leaves aside the graphemic buffer whose role in reading remains minor (Caramazza et al., 1996).

Today, nothing has yet been published on hemispheric lateralization of the peripheral processes of writing and even less on that of the graphemic buffer.

The experiment that we carried out on the frequency and length effects allows revealing that three of the cerebral regions having an important role in these central processes were lateralized in the left (IFJ, VWFA and Putamen) while two were bilateral median (cingulate cortex and thalamus). These regions had already been identified as those participating in the central processes (Beeson et al., 2003; Rapp & Lipka, 2010). We faithfully replicate these data considering the distances that separate the clusters of different studies. As to the regions sensitive to the length effects, markers of the graphemic buffer (Caramazza et al., 1987), two observed regions are also located in the left hemisphere (left SFS and left SPL). At the level of the superior frontal sulcus, the nature that is still relatively abstract of the length coding makes us suggest this region is also part of the central processes.

## Conclusion

We demonstrated that there exists in the superior frontal sulcus a region that processes specific information of the functional role of the graphemic buffer: associating sensitivity to the length effects to the possibly abstract character of information during processing (or at least which distinguishes itself from the motor parameter “number of produced letters”). Via a writing task which we did not describe here, we discovered that contrary to the regions sensitive to lexical frequency and indicative of the most central processes, this premotor region was not activated. Yet as we mentioned it, this non-intervention had been proposed for the graphemic buffer during reading tasks.

Finally, we repeated anterior results showing that this region is part of the central processes of writing revealing its activation in the contrasts of writing and circle drawing tasks.

The set of these clues makes this cerebral region a good candidate for the role of substrate of the graphemic buffer or that of one of its parts (e.g. level of “items” in the competitive queueing model of Glasspool and Houghton 2005).

By demonstrating today sensitivity to the length effects, we add an important cue in favor of this hypothesis. Numerous studies are however necessary to confirm the hypothesis and provide further details on the specific role of this region in the processes of working memory dedicated to writing.

### **Acknowledgements**

I would like to thank, first and foremost, the Fyssen Foundation that gave me the opportunity to carry out this postdoctoral research in the United States. I am also grateful to Professor Brenda Rapp for her supervision and her invaluable help.

# Dynamique temporelle de la prise de décision dans un environnement changeant

David THURA

## Résumé

Cette étude vise à mieux comprendre le mécanisme temporel de la prise de décision lorsque les informations disponibles dans l'environnement changent au cours du temps. Pour ce faire, nous avons mené une étude comportementale et électrophysiologique chez l'homme et chez le singe. Les résultats comportementaux montrent d'une part que les sujets forment leurs décisions en comparant à un seuil le produit de l'information sensorielle instantanée fournie par l'environnement avec un signal lié au temps qui s'écoule. En accord avec ces données, nos analyses suggèrent d'autre part que les corrélats neuronaux de ce mécanisme sont présents dans le cortex frontal du singe. En effet, cette région possède des neurones qui combinent l'information sensorielle disponible avec un signal d'urgence qui croît au cours du temps. La décision est prise lorsque le produit de cette combinaison atteint un seuil donné.

## Mots-clés

Prise de décision, intégration, urgence, singe, cortex prémoteur, cortex préfrontal, comportement, électrophysiologie

## Temporal dynamic of decision-making in changing conditions: the “urgency” hypothesis

### Summary

Our daily life is a chain of decisions. The present study aims to better understand the temporal dynamic and the neural bases of decision-making when sensory information is changing over time. To this end, we conducted a behavioral and an electrophysiological study in humans and monkeys. Our behavioral results strongly suggest that in both species, subject makes a decision by multiplying the sensory evidence provided by the stimulus with a motor-related (or “urgency”) signal that grows over time. We found neural correlates of this “urgency-gating” mechanism in monkey prefrontal and premotor cortex. Neuronal activity in these areas first reflects the time course of sensory evidence over time. Moreover, activity tends to grow over time, as predicted by an urgency mechanism. Finally, a decision is made when neural activity exceeds a fixed threshold.

### Keywords

Decision-making, Integration model, Urgency, Premotor cortex, Prefrontal cortex, Behavior, Electrophysiology

### Introduction

Dans la vie de tous les jours, nous sommes amenés à prendre des décisions de façon continue. Par exemple, lorsque nous nous levons le matin, nous devons choisir notre tenue vestimentaire, choisir de prendre plutôt du thé ou du café... Ensuite, nous choisirons le meilleur moyen de

transport ainsi que le meilleur itinéraire pour nous rendre sur notre lieu de travail, etc... Malgré la grande familiarité avec laquelle nous exécutons ces actes quotidiens, les processus cognitifs permettant de les mettre en œuvre sont éminemment complexes et un dysfonctionnement de cette capacité est à l'origine de pathologies très



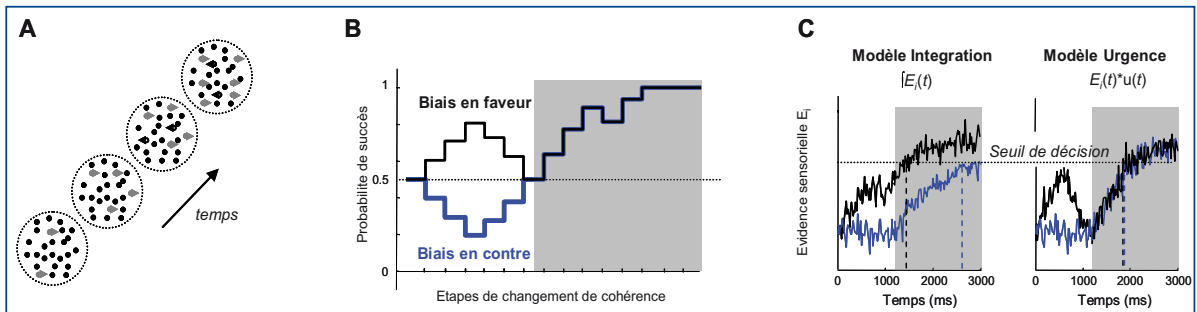
invalidantes (troubles obsessionnels, schizophrénie, maladie de Parkinson). Reprenons l'exemple du meilleur itinéraire à choisir pour rejoindre son lieu de travail. Pendant que nous conduisons, nous sommes confrontés à plusieurs sources d'information favorisant différentes options potentielles (les panneaux de signalisation, les conseils des passagers, les données d'une carte routière,...). De plus, plus un changement de direction approche et plus nous sommes amenés à prendre une décision même si nous ne sommes pas totalement convaincus de la pertinence de celle-ci. Par conséquent, les informations disponibles dans l'environnement et évoluant au cours du temps ainsi que l'urgence poussant à choisir ou à exclure une option donnée font parties des nombreux facteurs guidant la prise de décision. Pour des raisons pratiques, les études visant à mieux comprendre les mécanismes temporels de la prise de décision se sont concentrées sur des choix perceptifs très simples. La plupart de ces travaux s'accordent pour dire que pour de telles décisions, l'information sensorielle liée au stimulus à traiter est intégrée au cours du temps, parfois pendant plusieurs centaines de millisecondes, et ce jusqu'à atteindre un seuil, marquant alors le moment où la décision est prise (voir Gold & Shadlen, 2007). Cependant, dans la plupart des paradigmes utilisés, cette information sensorielle fournie aux sujets est maintenue constante au cours d'un essai. Or, l'environnement change constamment et souvent de manière imprévisible, les animaux doivent donc pouvoir s'adapter à ces variations en mettant à jour très rapidement l'information sensorielle utilisable pour prendre leur décision (Chittka et al., 2009). Mais si l'intégration de l'information sensorielle est courte, quel mécanisme est responsable de l'augmentation progressive et relativement lente de l'activité neuronale jusqu'au seuil de décision ? Un mécanisme alternatif, basé sur la multiplication d'un signal d'urgence lié au temps qui passe avec celui représentant l'information sensorielle instantanée (modèle « urgence ») peut également expliquer les résultats comportementaux et électrophysiologiques décrits jusque-là dans la littérature. Pour distinguer les deux modèles, l'information sensorielle favorisant l'un ou l'autre de deux choix possibles doit varier au cours d'un essai. En respectant cette contrainte, nous avons mené à la fois une étude

comportementale chez l'homme et une étude électrophysiologique chez le singe afin de caractériser le comportement des sujets humains et non-humains confrontés à une tâche de prise de décision en conditions changeantes et mieux connaître les corrélats neuronaux à l'origine de ce comportement.

## **EXPÉRIENCE 1 : Prise de décision en conditions bruitées et changeantes chez l'homme**

### **Méthodes**

Dans cette expérience, 24 sujets devaient choisir la direction dominante (droite ou gauche) décrite par un ensemble de points se déplaçant de façon cohérente parmi d'autres se déplaçant aléatoirement dans toutes les directions. Le point clé de cette expérience est que la cohérence globale (le pourcentage de point se déplaçant soit à droite, soit à gauche) variait au cours de l'essai (figure 1A). Plus précisément, lorsque le sujet démarre l'essai, tous les points (200) se déplacent de façon aléatoire. Puis, 225ms plus tard, 6 points abandonnent leur mouvement aléatoire et se déplacent de façon cohérente dans une des deux directions possibles (0° vs. 180°). Après un autre délai de 225ms, six nouveaux points se déplacent à leur tour de façon cohérente dans une direction donnée, et ainsi de suite jusqu'à ce que 90 points (45 %) se déplacent dans l'une ou l'autre des deux directions potentielles (ce qui correspond à 15 étapes successives de changement de cohérence). La tâche des sujets est de décider, dès qu'ils le souhaitent au cours de l'essai, quelle sera la direction nette dominante décrite par les points à la fin de l'essai. Ils rendent leur décision en déplaçant un levier vers la cible correspondant à la direction choisie. Une fois la réponse donnée, les étapes restantes de mise en mouvement cohérent des points se succèdent plus rapidement, toutes les 48ms), permettant d'induire chez les sujets un compromis « vitesse-précision » dans leur stratégie de prise de décision, sachant qu'ils devaient effectuer un total de 500 choix corrects. Pour la plupart des essais, la direction prise par les points au cours de chacune des 15 étapes est déterminée de façon aléatoire (essais « random »). Mais pour certains d'entre-eux (essais spéciaux), l'ordre dans lequel les différentes



**Figure 1 :** **A.** Schéma représentant le déroulement temporel de la tâche de discrimination de mouvement effectuée par les sujets humains. Au début de l'essai, tous les points se déplacent de façon aléatoire (points noirs). Ensuite, toutes les 225ms, une fraction des points abandonne son déplacement aléatoire pour créer un mouvement cohérent vers la droite (points avec flèches grises) ou vers la gauche (points avec flèche noire). Le mouvement cohérent net favorisant l'une ou l'autre des deux directions possibles évoluent donc continuellement pendant l'essai et le singe doit choisir la cible qui correspondra au mouvement dominant à la fin de l'essai. **B.** Profils de probabilité de succès pour les essais « biais en faveur » (noir) et « biais en contre » (bleu). Dans ces deux types d'essais, les analyses portent sur les décisions prises après le biais initial (zone grisée). **C.** Prédiction des modèles « intégration » et « urgence » pour l'activité neuronale dans les essais « biais en faveur » (noir) et « biais en contre » (bleu). Les deux modèles font des prédictions différentes dans les deux types d'essais pour toute décision prise après la cinquième étape de déplacement des points (zone grisée).

fractions de points se déplacent dans une direction ou dans l'autre est manipulée.

Plusieurs types d'essais spéciaux sont ainsi définis et insérés dans une séquence identique de 700 essais, parmi lesquels les essais « biais en faveur » et « biais en contre » (figure 1B). Dans les essais « biais en faveur », les 3 premières étapes de changement de cohérence favorisent la cible correcte et donc augmentent la probabilité de succès pour cette cible, puis les 3 changements de cohérence suivants favorisent l'autre cible. Ensuite, les changements restants favorisent clairement la cible correcte. Les essais de type « biais en contre » sont identiques à l'exception des 6 premières étapes qui sont inversées. Par conséquent, le début d'un essai « biais en contre » favorise la mauvaise cible et induit une probabilité de succès inférieure à 0.5 (figure 1B). En revanche, après la 6<sup>e</sup> étape de changement de cohérence, la probabilité de succès dans les deux types d'essai est identique (zone grisée sur la figure 1B).

Les deux modèles testés dans cette étude (« intégration » et « urgence ») font des prédictions très différentes quant au comportement d'un sujet confronté à ces deux types d'essai. En effet, si le mécanisme de prise de décision suit un modèle d'intégration, nous nous attendons à observer, pour des décisions prises après la 6<sup>e</sup> étape de déplacement des points, des temps de

décision plus rapides pour les essais « en faveur » que pour les essais « en contre ». En effet, l'intégration temporelle permet un maintien des événements passés en « mémoire » et de ce fait, le biais initial va augmenter ou diminuer l'activité neuronale liée à la décision provoquant des réponses plus rapides dans les essais « en faveur » et plus lentes dans les essais « en contre » (panel de gauche sur la figure 1C). En revanche, si la prise de décision est formée selon un mécanisme d'urgence, il n'y aura pas de différence significative de temps de décision pour les deux types d'essais (toujours pour des décisions prises après la 6<sup>e</sup> étape). En effet, ce modèle est basé sur la multiplication de l'information sensorielle instantanée avec un signal lié au temps qui passe (indépendant de l'information sensorielle). De ce fait, après 1125ms (6 étapes de changement de cohérence), la cohérence globale (l'évidence sensorielle) et donc la probabilité de succès sont identiques pour les deux types d'essais. Ainsi, si le cerveau n'intègre pas l'information instantanée mais la multiplie simplement par un signal de temps (lui aussi identique pour les deux types d'essais), les deux types d'essais devraient générer dans cette situation le même comportement (panel de droite sur la figure 1C). Enfin, deux conditions d'urgence ont été testées dans cette expérience. Dans la première, la condition « pression du temps », les

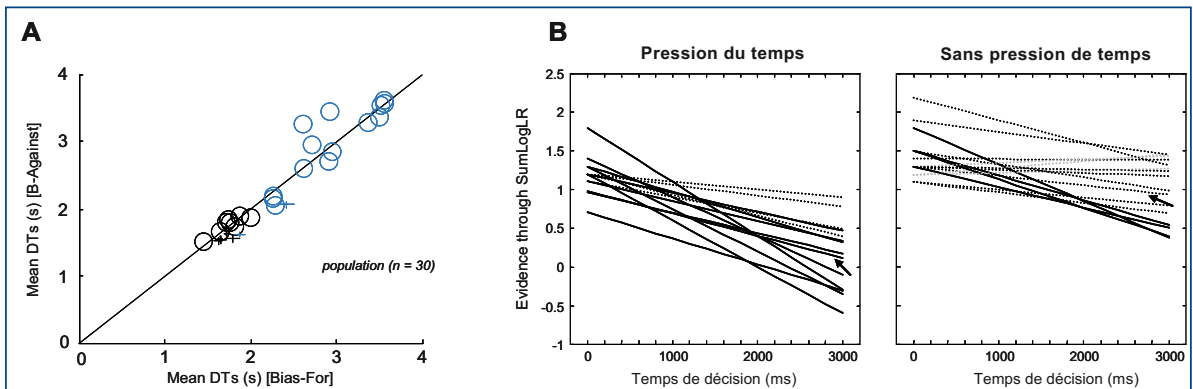
sujets devaient prendre leur décision avant la fin de la 15<sup>e</sup> et dernière étape de changement de cohérence du stimulus. Dans la seconde (« sans pression du temps »), les sujets disposaient de 5 secondes supplémentaires pour choisir la cible correcte.

## Résultats

L'analyse des temps de décision de chacun des sujets dans les essais « biais en faveur » et « biais en contre » tend à valider les prédictions du modèle « urgence » puisque pour la grande majorité d'entre eux (10/14 en condition « pression du temps » et pour 14/16 sujets en condition « sans pression du temps »), les temps de décision moyens dans ces deux types d'essai ne sont pas significativement différents (KS test,  $p < 0.05$ , figure 2A).

Une autre prédiction importante faite par le modèle « urgence » est que le niveau de confiance avec lequel les sujets vont prendre leur décision devrait diminuer au fur et à mesure que le temps passe au cours d'un essai. Pour tester cette prédiction, nous avons groupé les essais pour chaque sujet en fonction du nombre d'étapes de changement de cohérence passées avant le temps de décision et nous avons ensuite calculé pour cha-

que essai une estimation de l'évidence sensorielle favorisant la cible sélectionnée au moment de cette décision. Nous pensons que cette estimation reflète la confiance avec laquelle le sujet choisit une option plutôt qu'une autre. La figure 2B illustre le résultat de cette analyse pour les sujets ayant exécuté la tâche en condition « pression du temps » (panel de gauche) ou en condition « sans pression du temps » (panel de droite). Dans les deux cas, le niveau de confiance de la plupart des sujets baisse lorsque le temps nécessaire à la prise de décision augmente, en accord avec les prédictions du modèle « urgence ». Plus précisément, nous avons trouvé des régressions à pente négative pour tous les sujets ayant effectué la tâche « avec pression du temps », parmi lesquelles 10 sur 14 étaient significatives. En revanche, nous avons observé 13 et 3 régressions à pente négative et positive, respectivement, en condition « sans pression du temps ». Parmi les 13 régressions à pente négative, seules 4 sont significatives. En résumé, il y a une tendance pour les décisions tardives à être prises à un niveau de confiance plus faible et ce, particulièrement lorsque la pression du temps (urgence) est forte. Nous avons également mené une expérience



**Figure 2** : **A.** Comparaison des temps de décision moyens des sujets dans les essais « biais en faveur » (abscisse) et « biais en contre » (ordonnée). Les croix indiquent la moyenne et l'erreur standard pour les sujets pour lesquels la différence de temps de décision dans les deux types d'essais était significative. Les cercles représentent les sujets pour lesquels la différence n'était pas significative. Les symboles bleus représentent les sujets ayant effectué la tâche en condition « sans pression du temps » et les symboles noirs représentent ceux ayant exécuté la tâche dans la condition « pression du temps ». **B.** Analyse de l'effet du temps passé avant la prise de décision sur la confiance avec laquelle les sujets prennent leur décision. La confiance est estimée en calculant une quantité (SumLogLR) correspondant à l'évidence sensorielle favorisant la cible choisit par le sujet au moment de sa prise de décision. Les différentes lignes représentent les régressions linéaires effectuées sur les données pour chaque sujet ayant exécuté la tâche en condition « pression du temps » et « sans pression du temps ». Les lignes pleines représentent les régressions significatives.

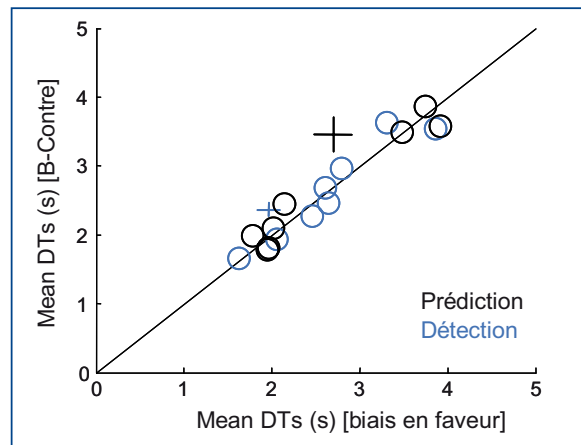
« contrôle » visant à tester l'effet de l'instruction donnée aux sujets sur les résultats observés. En effet, une différence majeure entre notre étude et celles supportant le modèle « intégration » est que dans ces dernières, les sujets devaient effectuer un jugement perceptif sur l'état « actuel » du stimulus. En revanche, ici, nos sujets devaient utiliser ce jugement perceptif instantané afin de prédire l'état futur du stimulus. Nous devons envisager que ceci ait pu affecter la stratégie utilisée par les sujets pour prendre leur décision. Pour ce faire, 9 sujets supplémentaires ont été testés dans une tâche consistant à prendre des décisions sur la base du stimulus décrit précédemment mais dans deux conditions d'instruction différentes. Dans la condition « prédiction », les sujets devaient exécuter la tâche décrite ci-dessus, à savoir prédire la direction dominante des points à la fin de l'essai. Dans la condition « détection », les sujets devaient indiquer la direction décrite par les points dès qu'ils en détectaient une.

Comme le montre la figure 3, les temps de décision moyens de la majorité des sujets (8/9) n'étaient pas significativement différents dans les essais « biais en faveur » et « biais en contre » et ce, même dans la condition « détection ». Ceci suggère que même lorsque les sujets doivent détecter la direction du mouvement momentané, leur comportement ne semble pas gouverné par un processus d'intégration.

## EXPÉRIENCE 2 : Dynamique temporelle de la prise de décision dans le cortex frontal du singe

### Méthodes

Les données comportementales recueillies chez l'homme, à la fois dans la tâche des jetons (Cisek et al., 2009) et celle décrite ci-dessus valident le modèle « urgence » pour la formation de la prise de décision dans la condition où l'information sensorielle favorisant un choix parmi deux possibles varie au cours du temps. Ce modèle fait également des prédictions quant à l'activité neuronale qui est à l'origine de la formation de la prise de décision. De nombreuses études neurophysiologiques sont à l'origine du concept selon lequel une décision est le résultat d'une intégration tem-

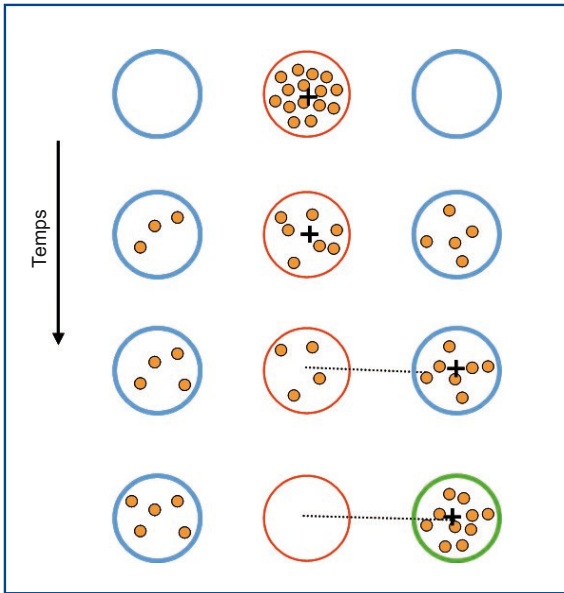


**Figure 3 : Comparaison des temps de décision** moyens des sujets dans les essais « biais en contre » et « biais en faveur » en fonction de l'instruction définissant le succès d'un essai. Dans la condition « prédiction », les sujets devaient prédire le mouvement cohérent dominant à la fin de l'essai. Dans la condition « détection », ils devaient rapporter la direction d'un mouvement cohérent dès qu'ils en percevaient un.

porelle de l'activité neuronale favorisant une option et ce jusqu'à atteindre un certain seuil qui marque le moment où la décision est prise (voir par exemple Roitman & Shadlen, 2002). Cependant, comme nous l'avons mentionné précédemment, ces études ont été conduites en utilisant des paradigmes dans lesquels le stimulus fournissant l'évidence sensorielle est maintenu constant au cours d'un essai. De ce fait, tout comme les observations comportementales, les résultats électrophysiologiques de ces travaux peuvent être expliqués par le modèle d'urgence. L'unique façon de différencier ces deux modèles est donc d'enregistrer l'activité neuronale liée à la prise de décision dans un paradigme expérimental dans lequel l'évidence sensorielle varie au cours de l'essai.

Nous avons donc entraîné un singe macaque rhésus à la réalisation de la tâche des jetons (figure 4). Nous avons choisi cette tâche plutôt que celle des « points » pour deux raisons : (1) nous disposons dès le début de l'entraînement du premier singe des données comportementales obtenues chez l'homme (Cisek et al., 2009) ce qui nous a permis de comparer et de guider l'entraînement et (2) cette tâche nous semblait *a priori* plus facile à apprendre à l'ani-

mal eu égard à la nature non bruitée du stimulus (voir figure ci-dessous).



**Figure 4 :** Tâche des « jetons » – Décours temporel. Pour chaque essai, le singe doit faire un choix à l'aide d'un mouvement de levier de la cible centrale vers l'une ou l'autre des cibles périphériques. Au début de chaque essai, il y a quinze petits jetons dans la cible centrale, qui se déplacent chaque 200ms vers l'une ou l'autre des deux cibles. La cible correcte est celle qui reçoit le plus de jetons à la fin de l'essai. Point important, le singe n'a pas besoin d'attendre la fin de l'essai pour faire son choix. Quand le choix est fait, les jetons restants se déplacent plus rapidement vers les deux cibles. Dans les essais dits « rapides », ce temps est très court (50ms) alors que pour les essais « longs », ce temps est fixé à 150ms. Avec cette tâche, l'animal est donc confronté à un compromis : soit décider d'atteindre la cible en fin d'essai, en faisant un choix très confiant ; soit décider de choisir plus rapidement, ce qui est plus risqué mais ce qui peut aussi permettre de gagner davantage de temps, tout particulièrement dans les essais « rapides ».

Durant toutes les sessions d'entraînement, la cible correcte de l'essai et chaque direction de déplacement de jeton était le résultat du hasard. Ce paradigme nous permet (comme pour la tâche des points) de définir le profil temporel de la probabilité de succès de chaque essai (voir la figure 1B pour les essais « biais en faveur » et « biais en contre »). Sur la base de ces profils temporels, nous définissons *à posteriori* et après chaque séance différents essais « spéciaux » que nous comparons ensuite afin de tester spécifique-

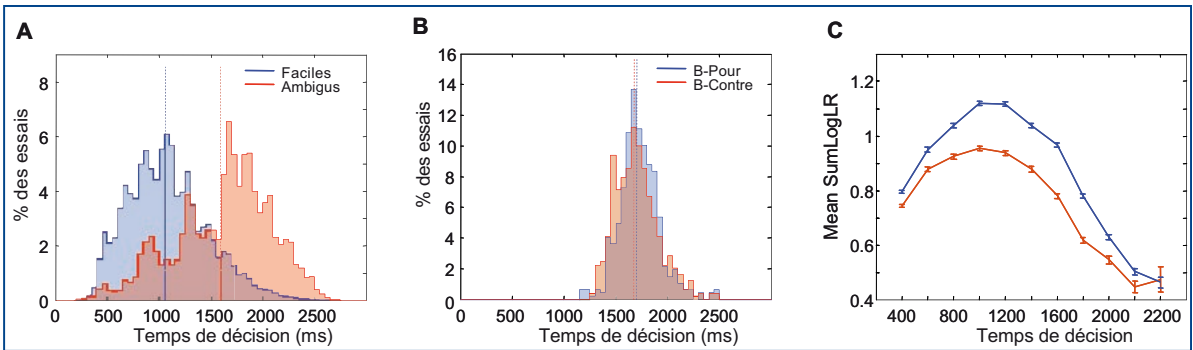
ment nos hypothèses sur l'aspect dynamique de la prise de décision. Nous avons ainsi des essais « faciles » et d'autres « ambigus » mais également les essais permettant de différencier les modèles « intégration » et « urgence », à savoir les essais « en faveur » et « en contre ». Les analyses comportementales portent principalement sur deux mesures : le temps de décision et la probabilité de succès au moment de la décision (données non présentées).

Pour la réalisation des enregistrements électrophysiologiques, une chambre d'enregistrement a été placée au-dessus de la partie rostrale du cortex pré moteur dorsal (PMd) de l'animal. Cette localisation nous a également donné accès au cortex préfrontal dorsolatéral (PFC). Nous avons utilisé un système d'enregistrement extracellulaire unitaire multi-électrodes. Les activités unitaires étaient isolées « online » afin de sélectionner les cellules possédant les propriétés intéressantes pour notre étude, puis analysées « offline » à l'aide de programmes Matlab.

## Résultats

### 1. Données comportementales

La figure 5A illustre les distributions des temps de décision du singe confronté à des essais « faciles » (les déplacements des jetons favorisent rapidement la cible correcte) et « ambigus » (les jetons se déplacent successivement dans les deux cibles jusque tard dans l'essai). Sans surprise, le singe est plus rapide pour prendre une décision lorsqu'un essai est facile (1058 vs 1592ms,  $p < 0.001$ , KS test). La partie B de cette même figure permet de comparer ensuite les temps de décision pour les essais « en faveur » et « en contre ». Contrairement aux prédictions du modèle « intégration » et en accord avec les données chez l'homme décrites dans l'expérience 1, les décisions ne sont pas significativement plus rapides lorsque les essais contiennent un biais initial favorisant la cible correcte. Enfin, la partie C de cette figure montre le résultat d'une analyse qui valide une nouvelle fois la prédiction faite par le modèle « urgence » quant à la confiance avec laquelle les sujets prennent une décision en fonction du temps qui passe. Ce modèle prédit en effet que cette confiance (estimée par le calcul d'une valeur liée à l'évidence sensorielle favorisant la cible sélectionnée par le sujet au moment de la prise de décision) décroît en fonction du temps (voir détails de l'analyse dans Cisek et al., 2009). Cette analyse permet



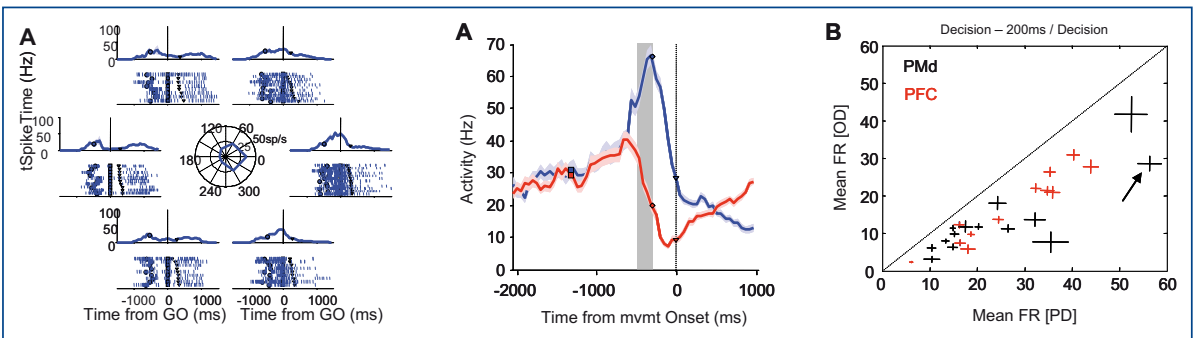
**Figure 5 :** **A.** Distributions des temps de décision du singe dans les essais « faciles » et « ambigus » pour toutes les séances comportementales et électrophysiologiques enregistrées. **B.** Distributions des temps de décision du singe dans les essais « biais en faveur » et « biais en contre » pour toutes les séances comportementales et électrophysiologiques enregistrées. **C.** Analyse du niveau de confiance du singe au moment de la prise de décision en fonction du temps passé avant la décision.

de montrer qu'après les 5 premiers mouvements de jeton (1s environ), l'estimation de l'évidence sensorielle au moment de la décision décroît au cours du temps, ce qui suggère que plus le temps passe et plus le singe est forcé de prendre une décision même si la confiance avec laquelle il fait ce choix est faible.

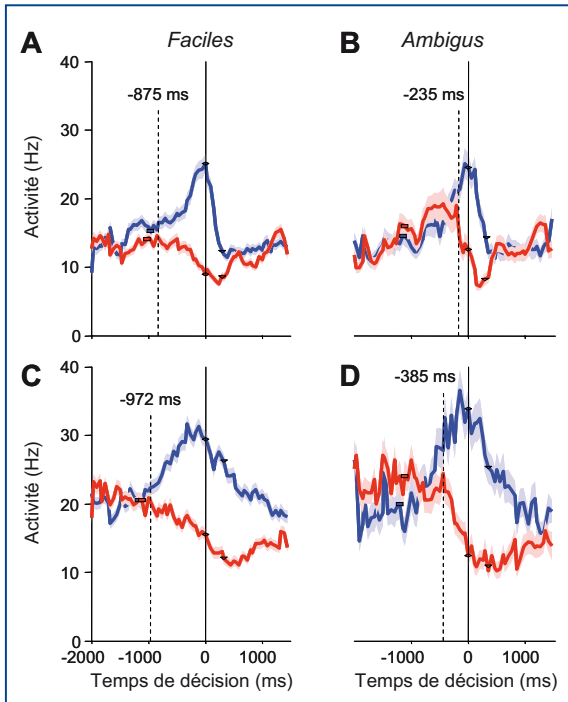
## 2. Données électrophysiologiques

Nous avons enregistré 143 cellules dans le cortex prémoteur dorsal et préfrontal de l'ani-

mal. Notre stratégie était de sélectionner pendant la séance les cellules liées à la tâche (cellules dont l'activité augmente ou diminue en relation avec un ou plusieurs évènements de la tâche). Nous avons ainsi isolé et enregistré 93 cellules liées à la tâche. Ensuite nous avons sélectionné en priorité les cellules (72, soit 77 %) présentant une préférence spatiale (« tuning ») visuelle, préparatoire et/ou motrice pour une des six cibles présentées dans une tâche de temps de réaction simple. Un exemple de cellule enregis-



**Figure 6 :** Exemple représentatif d'une cellule de PMd liée à la prise de décision. **A.** L'activité neuronale, représentée sous forme d'histogrammes de fréquence de décharge et de « rasters display » où chaque ligne représente un essai et chaque tiret un potentiel d'action, est enregistrée dans une tâche dans laquelle le singe doit déplacer le curseur, après un délai de préparation motrice, du centre de l'écran vers une des six cibles périphériques. Les 6 panneaux représentent la réponse de la cellule alignée sur le signal Go (indiquant au singe qu'il peut exécuter son mouvement) pour chacune de ces 6 cibles. Au centre, une représentation polaire illustre l'activité neuronale moyenne enregistrée entre l'apparition de la cible (ronds bleus) et l'initiation du mouvement (triangles bleus), correspondant à l'activité de préparation motrice, pour chacune des 6 cibles. **B.** Activité du même neurone de PMd dans la tâche des jetons lorsque le singe choisit la cible correspondant à la direction préférée de la cellule (cible de droite, bleu) ou la cible opposée à cette même direction (cible de gauche, rouge). L'activité moyennée (+/- erreur standard) est alignée sur le début du mouvement. Les marqueurs présents sur les courbes représentent le déplacement du premier jeton (carrés), le temps de la décision (losange) et l'initiation du mouvement (triangles). **C.** Comparaison des activités neuronales moyennes des cellules de PMd (noir) et PFC (rouge), calculées dans une fenêtre de 200ms précédant notre estimation du moment de la prise de décision (zone grisée dans B), lorsque le singe choisit la cible correspondant à la direction préférée de la cellule (PD, abscisse) ou la cible opposée (OD, ordonnée).



**Figure 7 :** Activité moyenne  $\pm$  l'erreur standard de la population de cellules de PMd (A et B) et de PFC (C et D) liées à la décision, alignée sur le moment de la décision, dans les essais corrects « faciles » (A et C) et « ambigus » (B et D), lorsque le singe choisit la cible correspondant à la cible préférée de la cellule (bleu) et celle située à une position diamétralement opposée (rouge). L'activité neuronale de PMd et PFC reflète le processus dynamique de prise de décision avant même que le singe ne décide de la cible de son choix. De plus et ce, d'autant plus rapidement que l'essai est facile.

trée dans PMd ayant une préférence spatiale pour la cible de droite pendant la période de préparation motrice est illustrée sur la figure 6A. Ces essais ont été enregistrés dans une tâche où une seule cible est présentée pour chaque essai (six positions possibles, séparées de 60° chacune autour d'un cercle de 5 cm de diamètre).

La figure 6B illustre l'activité de la même cellule dans la tâche des jetons. Ici, l'activité est alignée pour chaque essai sur le début du mouvement lorsque le singe choisit la cible correspondant à la préférence directionnelle de la cellule (cible de droite, en bleu) ou la cible opposée à la préférence directionnelle (cible de gauche, en rouge). Il est intéressant de noter que l'activité augmente progressivement jusqu'à atteindre un seuil (environ 65 potentiels d'action/seconde

dans ce cas) aux environs du temps de décision (symbolisé par un losange) pour ensuite diminuer avant l'exécution du mouvement. De plus, l'activité neuronale commence à montrer une influence de l'évidence sensorielle présentée à l'animal bien avant le moment de la prise de décision. Il est donc possible de prédire quel sera le choix de l'animal sur la base de l'activité neuronale avant l'exécution du mouvement. Nous avons enregistré 14 cellules dans PMd et 12 dans PFC possédant cette propriété. La figure 6C illustre une analyse de population montrant que l'activité moyenne pour ces cellules, calculée dans une fenêtre de 200ms précédant notre estimation du temps de la décision, est significativement plus importante lorsque la cible sélectionnée correspond à la direction préférée de la cellule.

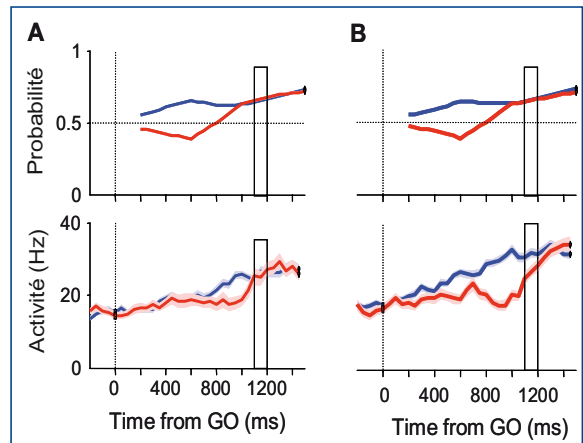
Il est encore plus intéressant de voir que l'activité de ces cellules reflète la dynamique de la prise de décision avant que le singe ne procède à son choix. La figure 7 illustre l'activité moyenne des 14 cellules de PMd (A et B) et des 12 cellules de PFC (C et D) liées à la prise de décision lorsque le singe choisit la cible correspondant à la direction préférée (bleu) ou opposée (rouge) des cellules au cours des essais faciles (A et C) ou ambigus (B et D). On remarque que dans les deux régions, les activités liées au choix de la direction préférée ou opposée diffèrent bien avant le moment de la prise de décision en tant que telle. Cette différence d'activité s'observe en outre de façon plus précoce lorsque les essais sont faciles. En revanche, lorsque les essais sont difficiles (égale répartition des jetons dans les deux cibles jusque tard dans l'essai), l'activité neuronale ne diffère entre les deux options que tardivement. Notons enfin que même si un profil d'activité similaire est observé pour les cellules du cortex prémoteur et préfrontal, le processus de décision semble intervenir légèrement plus rapidement dans ce dernier. Enfin, nous avons comparé l'activité de ces mêmes cellules dans les essais « biais en faveur » et « biais en contre », permettant de distinguer les modèles « intégration » et « urgence ». Nous avons analysé les cellules de PMd et de PFC en identifiant les essais dans lesquels la probabilité de succès atteint la même valeur ( $p = 0.62$ ) après les 5 premiers mouvements de jetons pour ensuite séparer ceux possédant un biais en faveur de la cible correcte et ceux possédant un biais initial favorisant la mauvaise cible. Le modèle « intégration » sug-

gère que l'activité neuronale représente l'intégrale de la probabilité de succès, et donc prédit que l'activité neuronale après le 5<sup>e</sup> mouvement des jetons dans les essais « en faveur » (pour la cible préférée de la cellule) sera plus importante que l'activité après le 5<sup>e</sup> déplacement des jetons dans les essais « en contre ». En revanche, le modèle « urgence » prédit qu'il n'y aura pas de différence d'activité dans ces mêmes conditions (figure 1C).

L'analyse de population pour les deux régions montre que l'activité neuronale moyenne de ces cellules reflète initialement le profil de probabilité des essais en montrant une différence significative entre les deux types d'essais. Cependant, après les 5 premiers mouvements de jetons (lorsque la probabilité de succès est similaire dans les deux types d'essais), l'activité converge rapidement et n'est pas significativement différente dans les essais « en faveur » et « en contre » (figure 8C pour les cellules de PMd et 8D pour PFC). Par conséquent, en accord avec nos données comportementales observées chez l'humain, nos analyses préliminaires montrent que l'activité neuronale n'est pas influencée par l'information présentée en début d'essai et suggèrent que l'activité neuronale dans le cortex frontal combine l'information sensorielle instantanée fournie par l'environnement avec un signal d'urgence qui croît au cours du temps, et la décision est prise lorsque le produit de cette combinaison atteint un seuil.

## Discussion

Les résultats de l'étude 1 tendent à montrer que, en accord avec l'étude menée par Cisek et collaborateurs (Cisek et al., 2009), les sujets forment leurs décisions en comparant à un seuil le produit de l'information sensorielle instantanée fournie par l'environnement avec un signal lié au temps qui s'écoule (modèle « urgence »). Les données présentées dans la seconde expérience permettent quant à eux de faire deux constats importants. Tout d'abord, le comportement du singe dans une tâche de prise de décision en conditions changeantes est très similaire à celui des humains confrontés à une tâche identique (voir Cisek et al., 2009) ou conceptuellement identique mais perceptivement plus complexe (voir données de l'expérience 1 présentées dans cet article). Ces données comportementales montrant que le singe semble lui aussi former ses



**Figure 8 :** Analyse ayant pour but de tester les prédictions des modèles « intégration » et « urgence » dans l'activité neuronale moyenne d'une population de cellules liées à la décision de PMd (A) et PFC (B). **Panneaux du haut.** Probabilité de succès dans deux types d'essais (liés aux essais « biais en faveur » et « biais en contre »). Dans les deux types d'essais, le même niveau de probabilité de succès est atteint après le 5<sup>e</sup> déplacement de jeton, mais dans un groupe, un biais initial favorise la cible correspondant à la direction préférée des cellules (bleu) alors que dans l'autre, le biais initial favorise la cible opposée (rouge). Seuls les essais pour lesquels le singe a pris sa décision après ce biais sont inclus dans l'analyse. **Panneaux du bas.** Activité neuronale moyenne d'une population de cellules de PMd (n = 16, C) et PFC (n = 13, D) dans les deux groupes d'essais décrits ci-dessus. Les cadres illustrent la période critique d'analyse pour la distinction des deux modèles.

décisions en comparant à un seuil le produit de l'information sensorielle instantanée avec un signal lié au temps qui passe valident le modèle « urgence ». Cette similitude permet d'envisager les mécanismes neuronaux à l'origine de ce mécanisme d'un point de vue inter-espèce. En effet, si le comportement observé chez l'homme et le singe est similaire, on peut envisager des mécanismes neuronaux communs pour ces deux espèces.

Le concept général de nombreux modèles liés à la prise de décision propose que les décisions simples impliquent une intégration temporelle des échantillons sensoriels disponibles dans l'environnement jusqu'à ce qu'un seuil soit atteint. Cependant, une intégration lente n'est pas optimale dans un environnement changeant continuellement et de façon imprévisible. Quelques études ont récemment montré que le juge-



ment perceptif pouvait être basé sur l'intégration très rapide de l'information sensorielle, permettant de fait cette grande capacité d'adaptation aux changements de l'environnement (Luna et al., 2010 ; Stanford et al., 2010). Les données neurophysiologiques de notre seconde étude montrent qu'en accord avec les données comportementales, les neurones de PMd et de PFC reflètent le profil de probabilité de succès liée à l'information disponible dans un environnement changeant mais n'intègrent pas cette information au cours du temps pour former la décision. Plutôt, nous faisons l'hypothèse que ces cellules utilisent cette information et la multiplie à un signal d'urgence qui est indépendant de l'évidence sensorielle mais qui est plutôt lié au temps qui passe. Les différents rôles joués par le PFC et PMd dans ce mécanisme ne sont pas encore accessibles d'après ces analyses préliminaires. Une de nos prédictions est que le PFC reflète davantage l'information disponible dans l'environnement alors que PMd intègre cette information et la combine à un signal d'urgence venant possiblement des ganglions de la base.

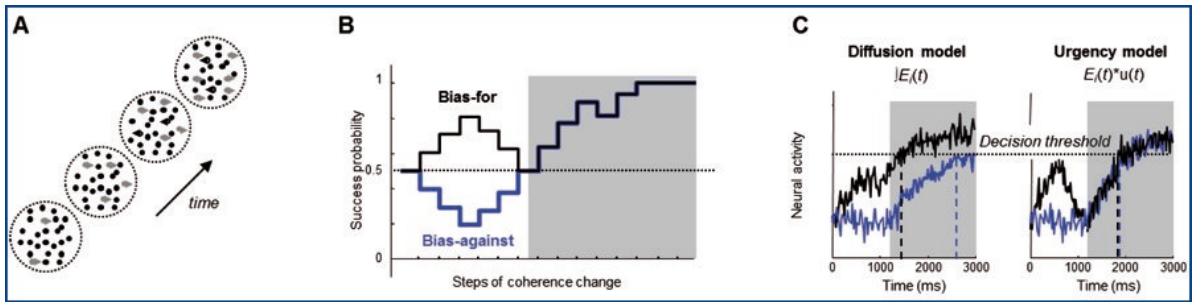
## Bibliographie

- Chittka L., Skorupski P. & Raine N. E. Speed-accuracy tradeoffs in animal decision making. *Trends Ecol Evol***24**, 400-407 (2009).
- Cisek P., Puskas G. A. & El-Murr S. Decisions in changing conditions : the urgency-gating model. *J Neurosci***29**, 11560-11571, (2009).
- Gold J. I. & Shadlen M. N. The neural basis of decision making. *Annu Rev Neurosci***30**, 535-574, (2007).
- Luna R., Hernandez A., Brody C. D. & Romo R. Neural codes for perceptual discrimination in primary somatosensory cortex. *Nat Neurosci***8**, 1210-1219, (2005).
- Roitman J. D. & Shadlen M. N. Response of neurons in the lateral intraparietal area during a combined visual discrimination reaction time task. *J Neurosci***22**, 9475-9489, (2002).
- Stanford T. R., Shankar S., Massoglia D. P., Costello M. G. & Salinas E. Perceptual decision making in less than 30 milliseconds. *Nat Neurosci***13**, 379-385, (2010).

## Introduction

In our daily life, we face many types of decisions, ranging from choosing our clothes to

choosing a career. Decisions as simple as choosing a flavor for an ice cream involve complex cognitive processes whose dysfunction lead to various mental pathologies, such as obsessive-compulsive disorder, schizophrenia, and both the cognitive and motor aspects of Parkinson's disease. To get a flavor of such complexity, imagine that you are driving somewhere and deciding on the best route. As you drive, your decision is informed by road signs, the advice of your passengers, information on a map, radio traffic reports, etc. Crucially, as you approach a potential turn, you are urged to make your decision even if you are not yet fully confident. Thus, the available information for making a choice is often changing continuously, and the urgency to choose one way or another is among many factors influencing the decision process. Because such complexity cannot be easily addressed in a laboratory, research into the temporal aspects of decision-making has primarily focused on simple perceptual choices. Most of these studies have provided support for a class of theories called "diffusion" models. According to these, when a subject observes an informative stimulus, task-relevant variables are encoded in early sensory areas and fed to integrators that *slowly accumulate* the total sensory evidence over time. A choice is made when the accumulated evidence in its favor reaches a threshold, and the setting of that threshold determines overall accuracy (for a review, see Gold and Shadlen, 2007). These studies have provided important insights into the neural mechanisms of decision-making during tasks in which subjects make perceptual judgments about stimuli whose informational content is *constant* during each trial. However, during natural behavior, the environment *can change* without warning. Integrators are not well-suited to such situations because they are slow to respond to changes in sensory information. To react quickly, animals must be very sensitive to novel information (Chittka et al., 2009). But if decisions are determined by information from a short time window, then why should neural activity continue to build-up for so much longer, as predicted by integrator models? In the present study, we propose an alternative mechanism, called the "urgency-gating", which stipulates that nervous system should quickly estimate evidence and multiply that with a gradually growing "urgency"



**Figure 1:** A. Time course of the variable coherence motion discrimination task. Initially, 200 dots move randomly. Then, every 225 ms, a fraction of dots (6, 3 %) begins to move coherently either to the left (black arrows) or to the right (gray arrows). Coherent motion favoring one of the two directions continuously evolves and subjects' task is to guess which net direction will be described by coherently moving dots at the end of the trial. B. Success probability profiles of bias-for (black line) and bias-against (blue line) trials. In both trial types, analyses focus on trials in which decisions are made after the initial bias (shaded gray area). C. Schematic evolution of neural activity of an hypothetical cell that prefers the correct target during "bias-for" (black) and "bias-against" (blue) trials, as predicted by the "diffusion" model (left panel) and the "urgency-gating" model (right panel). For any decision made after the 6<sup>th</sup> coherence step (gray area), the integrator model predicts that neural activity will reach the decision threshold (horizontal dotted line) faster in "bias-for" than in "bias-against" trials, resulting in shorter decision times in the former (vertical dotted black line) than in the latter (vertical dotted blue line). The urgency-gating model predicts no difference in behavior for the two trial types when decisions are made after the 6<sup>th</sup> coherence step.

signal. Urgency-gating and diffusion models make similar predictions in tasks during which sensory evidence is *constant* over the time course of a trial (in such condition, both models are mathematically almost equivalent, see Cisek et al., 2009 for details). However, models are distinguishable (both at the behavioral and the neural levels) if sensory evidence is *varied* during trials. Here, we first propose to describe human and non-human primate subjects' behavior during a decision task in which the information favoring one choice over another changed during each trial. We also explore the related neural activity in one monkey performing this changing evidence task.

## EXPERIMENT # 1: Human decisions in noisy and changing conditions

### Methods

Twenty-four subjects participated in this study. Each trial began when subjects placed the cursor in a small starting circle. Next, a random dot kinematogram consisting of 200 dots appeared in the center of the workspace with two target circles placed 180° apart. In the main task (Fig. 1A), the 200 dots initially moved purely randomly. Next, after 225ms, six of the dots began to move coherently to the left or the right, while 194 continued moving randomly. Next,

after another 225ms, another six of the randomly moving dots all began to move coherently either in the same or the opposite direction. The same procedure then continued: every 225ms another 6 of the randomly moving dots were assigned to either left or right – this was called a "coherence step". After 15 coherence steps, the stimulus remained at the resulting constant coherence until time ran out. The task for the subject was to move the cursor to the target corresponding to the direction of motion in which he/she predicted the dots will be moving at the end of the trial. Importantly, subjects were allowed to make their choice as soon as they felt confident enough to do it. Once a target was chosen, the interval between coherence steps was reduced from 225 to 48ms. Thus, subjects were presented with a trade-off between maximizing accuracy by waiting toward the end versus taking an early guess that risks errors but can save time. Fourteen subjects performed the "time pressure" version of the task, in which they had to make their decisions before the end of the 15th coherence step (~ 3375ms). Sixteen performed the "no time pressure" version in which they had an extra 5s of time (a total of 8375ms) to make their decisions, and during this time the coherence remained constant. Thus six subjects completed both of the two time pressure conditions in this task.

In each time pressure condition, all subjects were presented with the same pseudorandom sequence of 700 trials. Among them, about 25 % were fully random (each coherence step was randomly assigned). The other trials belonged to specific classes in which the steps were designed to test specific hypotheses about the temporal dynamics of decisions, among which “bias-for” and “bias-against” classes (Fig. 1B). In bias-for trials ( $\sim 10\%$ ), the first three coherence steps favored the correct target while the next three ones favored the opposite one, and the remaining steps resembled an easy trial. Bias-against trials ( $\sim 10\%$ ) were identical to bias-for ones except the first six steps were reversed. This comparison is critical because the two classes of models (“urgency” and “diffusion”) make distinct predictions about the timing of decisions in these trials (Fig. 1C). In particular, because integrator models retain a “memory” of previous coherence steps, they predict that after 1125ms (6 steps of novel information), neural activity related to the correct target will be higher (and therefore closer to threshold) in bias-for trials than in bias-against trials, because during the first 6 steps of bias-for trials the net motion is always in the correct direction. Consequently, these models predict faster decision times in bias-for than bias-against trials. In contrast, because the urgency-gating model integrates changes in motion information, it does not predict faster decisions in bias-for than bias-against trials (on trials in which correct decisions were made after 1125ms). This is because after the 6th coherence step, the changes in sensory information are balanced in both kinds of trials.

## Results

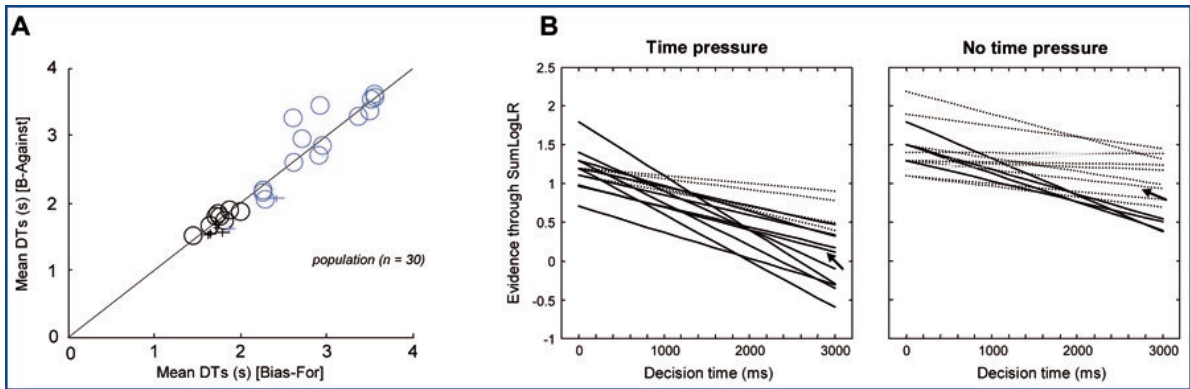
In agreement with the predictions of the urgency-gating model, we found that for most subjects (10/14 in the “time pressure” condition and 14/16 in the “no time pressure” condition), there was no significant difference between decision times in the bias-for and bias-against trials (KS test,  $p > 0.05$ , Figure 2A). One another key prediction of the urgency-gating model is that the level of confidence at which the subjects will make decisions should decrease as a function of the time taken to make the decision (see Cisek et al. 2009 for details). According to the model, the confidence should be related to the available sensory information at the time of decision. If this is

computed simply by adding up novel information, then it will be related to the sum of the log-likelihood ratios (SumLogLR) of individual coherence steps. To test this, we grouped trials according to the number of coherence steps that passed before the decision time and calculated the SumLogLR for the selected target at the time of the decision. At the population level we found a negative slope regression for all subjects performing the “time pressure” version of the task (mean:  $-0.068$ ; SD:  $0.036$ ), among which 10/14 (71 %) were significant (Fig. 2B). In contrast, we found 12 and 4 regressions with a negative and a positive slope, respectively, in the “no time pressure” condition (mean:  $-0.029$ ; SD:  $0.032$ ). Among the 12 negative regressions, only 4 were significant (25 %, Fig. 2C). In summary, there was a trend for later decisions to be made at a lower level of SumLogLR than decisions made early in the trial, especially under time pressure, consistent with the predictions of the urgency-gating model.

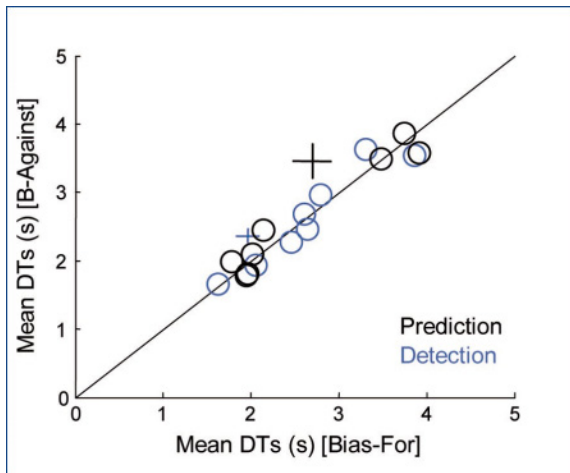
Despite the use of a noisy stimulus similar to the well-studied motion discrimination task, one important difference remains between our paradigm and those previous studies supporting the diffusion model. In studies that used constant evidence, subjects were asked to make a perceptual judgment about the *current state* of the stimulus. In contrast, here subjects were asked to use current perceptual judgments to infer a *prediction about the future state* of the stimulus. It is plausible that this produces a difference in the strategies used by the subjects.

To test this, nine subjects performed an additional control experiment. In a “prediction” condition, these subjects were instructed to predict the net motion direction *at the end of the trial*, just as in the experiments described above. In separate blocks, these same subjects also performed a “detection” condition, in which they were instructed to indicate the direction of motion *as soon as they detected one*, and to ignore any subsequent motion changes.

As shown in Figure 3, the majority of subjects (8/9) did not show a significant difference between decision times (after 1125ms) for bias-for versus bias-against trials even in the “detection” condition. This suggests that even when the subjects were asked to detect momentary motion, they were influenced by the motion signal but did not accumulate it for very long.



**Figure 2:** **A.** Comparison of subjects' mean decision times during bias-for (abscissa) and bias-against (ordinate) trials. (black: "time pressure", blue: "no time pressure"). Solid pluses indicate the mean  $\pm$  SEM of subjects for whom the difference was significant and circles represent subjects for whom it was not. There was no significant difference between decision times in bias-for and bias-against trials for 24 of 30 subjects. **B.** Analysis of the confidence level approximated as the sum of log-likelihood ratios at decision time for decisions made at different times. All trials are grouped according to the number of coherence steps that occurred before decision time and lines illustrate linear regression through the data. A significant regression (black solid lines) was found for 10 of 14 subjects in the "time pressure" condition (left panel) whereas for the "no time pressure" condition (right panel) we found only 4 significant regressions among the 12 negative slopes (dotted lines), as well as 4 regressions with a positive slope (gray dotted lines).



**Figure 3:** Effect of task instruction ("prediction" versus "detection") on mean subjects' decision times in bias-for and bias-against trials. There was no significant difference between decision times in bias-for and bias-against trials for 8 of 9 subjects in both the "prediction" (black) and the "detection" (blue) versions of the task.

## EXPERIMENT #2: Temporal dynamic of decision-making in monkey frontal cortex

### Motivations

Behavioral data described above (as well as those described by Cisek et al., 2009 in a similar task) tend to validate the urgency-gating model as

a mechanism of decision-making in conditions during which sensory evidence favoring one choice over another is changing over time. The urgency-gating model also makes clear predictions about neural activity related to decision formation. Traditionally, strong support for the diffusion model comes from neurophysiological data showing build-up activity related to the strength of sensory evidence in a large network of cortical and sub-cortical areas (see for instance Roitman & Shadlen, 2002). However, as stated above, most of these studies have typically used a direction of motion discrimination task using *constant* fields of drifting random dots. In such experimental condition, observed build-up activities can be explained by either a diffusion process (long-term integration of sensory evidence) or an urgency mechanism (sensory evidence gated by growing urgency). Consequently, the only way to distinguish the two models is to record neural activity in monkeys trained to perform a decision task during which sensory evidence is changing over time.

### Methods

We trained a monkey (*macaca mulatta*) to perform the "tokens task" described in figure 4's caption. We selected this task rather than the motion discrimination task described above for the following reasons: (1) Cisek et al. (2009) tested human subjects in the tokens task provi-

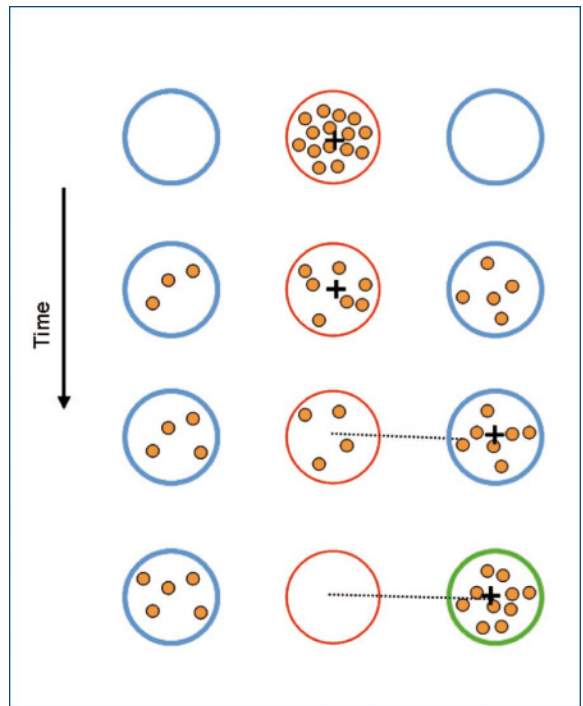
ding data for between species comparisons and (2) the absence of noise in the stimulus (tokens instead of dots, see figure 4) makes this task easier to learn for the monkey.

As for the motion discrimination task described above, the design of the tokens task allowed us to calculate, at each moment in time, the success probability associated with choosing each target and then define the success probability profile of a trial (see Fig. 1B for bias-for and bias-against trials). We then classified *à posteriori* some specific classes of trials embedded in a fully random sequence (random assignment to either rightward or leftward token jump for each step). Among them, we defined some “easy” trials in which tokens tended to jump consistently toward one of the targets, quickly driving the success probability for each toward either 0 or 1. In “ambiguous” trials, the initial token jumps were more balanced, keeping the success probability function close to 0.5 until late in the trial. Finally, we defined bias-for and bias-against trials, allowing us to distinguish between the diffusion and the urgency models’ predictions. In the present report, behavioral analysis focuses on one variable: monkey’s decision times (DT), estimated from animal’s behavior (see Cisek et al., for details). After completing training, the animal was implanted with a recording chamber centered over the arcuate sulcus using magnetic resonance imaging scans coupled with neuro-navigation software. This location allowed us to record neurons in both dorsal premotor cortex (PMd) and prefrontal cortex (PFC). Single-unit activity was then recorded with 1-4 independently moveable microelectrodes and data acquisition was performed with the AlphaLab acquisition system. Neural signal recorded from monkey PMd and PFC is amplified ( $\times 1000$ ) and filtered (300-3000 Hz). Action potentials are isolated to allow the online selection of cells showing task-related activity and to estimate their spatial tuning for choosing target locations. All tasks events, kinematics spike times are stored in a database accessed for data analysis *via* custom written scripts.

## Results

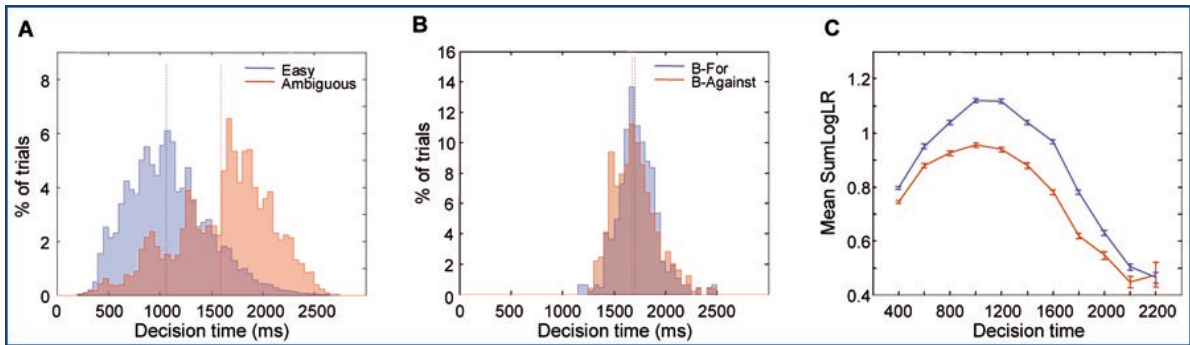
### 1. Behavior

In the tokens task, the monkey learned to base his decision on the pattern of token movements observed during a particular trial. To demon-



**Figure 4:** The tokens task. Monkey is presented with one central starting circle and two peripheral target circles. He begins each trial by placing a handle in the central circle in which 15 small tokens are randomly arranged (top row). The tokens then begin to jump, one-by-one every 200ms (“pre-decision” interval), from the center to one of the two peripheral targets (second row). The monkey’s task is to move the handle to the target which he believes will ultimately receive the majority of tokens (third row). The monkey is allowed to make the decision as soon as he feels sufficiently confident. When the monkey reaches a target, the remaining tokens move more quickly to their final targets (“post-decision interval”, which was either 50ms or 150ms in separate “fast” and “slow” blocks of trials). Once all tokens have jumped, a visual feedback is provided to the monkey (the chosen target turns green for correct choices or red for error trials) and he receives a drop of fruit juice for choosing the correct target (bottom row).

strate this, we first focused on comparing monkey’s DTs in easy and ambiguous trials. As expected, the monkey made decisions significantly sooner in easy trials compared to ambiguous ones (1058 *vs* 1592ms,  $p < 0.001$ , KS test, Fig. 5A). Figure 5B illustrates monkey’s DTs in “bias-for” versus “bias-against” trials. In contradiction with the prediction of the diffusion model (and in agreement with our observations in experiment #1), decisions are not faster during trials



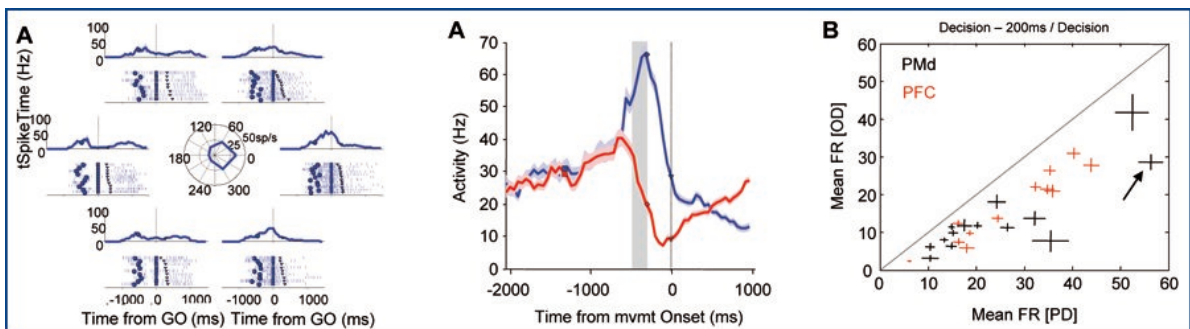
**Figure 5:** **A.** Distributions of monkey’s decision times in “easy” and “ambiguous” trials during all behavioral and electrophysiological sessions. **B.** Distributions of monkey’s decision times in “bias-for” and “bias-against” trials during all behavioral and electrophysiological sessions. **C.** Analysis of monkey’s confidence level at decision time as a function of decision duration in “slow” (blue) and “fast” (red) conditions.

in which an initial bias favors the chosen correct target. Then, we grouped trials according to the number of tokens that moved before the decision time and calculated an estimation of monkey’s accuracy criterion (or “confidence”, based on the sum of the log-likelihood ratios of individual token jumps) for the selected target at the time of the decision. The result for all trials is shown in Figure 5C. Except for fast decisions ( $< 1$  s), a simple linear regression through the data shows

a significant fit with a negative slope in both “fast” and “slow” blocks. This result demonstrates that the monkey uses a similar strategy as humans to solve the task, i.e. he decreases his accuracy criterion as a function of elapsing time, as predicted by the urgency-gating model.

## 2. Single-unit activity in PMd and PFC

Activity was recorded from 143 cells (from the arm area of PMd and from PFC) while the



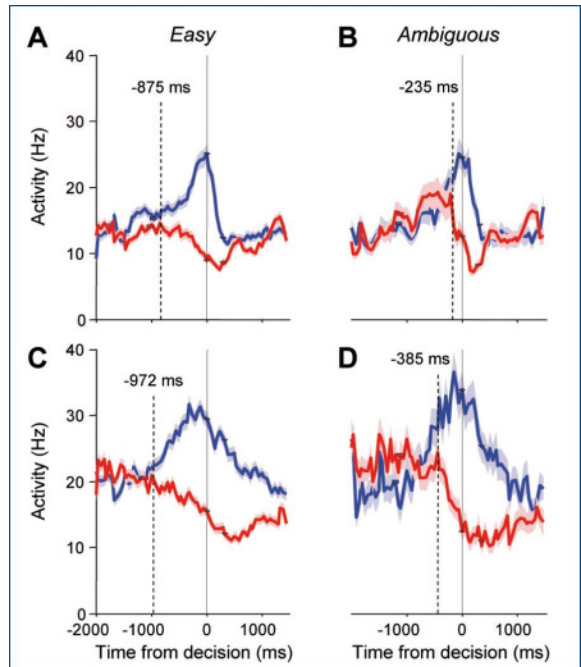
**Figure 6:** **A.** Activity of an individual PMd cell in the delayed reach task. Neuronal activity is shown in the form of conventional raster displays and spike density functions. In raster displays, each line represents a trial and each dot illustrates the occurrence of action potentials. In this delayed reach task, the monkey had to move the stylus within the central circle containing the 15 tokens. Then, one of six peripheral targets was presented on every trial and, after a variable delay ( $500 \pm 100$  ms), the 15 tokens simultaneously jump together in that target which instructs the monkey to move the handle (go signal) to the target in order to get a drop of fruit juice. Each panel illustrates neural activity aligned on the go signal for each of the six potential targets. In the center, a polar plot illustrates the mean activity calculated between target onset (blue dots) and movement onset (blue triangles) for each of the 6 targets. **B.** Activity of the same PMd neuron recorded in the tokens task. Mean activity ( $\pm$  standard error) is aligned on movement onset when monkey either chooses cell’s preferred target (right target in A, blue) or non-preferred target (left target in A, red). In both conditions, symbols illustrate mean trial start time (squares), mean decision time (diamonds) and movement onset time (inverted triangles). **C.** Comparison of mean activity of all PMd (black) and PFC (red) decision-related cells, calculated in a 200ms window preceding decision times (gray shaded area in B), when monkey chose cell’s preferred target (PD, abscissa) or opposite target (OD, ordinate).

monkey performed the tokens task. Among a population of 93 cells showing a rise of activity during one or several task periods (task-related cells), 72 (77 %) had significant directional tuning previous to movement onset in a simple delayed reach task. An example PMd cell showing these characteristics is illustrated in figure 6A. This cell increases its activity during the preparation of a visually-guided hand movement to the right target in a task during which a single target is presented to the monkey (see details in caption).

Figure 6B shows the neural activity, aligned on movement onset, of the same PMd cell recorded now when monkey was performing the tokens task and either chose cell's preferred target (PT) or the opposite one (OT). Neural activity related to cell's PT shows a striking characteristic: between the start of token jumps and movement onset, activity grows and reaches a peak (about 65 spikes/s) slightly after our estimation of decision time and then decreases prior to movement onset. Moreover, the cell begins to show influences of the mounting sensory evidence well before decision time and movement onset. Its activity is thus predictive of monkey's future choice. We did record 14 PMd and 12 PFC cells showing these properties. Figure 6C shows the average activity calculated for each cell in a 200ms window preceding our estimation of monkey's decision times for trials during which monkey chose cell's PT (abscissa) or OT (ordinate). For every cell, the average activity is significantly higher when monkey chooses cell's PT.

It is also worth noting that cells' activity reflects the temporal dynamic of decision formation before monkey commits to his choice. Figure 7 shows the average activity of 14 PMd and 12 PFC decision-related cells when monkey either chooses cell's preferred target or opposite one during easy and ambiguous trials. In both areas, cells discriminate (the time at which neural activity related to cell's PT *vs* OT differs significantly) the target chosen by the monkey well before decision time and this discrimination time is significantly earlier in easy compared to ambiguous trials. Despite the fact that a similar pattern of activity is observed in PMd and PFC, discrimination times seem to occur slightly earlier in PFC compared to PMd. Importantly, at the time of decision, activity reaches a peak which is fairly constant regardless of the trial types. Overall,

these observations suggest that PMd and PFC cells are strongly involved in the decision-making process.

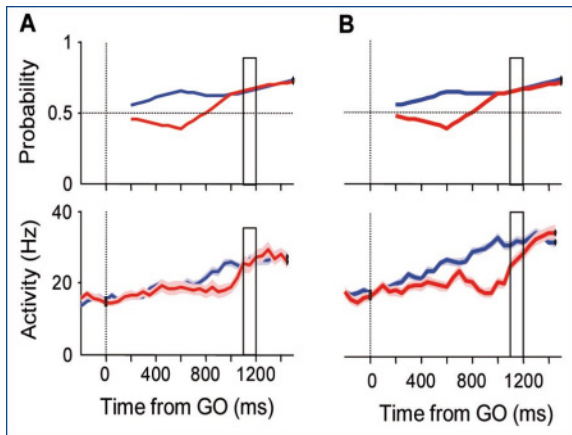


**Figure 7:** Average response from 14 PMd neurons (A and B) and 12 PFC neurons (C and D), aligned on our estimation of decision time, during easy (left panels) and ambiguous (right panels) trials in which the monkey correctly chose the cell's preferred target (PT, blue) or the opposite target (OT, red). The neural activity begins to show influences of the mounting evidence before decision time and the lead with which it appears is dependent on the time course of tokens movements.

Finally, we compared the neural activity of these decision-related cells during both "bias-for" and "bias-against" trials, allowing us to distinguish the predictions made by the urgency and the diffusion models at the neural level. Here, success probability during the two kinds of trials reaches the same level of probability ( $p = 0.62$ ) after 5 token movements, but in one group (bias-for, blue), evidence for the PT is high early on while in the other group (bias-against, red) it initially favors the OT (Figure 8A and 8B). Only cases in which the monkey waited at least 1200ms before deciding are analyzed. Because diffusion model retains a "memory", it suggests that, after 5 token jumps, neural activity related to the cell's PT will be higher in bias-for trials than in bias-against trials. In contrast, the urgency-gating

model does not predict a significant difference because after the 5th jump the current evidence is the same in both kinds of trials (figure 1C).

Population analysis of PMd and PFC cells shows that neural activity initially reflects success probability profiles of both trial types (bias-for and bias-against). However, during the epoch of critical interest (100-200ms after the 5th token movement, black borders), neural activity is the same in the two trial groups. Consequently, in agreement with the behavioral data described in experiment #1, analyses on neural data show that PMd and PFC neural activity does not integrate sensory information provided by the stimulus but may instead combine it with a motor-related (or urgency) signal that grows over time. Decision is made when the resulting signal reaches a fixed threshold.



**Figure 8:** Diffusion *versus* urgency in monkey PMd (A) and PFC (B). **Top panel:** Success probability during two kinds of trials in which the same level of probability is reached after 5 token movements, but in one group (blue), evidence for the PT is high early on while in the other group (red) it initially favors the OT. **Bottom panels:** Average response from 16 PMd neurons (A) and 13 PFC neurons (B), aligned on the start of token movement, during the same kinds of trials. Black borders illustrate the critical period of analysis for the discrimination of the two models.

## Discussion

Many recent models propose that decision-making involves the temporal integration of sequential sensory samples until a fixed bound is reached (“diffusion” model, see Gold and Shadlen for a review, 2007). Here, we propose an alternative to the classic model. The “urgency-gating” model stipulates that subjects form deci-

sions by comparing to a threshold the product of the momentary information provided by the environment with a growing signal related to elapsed time (“urgency”). Importantly, the urgency-gating model cannot be distinguished from the diffusion model in tasks during which the sensory evidence is constant. The use of non-stable evidence tasks allows us to demonstrate here that subjects’ behavior is more consistent with the prediction of the “urgency-gating” model in both humans (experiment #1 and Cisek et al., 2009) and non-human primates (experiment #2). Regarding the neural correlates of this process, it is worth noting that potential pitfalls for neurophysiology are to study monkeys’ species-specific behaviors or idiosyncratic biases induced by overtraining, neither of which would likely shed light on human natural behavior. However, a major strength of the present study is the parallel testing of monkeys and humans using the same apparatus and conceptually similar tasks. Consequently, the similarity of results between monkeys and humans confirms that monkey neurophysiology can provide valid insights into the neural bases of human decision-making processes. In recent years, significant progress has been made toward understanding the neural basis of primate decision-making. Most decision-making studies and models have suggested that simple decisions are made through a process of “diffusion”, in which neurons integrate sensory evidence until a threshold is reached. However, slow integration is suboptimal if the environment changes, motivating animals to make perceptual judgments using a short temporal window (Chittka et al. 2009). Indeed, several studies have shown that decisions appear to be based primarily on information from a short time window (Luna et al., 2010; Stanford et al., 2010), raising the question of what could be responsible for the much longer lasting build-up of neural activity that appears to determine the timing of decisions. Prior to the choice commitment, our neurophysiological data show that PMd and PFC decision-related activities reflect the profile of evidence presented to the monkey. Consistent with behavioral data in both humans and monkeys, preliminary analyses also show that neural activity at a given moment is *not significantly influenced by the information presented earlier in the trial*. This observation leads us to propose that neural activity in frontal cortex does not inte-



grate sensory information provided by the environment but instead combines it with a growing urgency signal, and decisions are made when this quantity reaches a threshold. A question raised by our model concerns the origin of the urgency

signal. Although we cannot exclude a role of PMd and PFC in the generation of the urgency signal, an alternative and appealing option is that they all receive a common urgency signal coming from basal ganglia (BG).

# Traitement des signaux visuels dans le cerveau de l'abeille : étude de la voie ventrale par imagerie calcique *in vivo*

Nobuhiro YAMAGATA

## Résumé

Chez les insectes, les signaux visuels détectés au niveau de la rétine de l'œil composé sont transmis à différents centres du cerveau, qui peuvent être divisés en deux régions ventrale et dorsale. Les régions dorsales sont connues pour être impliquées dans le traitement du flux optique sur un champ visuel relativement important, contribuant ainsi à la posture de l'animal en vol, et probablement à l'estimation de la distance par rapport aux objets de son environnement. À l'inverse, le rôle des régions ventrales est moins bien connu. Dans ce travail, nous étudions pour la première fois, grâce à une nouvelle approche d'imagerie fonctionnelle calcique, les propriétés d'un groupe majeur de neurones ventraux, qui amènent l'information visuelle du troisième centre visuel, la lobula, vers une structure encore peu étudiée, le tubercule optique antérieur (TOA).

## Mots-clés

Vision, imagerie calcique, traitement nerveux, tubercule optique, lobula, insecte

## Visual processing in the honeybee's "ventral stream": optophysiological calcium imaging from the lobula-anterior optic tubercle tract

## Abstract

In insects, visual information processed in the retina is conveyed to various brain regions, which can be roughly divided into dorsal and ventral regions. Dorsal regions are known to process optic-flow cues over large visual fields, thus contributing to the control of flight posture and probably to distance estimation. Functional studies on ventral regions, on the other hand, are scarce. Here we focused on a subset of neurons connecting the tertiary visual center, the lobula, with one of these structures, the anterior optic tubercle, in the honeybee brain, and studied their physiological properties.

## Keywords

Calcium imaging, object vision, anterior optic tubercle, lobula, insect

## Introduction

Le monde visible consiste en un ensemble d'informations qui peuvent être divisées selon certaines caractéristiques comme la couleur, le mouvement, la forme, la profondeur ou la texture, et dont la séparation par le cerveau permet d'améliorer la perception visuelle et notre compréhension du monde (Livingstone et Hubel, 1988). Comme l'avaient suggéré des études cliniques, le cerveau semble traiter séparément l'information concernant ces différentes caractéristiques. Par exemple, certains patients atteints par des accidents vasculaires cérébraux ont pu

perdre toute perception du mouvement sans pour autant montrer de déficit de perception de la couleur ou de la forme (Zihl et al., 1983). En effet, les recherches effectuées chez les primates en particulier ont montré l'existence dans le cerveau de voies fonctionnelles parallèles pour la perception du mouvement (voie dorsale) et pour celle de la couleur et de la forme (voie ventrale) (Mishkin et Ungerleider, 1982 ; Ettliger, 1990), même si cette séparation ne semble pas totale (Gegenfurtner et Hawken, 1996 ; Cavanagh et al., 1998). Pour comprendre la perception visuelle, il est particulièrement important de préciser où et

dans quelle mesure l'information visuelle est séparée dans le cerveau, mais aussi comment ces différentes caractéristiques sont ensuite réintégrées pour permettre une perception visuelle globale. Malheureusement, ces questions représentent un challenge très important chez les vertébrés supérieurs, du fait de la complexité de leur cerveau et des réseaux nerveux impliqués dans ces processus.

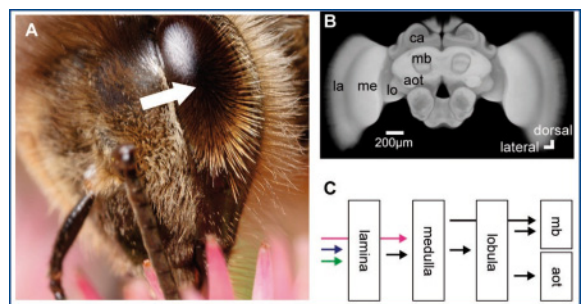
L'abeille domestique est un modèle animal qui présente de grands avantages lorsqu'on s'intéresse au traitement parallèle de l'information visuelle dans le cerveau. Tout d'abord, cet insecte possède une vision trichromatique (Daumer, 1956) qui suit une architecture et des principes fonctionnels similaires à ceux trouvés chez l'homme. Elles sont capables de discerner les mêmes caractéristiques des signaux visuels que l'homme (couleur : Menzel et Backhaus, 1991 ; mouvement : Srinivasan et al., 1999 ; forme : Lehrer, 1999a ; profondeur : Lehrer et al., 1988 ; texture : Zhang et al., 1995). Les abeilles utilisent aussi l'information de mouvement pour contrôler leurs réponses optomotrices (Kaiser et Liske, 1974), processus impliqué en particulier dans la stabilisation de l'animal en vol. Les données comportementales montrent que l'information de mouvement est alors découplée de l'information de couleur. Une telle séparation est en accord avec les observations faites chez d'autres insectes, où une « voie ventrale » dans le cerveau traiterait l'information de couleur (Paulk et al., 2009) et de forme (Strausfeld et Lee, 1991) – vision d'objet – et une « voie dorsale » serait dédiée au traitement des signaux de flux optique sur de larges champs visuels – vision de mouvement (Borst et al. 2010). À ce jour, si la deuxième est relativement bien comprise (Borst et al. 2010), les connaissances fonctionnelles concernant la première sont encore limitées.

Quoi qu'il en soit, il semble d'après ces données que les insectes et l'homme partagent une stratégie commune de traitement de l'information visuelle, mettant en jeu deux voies principales. On peut se demander si les stratégies utilisées par ces organismes pour séparer et re-intégrer les informations visuelles sont elles aussi communes.

Un grand avantage de l'utilisation de l'abeille comme modèle animal est la taille relativement limitée de son cerveau (un volume approximatif de 1 mm<sup>3</sup>), contenant seulement 10<sup>6</sup> neurones

(par rapport aux 10<sup>11</sup> neurones du cerveau humain). Ceci simplifie considérablement la recherche des corrélats neuronaux de la perception visuelle.

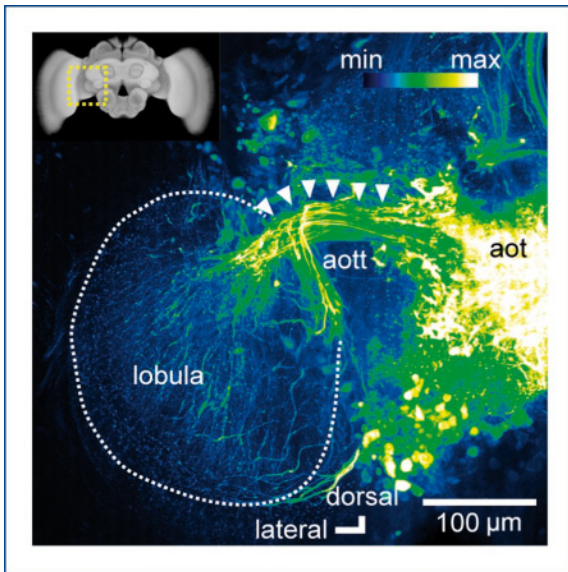
L'œil composé des abeilles consiste en environ 5 400 unités fonctionnelles, les ommatidies, qui sont des structures en forme d'alvéole, et représentent autant de systèmes optiques unitaires placés sur la surface convexe de la tête et pointant vers des directions légèrement différentes, de sorte qu'un large champ visuel est couvert (**Fig. 1A**). Chaque ommatidie contient des cellules photoréceptrices, qui donnent à l'abeille sa vision trichromatique, de par l'existence de trois types de récepteurs sensibles à la lumière dans le domaine UV (type S), bleu (type M) et vert (type L) (Menzel and Backhaus, 1991). Les neurones photorécepteurs de types L et M se projettent vers une première structure parallèle à l'œil, la lamina, et ensuite vers un second centre, la medulla grâce à des interneurons (**Fig. 1B, C**). Les neurones de type S, eux, se projettent directement dans la medulla. Ainsi, l'information provenant des trois photorécepteurs se rencontre donc seulement à partir de la *medulla*, donnant lieu à la sensation de couleur. Depuis la *medulla*, des interneurons innervent une troisième structure, la lobula. Comme l'information se transmet de manière conservée au sein de colonnes correspondant à chaque ommatidie, on pense que l'information rétinotopique est présente jusque



**Figure 1.** Structure du système visuel de l'abeille. **A)** Tête d'abeille montrant l'œil composé (flèche). **B)** Cerveau d'abeille avec les structures de traitement de l'information visuelle. **C)** Diagramme schématisé de la transmission de l'information visuelle dans le cerveau de l'abeille. Certaines régions ne sont pas indiquées par souci de clarté. la : lamina, me : medulla, lo : lobula, aot : tubercule optique antérieur, ca : calyces, mb : corps pédonculés.

dans la partie la plus distale de la *lobula* (Ribi et Scheel 1981). C'est à partir de la *medulla* et de la *lobula* que l'information visuelle est séparée en une « voie ventrale » et une « voie dorsale » (voir plus haut).

Le tubercule optique antérieur (TOA) est, avec les corps pédonculés, une des structures visuelles du cerveau les plus proéminentes. Il reçoit l'information visuelle par l'intermédiaire d'un tractus neuronal majeur, provenant de la *lobula* (tractus *lobula*-TOA – noté *aott* en Fig. 2). Cependant, à ce jour, la fonction du tubercule optique et de ces neurones dans le traitement de l'information visuelle est très mal connue. Afin d'élucider le rôle fonctionnel de cette « voie ventrale » du cerveau de l'abeille, nous avons étudié les réponses des neurones du tractus *lobula*-TOA à des signaux stationnaires ou de mouvement, aussi bien chromatiques qu'achromatiques.



**Figure 2.** Image confocale du tractus de neurones reliant la lobula au tubercule optique antérieur. Des innervations isomorphiques sous forme de colonnes parallèles dans la lobula forment un faisceau épais de neurones (*aott*, flèches) qui se projettent vers le tubercule optique antérieur (*aot*). En haut à gauche, la localisation de la région imagée par rapport à l'ensemble du cerveau.

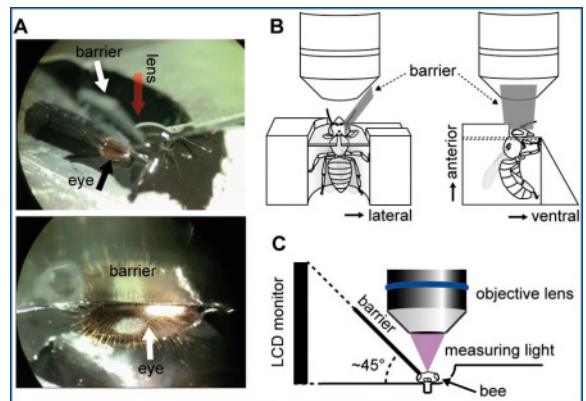
## Méthodes

Afin de réaliser des enregistrements physiologiques de l'activité des neurones du tractus *lobula*-TOA qui ont des axones très fins, nous avons utilisé la technique de l'imagerie calcique *in vivo* appliquée au système visuel de l'abeille. Cette

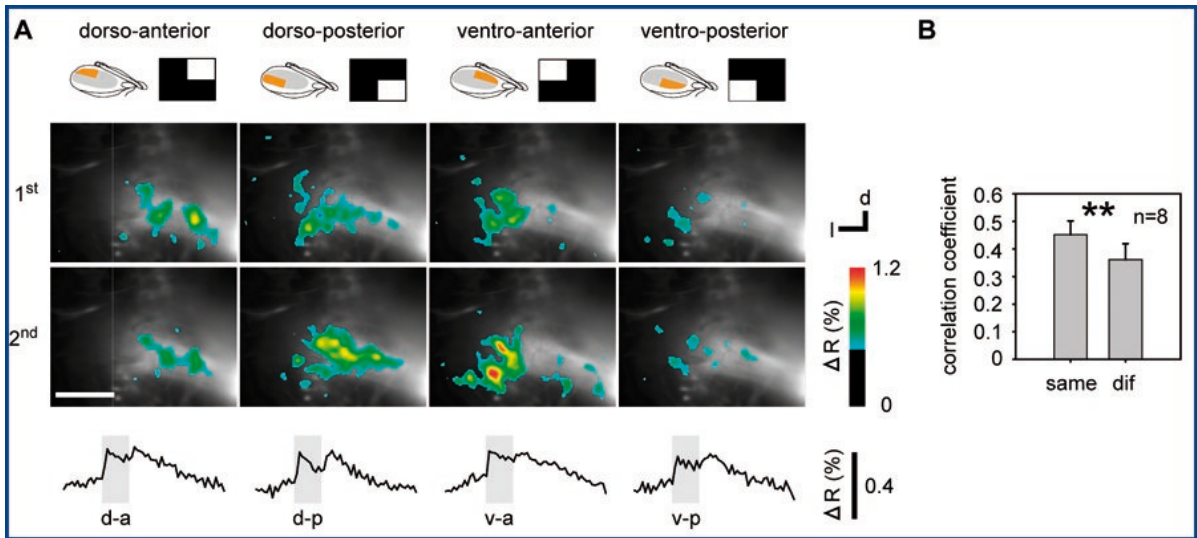
méthode utilisée jusqu'à ce jour uniquement au niveau du système olfactif de l'abeille, permet d'enregistrer simultanément les réponses de grandes populations de neurones.

Les abeilles étaient fixées dans des chambres en plexiglas à l'aide d'une cire spéciale fondant à basse température, de telle sorte que l'œil était accessible et placé horizontalement (Fig. 3). La capsule céphalique était ouverte à l'aide d'un micro-scalpel, et le cerveau exposé afin de pouvoir déposer à l'aide d'une microélectrode de verre un indicateur calcique fluorescent au niveau du tractus de neurones *lobula*-TOA.

Une particularité de l'adaptation de cette technique à l'étude du système visuel était de parvenir à empêcher les contaminations éventuelles des faibles niveaux de lumière mesurés en fluorescence pour suivre l'activité cérébrale, par la lumière – plus intense – nécessaire pour stimuler l'œil de l'abeille. Ce problème a été résolu en installant une barrière plastifiée entre l'œil composé et l'objectif du microscope et en engonçant l'œil dans une pâte opaque développée par nos soins, à base de résine époxy et de noir de vigne. Des stimuli chromatiques et achromatiques étaient présentés à l'œil droit de l'abeille, grâce à un écran plat contrôlé par un ordinateur. L'écran était centré par rapport à l'œil de l'abeille et placé précisément à une distance de 25 cm, correspondant à 75° dans l'axe long de l'œil et environ 45° dans l'axe court (Fig. 3C).



**Figure 3.** Nouvelle préparation d'imagerie calcique *in vivo* pour l'étude de la vision. **A)** La tête placée dans la chambre d'imagerie ; **B)** schéma montrant le positionnement de l'abeille et de la barrière de séparation entre zone de stimulation et objectif du microscope ; **C)** schéma global de la préparation. Voir détails dans le texte.



**Figure 4.** Réponses calciques des neurones du tractus *lobula-TOA*. **A)** Cartes d'activité et décours temporel pour la stimulation de quatre régions différentes de l'œil par quatre rectangles sur l'écran. **B)** Le coefficient de corrélation entre cartes d'activité pour la répétition du même stimulus (« same ») était supérieur à celui obtenu entre stimuli différents (« dif »), ce qui indique un codage spécifique de la région de l'œil, et donc une rétinitopie.

## Résultats

Notre nouvelle méthode d'imagerie calcique *in vivo* dans le système visuel de l'abeille nous a permis d'enregistrer des signaux reproductibles et de très bonne qualité, au niveau des neurones du tractus *lobula-TOA*. À l'aide de cette technique, nous avons étudié deux caractéristiques importantes de l'information visuelle chez ces neurones, sur la base des prédictions faite par Strausfeld et Lee (1991) et Paulk et al. (2009), selon lesquelles, cette voie ventrale serait impliquée dans le traitement de la forme et de la couleur. Il s'agissait donc d'étudier 1) la rétinitopie (organisation spatiale de l'information sur l'œil) ; et 2) l'opposition spectrale (codage de la couleur).

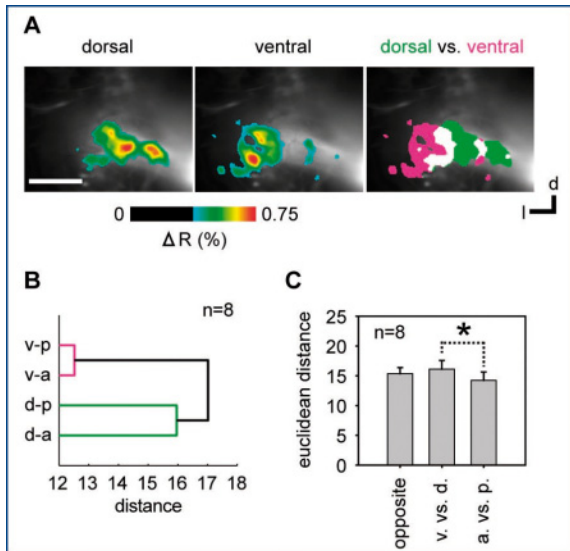
### Activation par la stimulation de différentes régions de l'œil

Du fait de l'organisation columnaire des premiers centres visuels jusqu'à la *lobula* distale (Ribi et Scheel 1981, voir introduction) et de la structure isomorphe des neurones du tractus *lobula-TOA*, il semble réaliste de penser qu'une certaine organisation rétinitopique est conservée dans ces neurones, et que l'information provenant de régions différentes de l'œil sont représentées dans des sous-populations de neurones différents. Pour examiner cette possibilité, nous avons présenté aux abeilles quatre rectangles

blancs indépendants, correspondant aux quatre quarts de l'écran de stimulation (Fig. 4A). Les neurones du tractus *lobula-TOA* répondent à chaque stimulus avec une intensité et un décours temporel similaires (Fig. 4A). Cependant, on observe que des régions différentes sont activées par ces stimuli, ce que l'on peut confirmer à l'aide de mesures de similarité entre cartes d'activité (coefficient de corrélation). En effet, la corrélation entre cartes était significativement supérieure lorsqu'on présentait le même stimulus (par exemple le rectangle dorso-antérieur) que lorsqu'on présentait des stimuli différents (par exemple les rectangles dorso-antérieur et dorso-postérieur) (Fig. 4B, \*\*  $p < 0.01$ , test de Wilcoxon). Ceci indique donc un codage rétinitopique dans les neurones du tractus *lobula-TOA*, des champs récepteurs différents étant représentés au sein d'unités neuronales différentes.

Ceci soulève une nouvelle question : comment cette organisation rétinitopique est-elle arrangée dans ces neurones ? Nos cartes d'activité montrent principalement une distinction entre les parties dorsale et ventrale de l'œil (Fig. 5A, B). La différence entre cartes selon l'axe dorso-ventral était ainsi significativement plus importante que selon l'axe antéro-postérieur (\*  $p < 0.0167$ , WCX-test, Fig. 5C). Nous

concluons donc que l'information rétinienne est principalement codée au sein des neurones *lobula-TOA* selon l'axe dorso-ventral.

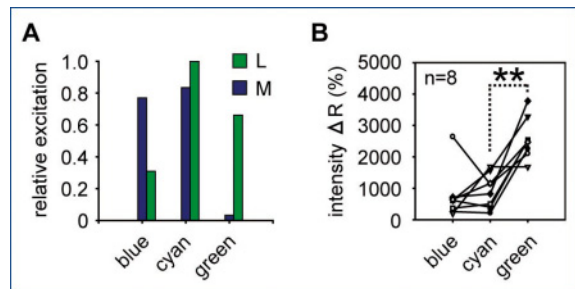


**Figure 5.** A) Réponses distinctes obtenues dans le cas de stimulations dorsales et ventrales. B, C) La différence entre les cartes d'activité était supérieure pour l'axe dorso-ventral que pour l'axe antéro-postérieur.

### Opposition spectrale

L'opposition spectrale est une manière de coder l'information de couleur, et consiste en une transmission antagoniste de l'information des différents types de photorécepteurs. Elle a pour avantage de réduire la redondance des informations obtenues par les photorécepteurs, et de permettre une transmission et un codage plus efficace du contraste coloré (Doi et al., 2003). Cette stratégie de codage est par exemple bien connue chez les primates, où des neurones à opposition spectrale ont été décrits en détail (Schiller et Logothetis, 1990). Chez l'abeille, l'espace perceptuel des couleurs, que l'on peut mesurer expérimentalement, semble être bien expliqué par l'utilisation d'un codage antagoniste des photorécepteurs. Et en effet, un corrélat neuronal d'un tel processus a été observé dans son cerveau, sous la forme de neurones à opposition spectrale (Menzel et Backhaus, 1991). Encore une fois, il semble qu'il existe une architecture similaire chez les insectes et chez les primates pour traiter l'information de couleur. Dans cette étude, nous nous sommes donc demandé si les neurones *lobula-TOA*

montraient une opposition spectrale. Une interaction antagoniste, basée sur un effet inhibiteur, est difficile à démontrer directement, et est plus facilement révélée dans le contexte d'une réponse excitatrice. Nous avons donc cherché à exciter deux types de photorécepteurs (types M et L) en même temps, sous forme d'un mélange coloré. Sur notre écran RGB, les pixels bleus et verts excitent chacun les photorécepteurs de type M et L. On peut donc stimuler l'œil avec une lumière bleue, verte, ou cyan, lorsque les pixels verts et bleus sont allumés en même temps. Ainsi, la lumière cyan procurait une intensité lumineuse plus importante à l'œil mais un contraste coloré moindre (Fig. 6A). Nous avons pu observer des cartes d'activité intenses et distinctes pour les lumières bleue, verte et cyan. Mais le résultat le plus important est que l'intensité de la réponse neuronale était significativement plus faible pour le cyan que pour le vert présenté seul (Fig. 6B, \*\*  $p < 0.01$ , test de Steel-Dwass), malgré le fait que la luminance de la stimulation cyan était clairement plus élevée. Une telle sommation non-linéaire de l'information de deux photorécepteurs correspond à un phénomène d'opposition spectrale. Ce résultat démontre donc que ces neurones codent l'information de couleur.



**Figure 6.** Réponse à des stimuli de couleur. A) Prédiction de l'excitation relative de 2 types de photorécepteurs (M et L) lors de la stimulation avec un stimulus cyan (bleu + vert) et un stimulus vert ; B) Malgré l'intensité lumineuse plus importante de la stimulation cyan, la réponse neuronale est réduite par rapport à la stimulation verte (la plus intense entre vert et bleu). Ainsi ajouter du bleu au vert réduit la réponse au lieu de l'augmenter, ce qui montre un processus d'opposition spectrale.

### Discussion

Nous avons donc réussi à établir une nouvelle méthode d'imagerie calcique *in vivo* dans le cerveau de l'abeille, et avons pu enregistrer des

signaux calciques de haute qualité au sein d'une classe d'interneurons visuels qui n'avaient jamais été étudiés auparavant, les neurones du tractus reliant la *lobula* au tubercule optique antérieur. Ces neurones montrent 1) des cartes d'activation distinctes à la présentation de rectangles blancs sur différentes régions de l'œil (**Fig. 4**), avec des différences plus marquées entre l'œil dorsal et l'œil ventral (**Fig. 5**); 2) une sommation non-linéaire de l'activation par le mélange de lumière bleue et verte, en accord avec un mécanisme d'opposition spectrale (**Fig. 6**). Nos résultats montrent donc que les neurones du tractus *lobula-TOA* participent au traitement de la localisation spatiale des objets et de leur couleur.

Une contribution majeure de ce travail est l'établissement d'une nouvelle méthode d'enregistrements optophysiques, permettant de mesurer l'activité de populations de neurones dans le système visuel de l'abeille vigile, alors qu'elle perçoit des images présentées sur un écran. Jusqu'à présent, il n'y avait eu aucune méthode permettant de mesurer l'activité de populations entières dans le système visuel, du fait des importants artefacts induits par la lumière utilisée pour stimuler l'œil. Ainsi, chez l'insecte, il n'existait aucune alternative correspondant à l'imagerie fonctionnelle par Résonance Magnétique (IRMf). Par le passé, l'étude de la vision des insectes se limitait à des enregistrements électrophysiologiques suivis de marquages intracellulaires. Cette approche a permis une caractérisation de la sensibilité spectrale, du champ récepteur et de la sensibilité au mouvement de neurones individuels (Menzel and Backhaus, 1991). Mais du fait des limitations techniques de l'électrophysiologie intracellulaire, le rôle fonctionnel de chaque type cellulaire au sein du réseau complet n'a pu être abordé. Dans notre étude, nous avons exploité l'avantage des mesures populationnelles par imagerie calcique et avons pu montrer que des cellules différentes semblent coder des informations visuelles différentes, comme l'information géométrique (**Fig. 4, 5**), chromatique (**Fig. 6**), mais aussi de mouvement (données non montrées ici), ce qui est totalement nouveau. Ces résultats montrent bien le potentiel particulièrement intéressant de cette méthode d'enregistrement au niveau de l'œil de l'insecte.

Une autre contribution importante de ce travail correspond à la caractérisation fonctionnelle de neurones de la voie ventrale correspondant à un des flux les plus importants d'information visuelle dans le cerveau de l'abeille. Le tubercule optique en particulier est un des centres les plus proéminents de la voie ventrale (Homborg et al., 2003; Paulk et al., 2009). Pourtant, jusqu'à présent on n'avait que très peu de données fonctionnelles de qualité sur ces neurones chez l'abeille. On ne disposait ainsi que de quelques enregistrements intracellulaires qui suggéraient un possible traitement de l'information de couleur chez les criquets (Kinoshita et al., 2007) et de la couleur et du mouvement chez les bourdons (Paulk et al., 2009). Les résultats de notre étude ont confirmé et renforcé ces conclusions, en obtenant tous ces résultats non pas sur quelques neurones individuels mais sur des populations entières de neurones, et de plus chez la même espèce animale.

Nous avons observé une très forte baisse de la réponse à la couleur cyan (bleu + vert) par rapport à la réponse au vert chez tous les animaux que nous avons examinés (**Fig. 6**). Ceci nous indique qu'une part importante des neurones du tractus *lobula-TOA* possède une opposition spectrale entre le vert et le bleu. Chez l'abeille cette opposition bleu-vert correspond à un des types d'opposition les plus communément observés chez des neurones individuels de la *medulla* et de la *lobula* (Menzel et Backhaus, 1991; Yang et al., 2004). Nous avons aussi trouvé dans ces neurones le potentiel de différencier l'entrée sensorielle provenant de différentes régions de la rétine (**Fig. 4**). Ces deux observations indiquent que les neurones du tractus *lobula-TOA* participent au traitement de la localisation et de la couleur des objets visuels. Il n'est cependant pas encore clair si, comme le proposaient Strausfeld et Lee (1991), le rôle fondamental de la voie ventrale et des neurones *lobula-TOA* serait d'assurer la perception de forme. Il y a en effet un autre tractus majeur appartenant à la voie ventrale, et qui relie la *medulla* et la *lobula* aux corps pédonculés (Ehmer et Gronenberg, 2002), structure connue pour être impliquée dans les phénomènes d'apprentissage et de mémoire, ainsi que dans l'intégration de l'information provenant de différentes modalités sensorielles (Heisenberg, 2003). Il est possible que les corps pédonculés jouent aussi un rôle important dans la perception de forme. Il sera

donc important d'examiner les capacités de codage d'orientation et de fréquence spatiale des neurones du tractus *lobula-TOA*, et de les comparer à ceux allant vers les corps pédonculés. On sait qu'il existe des neurones sensibles à l'orientation dans le cerveau de l'abeille, mais leur appartenance à tel ou tel tractus est encore inconnue (Yang and Maddess, 1997).

Nous avons trouvé des preuves d'une rétino-topie plus marquée dans l'axe dorso-ventral de l'animal (axe long de l'œil, **Fig. 5**). Ceci pourrait impliquer que l'information provenant des parties dorsale et ventrale de l'œil soit ségréguée dans cette partie du système visuel. Il faut néanmoins remarquer que la distance moyenne entre stimuli sur l'écran était plus importante dans l'axe dorso-ventral que dans l'axe antéro-postérieur. Quoi qu'il en soit, notre résultat suggère tout de même une corrélation entre la distance spatiale entre les objets vus par l'œil et la distance entre représentations neuronales au niveau du tractus étudié. Ceci est en accord avec l'idée d'une représentation topographique des éléments dans le système nerveux visuel de l'abeille (Wehner 1971). Cette ségrégation dorso-ventrale a de plus une signification fonctionnelle, car les abeilles présentent une réelle asymétrie des champs visuels selon cet axe, comme cela a pu être mis en évidence sur un plan comportemental. Ainsi, la partie ventrale du champ visuel frontal est la plus importante pour la reconnaissance de motifs (Wehner 1971), et la discrimination des couleurs est meilleure au niveau de l'œil ventral par rapport à l'œil dorsal (Lehrer 1999b). Pour progresser dans notre compréhension de la vision d'objet chez l'insecte, il sera particulièrement intéressant dans le futur d'examiner comment l'information visuelle de la partie ventrale de l'œil est représentée dans le cerveau de l'abeille. Une étude systématique incluant une recherche des champs récepteurs de neurones individuels du tractus *lobula-TOA* sur la rétine sera nécessaire.

## Bibliographie

- Borst A., Haag J., Reiff D. F. (2010) Fly motion vision. *Annu. Rev. Neurosci.* 33 :49-70.
- Cavanagh P., Hénaff M. A., Michel F., Landis T., Troscianko T., Intriligator J. (1998) Complete sparing of high-contrast color input to motion perception in cortical color blindness. *Nat. Neurosci.* 1 :242-247.
- Daumer K. (1956) Reizmetrische Untersuchungen des Farbsehens der Bienen. *Z. vergl. Physiol.* 38 :413-478.
- Doi E., Inui T., Lee T. W., Wachtler T., Sejnowski T. J. (2003) Spatiochromatic receptive field properties derived from information-theoretic analyses of cone mosaic responses to natural scenes. *Neural Comput.* 2 :397-417.
- Ehmer B., Gronenberg W. (2002) Segregation of visual input to the mushroom bodies in the honeybee (*Apis mellifera*). *J. Comp. Neurol.* 451 :362-373.
- Ettliger G. (1990) "Object vision" and "spatial vision": the neuropsychological evidence for the distinction. *Cortex* 26 :319-341.
- Gegenfurtner K. R., Hawken M. J. (1996) Interaction of motion and color in the visual pathways. *Trends Neurosci.* 19 :394-401.
- Heisenberg M. (2003) Mushroom body memoir: from maps to models. *Nat. Rev. Neurosci.* 4 :266-275.
- Homberg U., Hofer S., Pfeiffer K., Gebhardt S. (2003) Organization and neural connections of the anterior optic tubercle in the brain of the locust, *Schistocerca gregaria*. *J. Comp. Neurol.* 462 :415-430.
- Kaiser W., Liske E. (1974) Die optomotorischen Reaktionen von fixiert fliegenden Bienen bei Reizung mit Spektrallichtern *J. Comp. Physiol. A* 89 :391-408.
- Kinoshita M., Pfeiffer K., Homberg U. (2007) Spectral properties of identified polarized-light sensitive interneurons in the brain of the desert locust *Schistocerca gregaria*. *J. Exp. Biol.* 210 :1350-1361.
- Lehrer M. (1999a) Shape perception in the honey bee: Symmetry as a global parameter. *Int. J. Plant Sci.* 160 :851-865.
- Lehrer M. (1999b) Dorsoventral asymmetry of colour discrimination in bees. *J. Comp. Physiol. A* 184 :195-206.
- Livingstone M., Hubel D. (1988) Segregation of form, color, movement, and depth: anatomy, physiology, and perception. *Science* 240 :740-749.
- Menzel R., Backhaus W. (1991) Colour Vision in Insects. In P. Gouras (ed) : Vision and Visual Dysfunction. The Perception of Colour. London : MacMillan Press, 262-288.



- Mishkin M., Ungerleider L. G. (1982) Contribution of striate inputs to the visuospatial functions of parieto-occipital cortex in monkeys. *Behav. Brain Res.* 6 :57-77.

- Paulk A. C., Dacks A. M., Phillips-Portillo J., Fellous J. M., Gronenberg W. (2009) Visual processing in the central bee brain. *J Neurosci.* 29 :9987-9999.

- Ribi W. A., Scheel M. (1981) The second and third optic ganglia of the worker bee. *Cell Tiss. Res.* 221 :17-43.

- Schiller P. H., Logothetis N. K. (1990) The color-opponent and broad-band channels of the primate visual system. *Trends Neurosci.* 13 :392-398.

- Srinivasan M. V., Poteser M., Kral K. (1999) Motion detection in insect orientation and navigation. *Vision Res.* 39 :2749-2766.

- Strausfeld N. J., Lee J. K. (1991) Neuronal basis for parallel visual processing in the fly. *Vis Neurosci.* 7(1-2) :13-33.

- Wehner R. (1971) Dorsoventral asymmetry in the visual field of the bee, *Apis mellifica*. *J. Comp. Physiol. A* 77 :256-277.

- Yang E. C., Maddess T. (1997) Orientation-sensitive Neurons in the Brain of the Honey Bee (*Apis mellifera*) *J Insect Physiol.* 43 :329-336

- Yang E. C., Lin H. C., Hung Y. S. (2004) Patterns of chromatic information processing in the lobula of the honeybee, *Apis mellifera* L. *J Insect Physiol.* 50 :913-925.

- Zhang S. W., Srinivasan M., Collett T. (1995) Convergent processing in honeybee vision: multiple channels for the recognition of shape. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 92 :3029-3031.

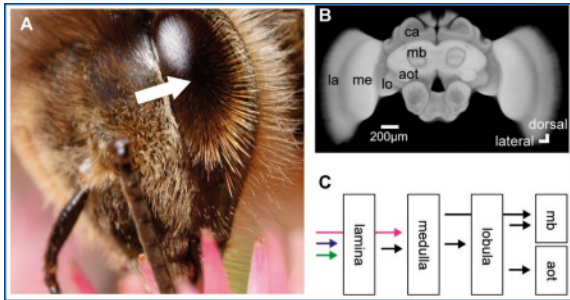
- Zihl J., Von Cramon D., Mai N. (1983) Selective disturbance of movement vision after bilateral brain damage. *Brain* 106 :313-340.

## Introduction

The visible world consists of abundance of information that can be broken down into features, such as color, motion, shape, depth and texture, all of which facilitates visual perception and ameliorates our understanding of the world (Livingstone and Hubel, 1988). As clinic pathological insights into brain diseases have been suggested, brains are thought to deal information of visual sub-modalities separately, such that a patient with strokes lost motion perception

without loss of color or shape perception (Zihl et al., 1983). Brain researches in past decades, especially in primates, revealed functionally parallel pathways for motion (dorsal stream) and color and shape detection (ventral stream) in the brain (Mishkin and Ungerleider, 1982; Ettlenger, 1990), though later it became evident that the separation is not perfect (Gegenfurtner and Hawken, 1996; Cavanagh et al., 1998). In understanding visual system, it is intriguing and essential to investigate where and at what extent the information is separated in the brain, and how those separated informations are re-integrated towards visual perception. Unfortunately, such attempts must be challenging in vertebrates due to the complexity of their cortical circuits.

The honeybee, which possesses trichromatic color vision (Daumer, 1956) that follows similar functional and architectural principles compared to humans, is a valuable animal model to study parallel visual processing in the brain since they can perceive and distinguish fundamental visual sub-modalities that are identical to ours (color: Menzel and Backhaus, 1991; motion: Srinivasan et al., 1999; shape, Lehrer, 1999a; depth: Lehrer et al., 1988; texture, Zhang et al., 1995). They also use achromatic motion cue in their turning optomotor response (Kaiser and Liske, 1974), which serves for course stabilization during free locomotion or flight through an involuntary displacement from a straight course, suggestive of a separation of processing for ego-motion and color detection. Such a separation is in agreement with other insect species, in which the “ventral stream” in the protocerebrum processes color (Paulk et al., 2009) and shape (Strausfeld and Lee, 1991), thus it is called as “object vision”, while the “dorsal stream” is devoted for processing of optic flow cues over large visual fields and contributing to the control of flight posture and probably to distance estimation (Borst et al., 2010), though the functional evidence for the former pathway is scarce. It seems that insects share certain commonality with our visual system as to parallel processing strategy, and possibly the way they separate and re-integrate information processed in parallel. The advantage of using honeybees as a model relates to their remarkable small brain size (approx. 1-mm<sup>3</sup> volume) containing only ~10<sup>6</sup> neurons (with respect to ~10<sup>11</sup> in the human brain),



**Figure 1.** The compound eye of the bee (A, arrow), the brain with major visual regions (B) and a schematic diagram of visual information flow in the bee brain (C). Some regions are not written for clarity. la: lamina, me: medulla, lo: lobula, aot: anterior optic tubercle, ca: calyces, mb: mushroom body.

which makes it relatively easier to investigate neural architecture underlying visual system.

The compound eyes of honeybees consist of ~5 400 functional units, the ommatidia, which are socket-like structures that equip independent optical system and are located on a convex surface, thus pointing in slightly different directions (Fig. 1A). Each ommatidium houses photoreceptor cells which endow bees with trichromatic color vision based on the existence of receptors maximally sensitive to UV (S type), blue (M type) and green (L type) (Menzel and Backhaus, 1991). Each of the L and M receptors projects to the primary visual center in the brain, the lamina, and then to the secondary center, the medulla, by visual interneurons (Fig. 1B, C). On the other hand, the fibers of S receptors travel through the lamina down to the medulla. Thus, chromatic information from all 3 types meet, for the first time, in the medulla, where color sensation is thought to arise. From the medulla, second order visual interneurons innervate the tertiary visual processing center, the lobula. Since columnar structure remains from the periphery until the level of the distal lobula, the retinotopic organization is thought to be retained in these distal stages (Ribi and Scheel 1981). The central projections from the medulla and the lobula can be divided into the “ventral stream” and “dorsal stream” (see above).

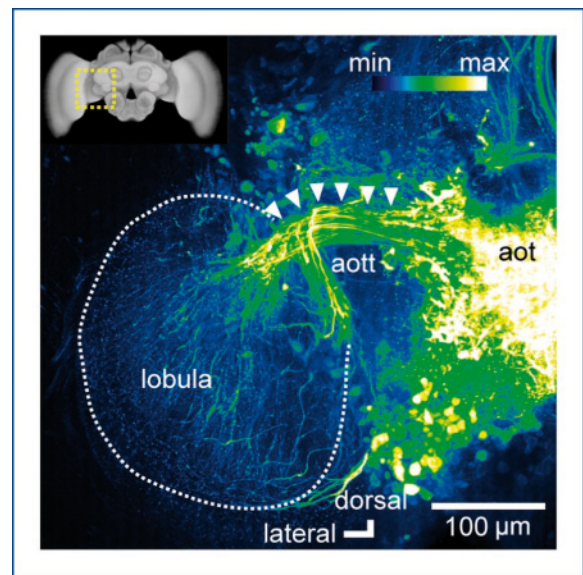
The anterior optic tubercle is one of the most prominent structures, as well as the mushroom body, amongst visual ventral foci in the insect brain, which is interconnected with the lobula by a thick tract of “lobula-anterior optic tubercle”

(lobula-aot) neurons (Fig. 2). However, functions of both the anterior optic tubercle and the mushroom body in vision are largely unknown. In order to investigate functional significance of insect’s “ventral stream”, we focused on these lobula-aot neurons and checked their physiological characteristics by achromatic/chromatic stationary and motion stimuli.

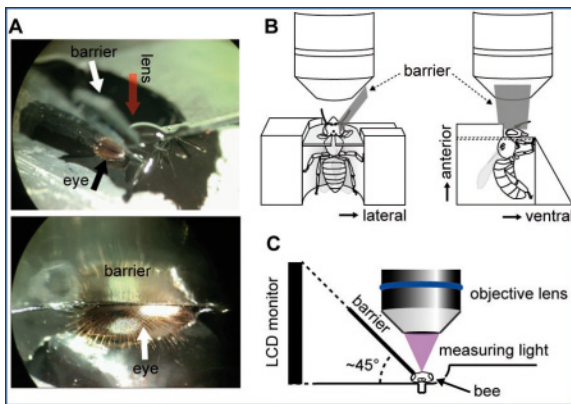
## Methods

In order to realize physiological measurements from the lobula-aot neuron that has a very thin axon, we have established an optophysiological calcium imaging method in the bee’s visual system, which enables us to record activities of large population of neural units.

Bees were fixed in recording chambers with low temperature melting wax, such that the longitudinal axis of their compound eye was fixed horizontally (Fig. 3). The head capsule between the compound eyes was opened, the brain was exposed, and then calcium indicator was filled into the lobula-aot neurons by a small glass capillary. To avoid unwanted cross-talk between measuring light for calcium imaging and stimulus light presented to the eye, a black plastic barrier was placed in between. The barrier and all



**Figure 2.** A confocal image of the lobula-anterior optic tubercle neurons. Isomorphic parallel columnar innervations in the lobula form a thick bundle (aott, arrows) and project to the anterior optic tubercle (aot). An inset indicates location of the brain.



**Figure 3.** Animal preparation of calcium imaging applied for vision. Images of head part of the preparation (A), schematic drawings of the whole preparation (B) and head part (C).

gaps surrounding the compound eye were glued carefully with blackened epoxy resin, which significantly reduced the flux of stimulus light coming into the measuring light path.

Achromatic/chromatic stationary and motion stimuli were presented to the right eye of the bee, ipsilateral to the side of the recording by a liquid crystal display computer screen. The monitor was placed lateral to the bee and centered to the eye with a distance of ca. 25 cm, which spans ca. 75° in the long axis (ventro-dorsal body axis) and

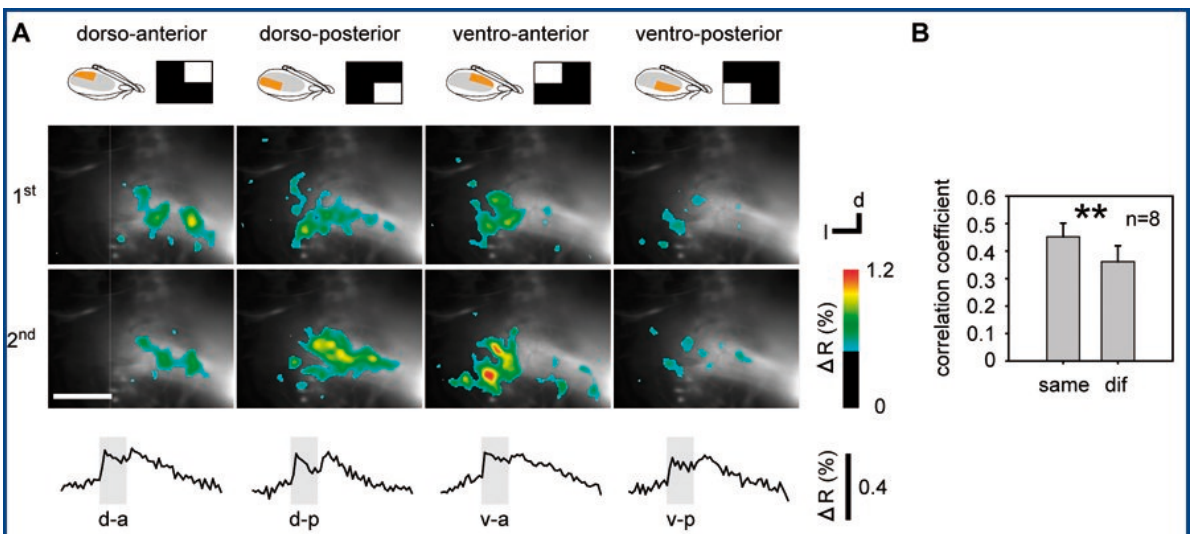
ca. 45° in the minor axis (antero-posterior body axis) of visual field of the eye (Fig. 3C). The stimuli were created on Powerpoint (Microsoft).

## Results

Our newly established *in-vivo* calcium imaging method in visual system allowed us to record reliable calcium signal from the lobula-aot neurons in response to visual stimuli. By means of this technique, we have investigated about 1) *retinotopy* and 2) *color-opponency* in this neural class, in accordance with studies by Strausfeld and Lee (1991) and Paulk et al. (2009), implying shape and color processing in the ventral stream.

### Distinct activations by stimulations of different eye regions

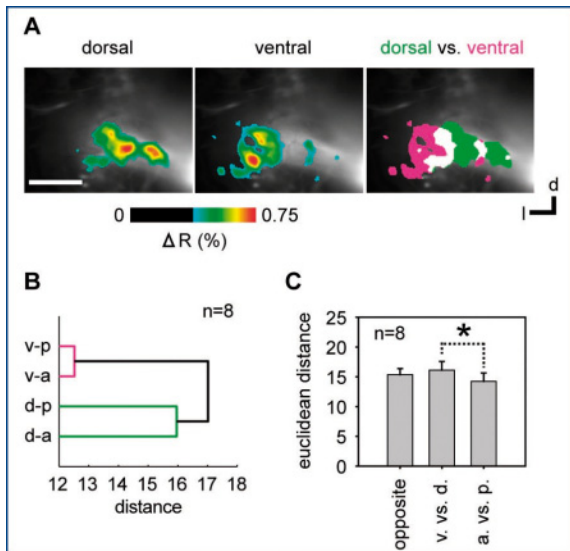
Remaining columnar structure at the level of the distal lobula (Ribi and Scheel 1981) and isomorphic columnar structure of the lobula-aot neurons (Fig. 2) strongly imply the retinotopic organization, distinct ommatidial channel inputs from distinct regions of the eye to different neural units. To examine such a possibility, we presented four non-overlapping white rectangles that quadrisect the monitor to the bee. Neurons reliably responded to each of stimuli with similar response time course (Fig. 4A) and intensity (data not shown). Correlation coefficient, a similarity measure of responses, across different



**Figure 4.** A: Distinct activations and response time courses by four white rectangles that quadrisect the monitor. B: Correlation coefficient for repetition of the same stimulus was higher than those between presentations of different stimuli, indicative of reliable neural responses.

trials of identical stimuli exhibited statistically greater value than that between any of two different stimuli (\*\*  $p < 0.01$ , WCX-test, **Fig. 4B**), indicating reliable information coding. Such a coding capability relates to differential receptive fields by different units, a neural architecture underlying retinotopy.

Now, a question arises: how the retinotopic organization is arranged in this neural class? As exemplified in figure 5A, we found a distinction in responses between stimuli presented for dorsal and ventral part of the eye (**Fig. 5B**). The distinction was significantly greater than that between anterior and posterior stimuli (\*  $p < 0.0167$ , WCX-test, **Fig. 5C**). Therefore, it is thought that retinal spatial information in dorso-ventral eye axis is retained as a coding distance within this neural class.

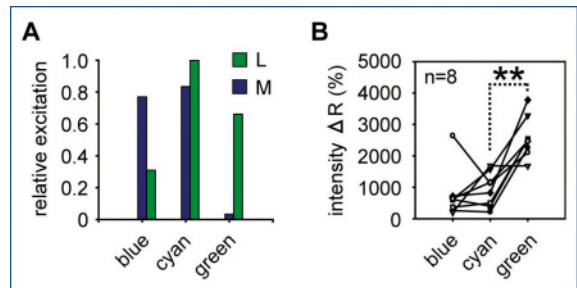


**Figure 5. A:** Distinct responses between dorsal and ventral stimulation. **B, C:** Response distinction between dorsal and ventral stimulation was greater than that between anterior and posterior stimulation.

### Color-opponency

Color-opponency, an antagonistic way of signal transmission from different photoreceptor types, is thought to reduce redundant information by decorrelating the photoreceptor signals, thus realizing more effective way of information transfer, and lie as a neural substrate of hue-contrast processing (Doi et al., 2003). As a

neural correlate, color-opponent neurons are known in the primate brain (Schiller and Logothetis, 1990). In honeybees, it is also proposed that experimentally obtained perceptual color space can be explained by receptor inputs in an opponent fashion, and indeed, the existence of color-opponent neurons in the brain supports that idea (Menzel and Backhaus, 1991). Thus, common architectures exist in insect and primates for the neural processing of hue-contrast of colors.



**Figure 6. A:** Relative excitation of 2 photoreceptor types (M and L type) by cyan and green. **B:** Cyan, which receives more light than green, exhibited significantly reduced response intensity compared to green.

In this study, we were prompted by this principle and tried to find color-opponency. An opponent interaction, i.e. an impact of inhibitory effect, is often hidden and invisible factor that appears only on the background of excitation. Thus, we have tried to excite two different receptor types (M and L types) together by using a color mixture. On our LCD monitor, green light presumably excited only L type receptors while cyan light, as a linear sum of green and blue lights, excited both L and M type receptors, thus providing less color-contrast with more luminance to the bees (**Fig. 6A**). We have observed specific and distinct activations for blue, green and cyan lights (data not shown). Interestingly, we have observed strong reduction of response intensity to cyan compared to green light (\*\*  $p < 0.01$ , WCX-test, **Fig. 6B**), which cannot be explained by a luminance effect. Such a non-linear response is in agreement with color-opponency phenomena.

### Discussion

We succeeded to establish *in-vivo* optophysiological calcium imaging method applied for visual

system of the bee and record reliable calcium signal from a class of visual interneurons in the bee brain, the lobula-aot neurons. By using this technique, we have shown 1) distinct activations to the presentation of a white rectangle on different eye regions (**Fig. 4**); the difference in response patterns was larger between dorsal and ventral eye regions than between anterior and posterior eye regions (**Fig. 5**); 2) a reduction in activation upon stimulation with a mixture of blue and green; such a non-linear response is in agreement with color-opponency phenomena (**Fig. 6**). Our results show that lobula-aot neurons participate in the processing of object spatial location and color.

One of the major contributions of the present work would be an establishment of a method for optophysiological measurements, which enables simultaneous measurements of neural activity at a population level, in insect's visual system. Virtually, there had been none of a convenient optophysiological method for populatory activity measurements in insect's visual system due to an invasive cross-talk artifact between measuring lights and stimulus lights. Likewise, there exists none of alternative functional neuroimaging method such as fMRI. Thus, in the past, conventional intracellular single cell recording and marking were used for physiological explorations of insect's vision. These approaches yielded successful characterizations of spectral tuning, receptive field, and motion sensitivity, of individual receptor neurons and visual interneurons (Menzel and Backhaus, 1991). However, due to the technical limitations of single-cell recordings, the functional significance of each-cell's properties in the vision network could not be clearly understood. In this study, we took an advantage of populatory measurements by calcium imaging and found that populatory neural activities have potentials to encode varied visual information, such as geometrical information on the retina (**Fig. 4, 5**), chromatic (**Fig. 6**) and motion information (data not shown), which had never been shown. These findings approve the power and further potencies of this method in insect's visual system.

Another contribution relates to functional characterizations of the lobula-aot neurons, which assumes major information flow from the lobula to the anterior optic tubercle. In insect brain, the

anterior optic tubercle can be classed as one of the most prominent foci which locate ventral part of the protocerebrum (Homberg et al., 2003; Paulk et al., 2009). Thus, function of the lobula-aot neurons in visual processing is particularly of interest to the schema of visual "ventral stream", whose function is largely unknown due to the lack of physiological evidences. So far, there are a few functional suggestions for the lobula-aot neurons based on single cell recordings, in which Kinoshita et al. (2007) suggested color processing in locusts, and Paulk et al. (2009) suggested color and motion processing in bumble bees. Results of the present study confirmed and strengthened these suggestions. Since we observed declined response to cyan compared to green in all of the animals examined (**Fig. 6**), we assume substantial amount of lobula-aot neurons exhibit green-blue color-opponency. Indeed, in honeybees, such blue-green opponency is known as one of the most common types in color opponent neurons in the medulla and the lobula (Menzel and Backhaus, 1991; Yang et al., 2004). Moreover, we found a potential to differentiate ommatidial inputs from different regions of the retina (**Fig. 4**). These findings indicate that lobula-aot neurons participate in the processing of object spatial location and color. It is not clear whether a suggestion by Strausfeld and Lee (1991), in which they proposed shape perception as one of the functions of insect's ventral stream, applies to the lobula-aot neurons. There exists another major pathway in the ventral stream of honeybees, which is projections from the optic lobes to the mushroom body (Ehmer and Gronenberg, 2002), known as a center for learning and memory as well as multimodal integration (Heisenberg, 2003), and they are one of candidates for shape analyses as well. Thus, it is intriguing to examine coding capabilities of the lobula-aot neurons for pattern orientation and spatial frequency, and compare with mushroom body projections. At least, orientation-sensitive neurons are known to exist in the protocerebrum of honeybees, though the classes of the neurons are unknown (Yang and Maddess, 1997).

We have also found an evidence for dorsoventral retinotopy (**Fig. 5**), which implies more distinction for information between these retinal regions. We could relate a larger distinction between dorsal and ventral stimuli compared to

anterior and posterior with spatial distance of stimuli on the landscape monitor. Such an observation implies a correlation with neural coding distances and distance in spatial location of objects, which is in agreement with a prediction that the different positions of the visual field are topographically represented in the central nervous system of the bee (Wehner 1971). Furthermore, dorso-ventral distinction may have a functional significance as well, because bees have dorso-ventral asymmetry in the visual field, such

that middle ventral part of the frontal visual field is most decisive for pattern recognition (Wehner 1971), and color discrimination in the ventral half of the frontal eye region is significantly better than the dorsal half (Lehrer 1999b). Thus, it is particularly of interest to insect's "object vision" to investigate how visual information from ventral half of the eye is represented in the brain of honeybees. A further systematic study, including receptive field of individual lobula-aot neuron, will be required.

# L'utilisation de la couleur dans les céramiques protohistoriques du Balochistan pakistanais et de Mundigak (Afghanistan). Identités culturelles et traditions techniques

Aurore DIDIER

## Résumé

Dès le Néolithique, la couleur occupe une place significative dans les sociétés du Balochistan pakistanais. L'utilisation de la peinture polychrome sur des supports variés constitue une tradition culturelle profondément enracinée dans la vie domestique, les mentalités et le savoir-faire de ses populations anciennes. Parmi les artisanats « colorés » les plus caractéristiques du Chalcolithique et de l'Âge du Bronze (IV<sup>e</sup>-III<sup>e</sup> millénaires av. J.-C.), la poterie polychrome n'en reste pas moins l'un des moins bien connus. Cet article vise à présenter les principaux résultats d'une étude portant sur une importante collection de céramiques issues de plusieurs grands sites archéologiques du Balochistan et du site de Mundigak au sud de l'Afghanistan. La question de la peinture polychrome y est envisagée selon plusieurs aspects : technique, stylistique, fonctionnel et idéologique. Il s'agit également de mieux comprendre les choix culturels des sociétés étudiées dans une période marquée par une évolution manifeste des mentalités et des contextes socio-économiques et par l'essor des échanges avec le Sud-Est iranien et l'Asie centrale méridionale.

## Mots-clefs

Archéologie, Balochistan, régions indo-iraniennes, Protohistoire, Céramique, poterie, Peinture polychrome

## The use of colour in the Protohistoric pottery from Pakistani Balochistan and from Mundigak (Afghanistan): Cultural Identities and Technical Traditions.

## Abstract

Since Neolithic, the colour plays a significant role in the societies of Pakistani Balochistan. The use of polychrome painting on various media constitutes a cultural tradition deeply rooted in the domestic life, the mentalities and the *savoir-faire* of the ancient people. Among the most characteristic “colored” artefacts produced during the 4<sup>th</sup> and the 3<sup>rd</sup> millennia BC (Middle-Late Chalcolithic-Bronze Age), the polychrome pottery is so far one of the less well-known. The paper aims to present the main results of a study carried out on a pottery collection from major archaeological sites in Balochistan and from the site of Mundigak in southern Afghanistan. The question of the polychrome painting is raised from technical, stylistical, functional or even ideological aspects. The matter is also to better understand the cultural choices of the studied societies in a period marked by obvious changes in socio-economic contexts and mentalities and by growing exchanges with south-eastern Iran and southern Central Asia.

## Keywords

Archaeology, Balochistan, Indo-Iranian Borderlands, Protohistory, Pottery, Polychrome painting

## Introduction

Dès le Néolithique, la couleur occupe une place significative dans les sociétés du Balochistan pakistanais. L'utilisation de la peinture polychrome sur des supports variés tant dans l'architecture, les pratiques funéraires que dans l'artisanat constitue une tradition culturelle profondément enracinée dans la vie domestique, les mentalités et le savoir-faire de ses populations anciennes. Elle représente également un marqueur-clé d'interactions et d'influences avec les cultures voisines du Sud-est iranien et de l'Asie centrale méridionale. Parmi les artisanats « colorés » les plus caractéristiques du Chalcolithique et de l'âge du Bronze, l'originalité et la variété des céramiques peintes contribuent à leur accorder un intérêt spécifique.



**Figure 1** : Carte générale des régions indo-iraniennes (Carte H. David. & A. Didier).

Distribuées du sud de l'Afghanistan à la côte pakistanaise et de la vallée de l'Indus au Sud-est iranien (Fig. 1), elles montrent une richesse stylistique importante et un degré de savoir-faire élevé. L'attention accordée aux vases polychromes dans les régions indo-iraniennes est toutefois relativement récente (Mugavero & Vidale 2003, Mugavero 2009), encore plus lorsqu'il s'agit de la région du Balochistan. La fragilité des pigments et leur mauvaise conservation<sup>1</sup> expliquent en partie cette situation. La quantité et la qualité des vestiges mis au jour par les missions

<sup>1</sup> L'épaisseur des couches de peinture conservées sur les poteries polychromes du Balochistan est bien souvent inférieure à 20 microns.

archéologiques françaises sur les sites de Mundi-gak (Afghanistan) (Casal 1961), de Mehrgarh et de Nausharo (Pakistan) (C. Jarrige & al. 1995 ; Jarrige 1996) et dans la région du Makran pakistanais (Besenval 1997, Didier 2007) permettent cependant d'envisager une étude approfondie de ces productions selon tous leurs aspects : morpho-fonctionnel, stylistique, technique et idéologique, et ce, afin de répondre à des questions essentielles pour la compréhension des identités culturelles et des traditions artisanales dans l'un des secteurs les plus dynamiques de l'Asie moyenne. Peut-on évaluer le degré d'innovation, d'élaboration et de complexité de ces productions ? Peut-on établir une relation entre les formes des vases, les motifs décoratifs et les remplissages utilisés ? Comment expliquer le choix des couleurs, celui des matériaux et le symbolisme de certains décors ? Quel est le rôle de ces productions ? À plus large échelle, il s'agit aussi de mettre en lumière l'extraordinaire dynamisme des interactions culturelles et matérielles dans l'ensemble des confins indo-iraniens (Pakistan, sud-est iranien, nord-ouest de l'Inde, Afghanistan) et en Asie centrale méridionale aux IV<sup>e</sup> et III<sup>e</sup> millénaires avant notre ère.

## La polychromie : Une tradition artisanale héritée du Néolithique

Actuellement partagée entre l'Iran, l'Afghanistan et le Pakistan, le Balochistan occupe un vaste territoire semi-désertique localisé aux confins du sous-continent indien et de l'Asie moyenne (Fig. 1). Paysage culturel complexe (Franke-Vogt 2008 : 651), la région est marquée depuis le Néolithique par un « processus cumulatif d'innovations techniques et de remarquable savoir-faire », à l'origine de nombreux courants d'influence (Jarrige 2008 : 11). À ce titre, elle se distingue très vite des autres territoires des confins indo-iraniens par la qualité et la variété de ses productions artisanales, en particulier dans le domaine des artisanats « pyrotechnologiques ». Le développement de ces artisanats du feu repose sur une connaissance très avancée des processus de cuisson permettant de transformer des matériaux bruts, sélectionnés avec soin, en produits finis.

La tradition de la peinture polychrome, dont on peut suivre l'évolution depuis le VIII<sup>e</sup> millénaire au Balochistan pakistanais, constitue sans nul doute un autre marqueur important des profondes mutations socio-économiques et culturel-



les engendrées durant la période Néolithique. Comme pour l'artisanat des perles<sup>2</sup> (Barthélémy de Saizieu 2003), elle témoigne d'une habileté particulière des artisans de la région à se procurer des matériaux de bonne qualité, souvent accessibles dans leur environnement immédiat, et à les transformer, par le feu ou non, en procédés décoratifs.

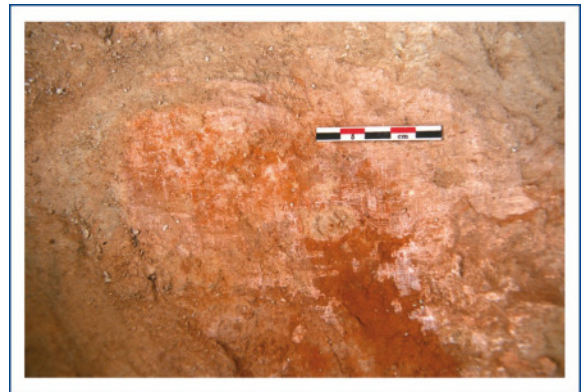
Les plus anciennes traces d'utilisation de pigments polychromes d'origine naturelle sont ainsi attestées sur le site de Mehrgarh, dans la plaine de Kachi (Balochistan oriental). Des vestiges d'enduits muraux réalisés à partir d'ocre rouge ont en effet été identifiés dans l'occupation néolithique la plus ancienne du site vers 7500-7000 avant notre ère (Période I) (C. Jarrige, Jarrige & Quivron 2005 : 135). Dans les niveaux les plus récents de la période I (7000-6000 av. J.-C.), certains murs présentent un véritable « décor » peint en rouge, noir et blanc (*Ibid* ; Jarrige 2004 : 40) (Fig. 2) tandis que les sols des habitations sont recouverts d'ocre rouge et d'enduit blanc. La découverte de plusieurs traces d'enduit bleu coloré au lapis-lazuli sur des mottes de terre associées à l'architecture en briques crues laisse supposer, pour J.-F. Jarrige, « l'existence d'une vaste gamme de couleurs » utilisée sur le site (Jarrige 2004 : 40).

À la même époque, les défunts, inhumés dans de petites chambres construites en briques crues, sont bien souvent couverts d'ocre rouge ou installés sur des sols enduits (Jarrige 2004 : 51). Cette coutume héritée du Néolithique prédomine également au sein de contextes funéraires plus tardifs du IV<sup>e</sup> millénaire dans la région du Makran, au sud-ouest du Balochistan pakistanais (sites de Shahi-Tump et de Miri Qalat). L'ocre rouge y est appliqué sur des nattes recouvrant les défunts (Fig. 3) ou contenu dans des coquillages déposés dans les tombes (Besenval 2000 : 167, 170). Toujours à la même période, l'usage de la peinture murale tant dans l'architecture que dans les pratiques funéraires fait son apparition dans les régions voisines du Fars iranien (site de



**Figure 2** : Fragments de peintures murales néolithiques du site de Mehrgarh (d'après Jarrige 2004 : Fig. 9).

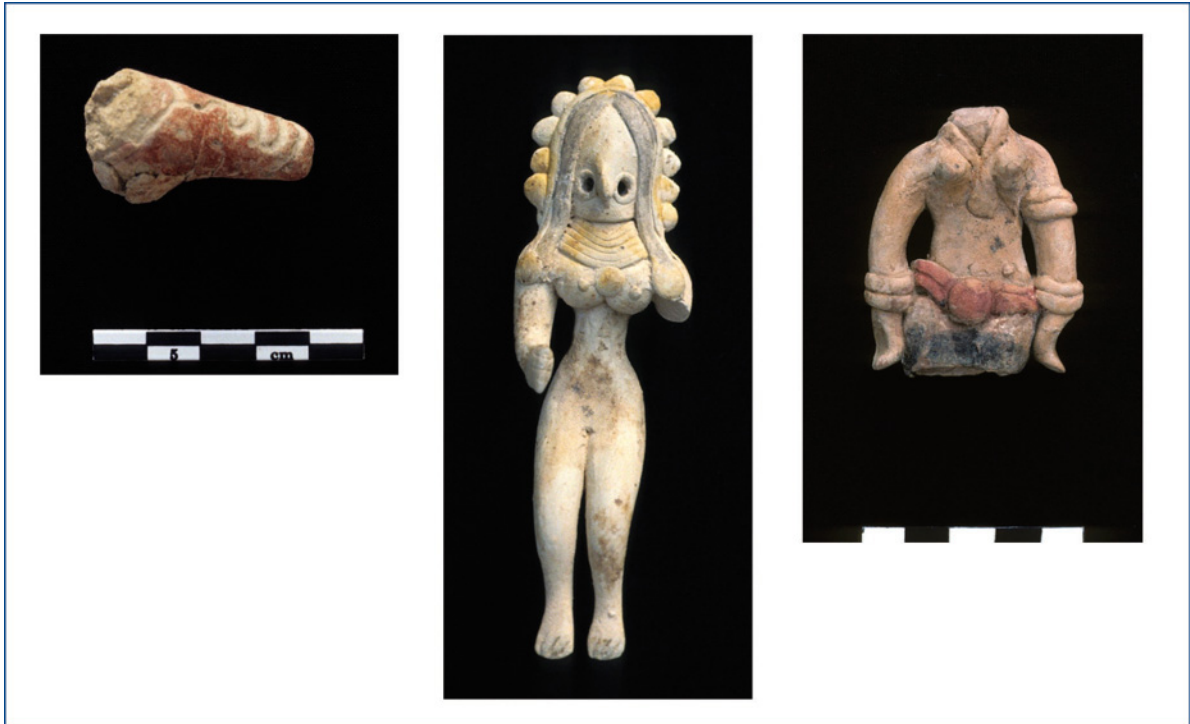
Tall-e Malyan ; Sumner 2003 : Fig. 15-19) et en Asie centrale méridionale (site d'Ilgynly Depe, au Turkménistan ; Solovyova 2000)<sup>3</sup>.



**Figure 3** : Fragment de natte enduite d'ocre rouge découvert dans le cimetière de Shahi-Tump (photo MAFM).

<sup>2</sup> En particulier celui des perles en stéatite cuite connu depuis le Néolithique sur le site de Mehrgarh (Période I). Les perles en stéatite glaçurée n'apparaissent qu'au V<sup>e</sup> millénaire, dans les niveaux de la période III.

<sup>3</sup> Des vestiges d'enduits muraux de couleur rouge et bleue ont également été identifiés dans l'architecture domestique du site de Sarazm, au Tadjikistan (Besenval & Isakov 1989 : 11).



**Figure 4 :** À gauche, figurine néolithique peinte en rouge du site de Mehrgarh (période I). Au centre et à droite, figurines polychromes du III<sup>e</sup> millénaire découvertes à Nausharo (d'après C. Jarrige 2008 : fig. 12, 17, 19).

Au Balochistan, le développement de la peinture polychrome connaît cependant un véritable essor au sein des artisanats en terre-cuite. Outre la poterie sur laquelle nous reviendrons dans quelques instants, des figurines humaines peintes ont été découvertes en nombre important dans les niveaux néolithiques (période I) et chalcolithiques (période VII) du site de Mehrgarh et à Nausharo, dans des contextes datés du III<sup>e</sup> millénaire (périodes I-III) (C. Jarrige 2005, 2008) (Fig. 4). Riche-ment ornées, ces figurines constituent, de loin, l'assemblage le plus ancien et l'un des plus significatifs du sous-continent indo-pakistanaï (Ibid : 28). Leur production perdurera dans la région jusqu'à la fin du III<sup>e</sup> millénaire av. J.-C., à l'époque du rayonnement de la civilisation de l'Indus.

D'autres types de supports « invisibles » comme le bois, les tissus ou les peaux, rarement conservés dans les contextes archéologiques de cette région, pourraient également avoir été recouverts de peinture polychrome, exprimant ainsi une association significative entre aspect matériel et fonction esthétique. Quoi qu'il en soit, l'essor de cette pratique artisanale dès la période néolithique indique une évolution majeure des

mentalités et des contextes socio-économiques dans la région du Balochistan. Outre un aspect esthétique indéniable, le choix de la couleur répond très certainement à la nécessité d'une codification visuelle distinctive, empreinte de symbolisme lorsqu'il s'agit des pratiques funéraires ou des figurines en terre-cuite.

### Les céramiques polychromes du Balochistan

#### Les premières productions (IV<sup>e</sup> millénaire av. J.-C.)

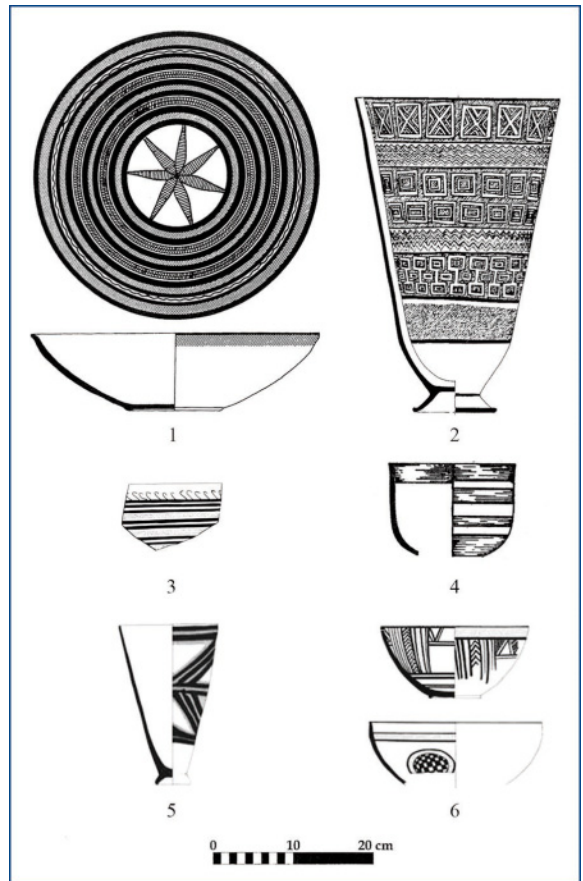
Foyer d'innovations majeures dans la métallurgie ou dans le travail des perles en stéatite cuite (Barthélémy de Saizieu 2003), c'est également dans l'artisanat céramique qu'est observée l'une des manifestations les plus évidentes du savoir-faire des sociétés du Balochistan. Les potiers de la région semblent en effet avoir atteint très tôt un niveau technique supérieur à celui de nombreuses populations d'Asie moyenne en matière de décoration peinte. Dès 5000 av. J.-C., des céramiques monochromes à pâte fine, se distinguant par de remarquables qualités plastiques, sont produites en quantités massives par les artisans du Balochistan central et oriental

(Jarrige 2008 : 19). Leur décoration originale peinte en noir ou en brun-rouge souligne une maîtrise avancée des techniques de fixation des pigments colorés impliquant des processus de cuisson particulièrement complexes<sup>4</sup> (Wright 1995 : 665-666).

C'est dans ce contexte que l'on voit apparaître très tôt, les premiers « essais » de polychromie sur le site de Mehrgarh. Plusieurs variantes « bichromes » (rouge et noir) de récipients en terre-cuite décorés dans un style bien connu de la région, le style de *Togau*, ont en effet été retrouvés dans une aire de potier datée du début du IV<sup>e</sup> millénaire (Jarrige 2008 : 19). L'usage de la polychromie ne se généralise pourtant réellement sur le site qu'à partir de 3600-3500 av. J.-C. associé à un style décoratif plus connu sous le nom de « *Kechi Beg Polychrome* » (Jarrige et al. 1995 : 28). Les poteries *Kechi Beg*, majoritairement de forme ouverte et carénée (bols, vases tronconiques, gobelets), présentent des pâtes très fines et sont décorées d'une grande variété de motifs géométriques peints en rouge/brun-rouge et noir sur fond beige ou beige-rose (Fig. 5, n° 1). Leur distribution s'étend sur un vaste territoire comprenant le sud de l'Afghanistan (site de Mundigak) (Casal 1961 : Fig. 50, 53, 56, 57), les régions de Quetta et de Zhob-Loralai (Fairservis 1956 : 257-259, 277-278, fig. 53, 61 ; 1959 : 369, 400-401, 418-420, fig. 67, 71), la plaine de Kachi au Balochistan oriental (C. Jarrige & al. 1995 : 28, fig. 2.11-2.13), ainsi qu'une partie du Balochistan pakistanais méridional (Franke-Vogt 2005 : Fig. 9). Si des liens avec la poterie polychrome de *Jemdet Nasr* produite en Mésopotamie à la période proto-élamite ont souvent été avancés, cette catégorie de vaisselle n'en est pas moins issue d'une longue tradition locale, probablement en interaction avec d'autres centres de production du Balochistan. Un autre élément significatif est l'association dans des contextes identiques de la poterie polychrome de style *Kechi Beg* avec d'autres catégories de céramiques variées (C. Jarrige & al. 1995 : 28). Parmi celles-ci, il faut souligner la production d'une remarquable poterie trichrome de style local attestée dans les niveaux archéologiques des périodes IV et V à Mehrgarh (3600-3100 av. J.-C.) (Fig. 5, n° 2). Peinte en noire et rouge, celle-ci témoigne de la

toute première utilisation de pigments blancs au sein de compositions décoratives très denses associant parfois motifs géométriques et naturalistes (bouquetins, figures humaines stylisées).

La diversification des céramiques polychromes se poursuit dans la seconde moitié du IV<sup>e</sup> millénaire et au tout début du III<sup>e</sup> millénaire puisque de nouvelles productions font leur apparition dans la région, au sein d'un vaste territoire s'étendant du Balochistan central à la côte pakistanaise (Fig. 5, n° 3-6). Il s'agit le plus souvent de variantes locales bichromes ou trichromes d'un style déjà connu de poterie peinte, comme par exemple les céramiques *Togau C-D* (Franke 2008 : Fig. 10 ; Mutin 2007 : Fig. II.231) (Fig. 5, n° 3) ou la *Zari ware* (De Cardi 1965 : Fig. 11) (Fig. 5, n° 4), adaptées aux goûts et aux besoins des habitants de ce secteur du Balochistan.



**Figure 5 :** Céramiques polychromes du IV<sup>e</sup> millénaire et du tout début du III<sup>e</sup> millénaire (1-2 : dessin MAI ; 3 : d'après De Cardi 1983 : fig. 11 ; 4 : d'après De Cardi 1965 : fig. 11 ; 5-6 : dessins MAFM).

<sup>4</sup> Notamment « un cycle d'oxydation, de réduction et de réoxydation » (Jarrige 2008 : 19).

Bien que s'inspirant de certains traits techniques et stylistiques du Balochistan oriental, certaines productions connaissent toutefois un développement endogène. C'est le cas d'une production locale de gobelets tronconiques bichromes attestée au Makran pakistanais sur les sites de Miri Qalat et de Shahi-Tump (Mutin 2007 : Fig. II.198) (Fig. 5, n° 5). Un élément commun aux céramiques du Makran, du Balochistan central et oriental, mais aussi aux productions contemporaines du sud-est iranien (région de Kerman), est l'usage généralisé de la peinture blanche qui semble faire son apparition de manière simultanée dans toutes ces régions. Au Makran, son utilisation est également attestée dans la décoration de bols à pâte très fine produits autour de 3000 av. J.-C. (Fig. 5, n° 6).

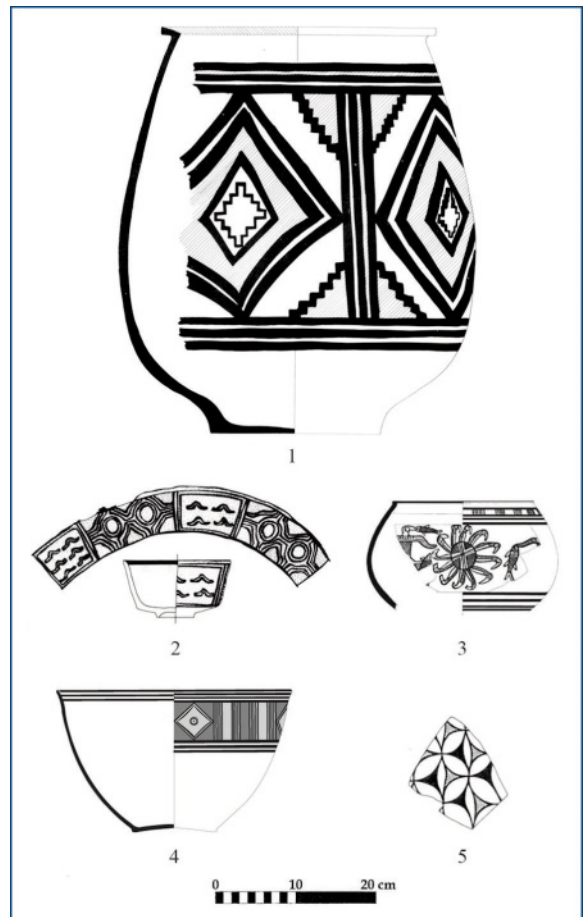
À la fin du IV<sup>e</sup> millénaire, des styles très individualisés de poterie se développent ainsi dans la région, mais ils se rattachent presque toujours à un fond commun tant sur le plan technique que sur le plan morpho-stylistique. Cette multiplicité de styles aboutit à la formation d'entités culturelles très marquées au sein desquelles émergent de nouveaux centres de production majeurs au début de l'âge du Bronze.

#### Les céramiques du Bronze ancien (Première moitié du III<sup>e</sup> millénaire av. J.-C.)

La transition entre le Chalcolithique et l'Âge du bronze ancien, au tout début du III<sup>e</sup> millénaire avant notre ère, est marquée par de profonds changements dans la vie quotidienne des communautés du Balochistan (grande densité d'occupation dans la région, introduction de nouvelles règles dans les modes de production et de distribution, complexité des artisanats). Dans le domaine de la céramique, ces changements incluent une spécialisation de plus en plus poussée, la création de nouvelles technologies en matière de façonnage<sup>5</sup> et de décoration des vases, le développement de méthodes de productions innovantes (avec la généralisation d'ateliers spécialisés installés à l'extérieur des zones d'habitat) et l'intensification des échanges à longue distance favorisant l'accès à des matériaux et des idées provenant de régions de plus en plus éloignées. Bien que s'inscrivant dans une certaine continuité, l'usage de la polychromie sur réci-

pients en terre-cuite connaît alors plusieurs évolutions majeures qui s'expriment tant sur le plan morpho-stylistique que dans le domaine plus abstrait de l'idéologie ou du symbolisme.

De nouvelles productions interagissant comme de véritables marqueurs identitaires culturels font leur apparition dans la région du Balochistan. C'est le cas de la céramique polychrome de style *Hilmand* qui traduit sans nul doute l'existence de courants d'échanges culturels et matériels importants entre le Balochistan pakistanais, le sud de l'Afghanistan et la région du Séistan iranien au III<sup>e</sup> millénaire (Fig. 6, n° 1). Attestée principalement sur le site de Shahr-i Sokhta (Iran) (Mugavero & Vidale 2003, 2006 ; Mugavero 2009) entre 2900 et 2600 av. J.-C.,



**Figure 6** : Céramiques polychromes du III<sup>e</sup> millénaire (1 : d'après Casal 1961 : fig. 91 ; 2 : d'après Franke 2005c : fig. 60 ; 3-4 : dessins MAFM ; 4 : dessin MAI).

<sup>5</sup> Notamment un usage plus intensif de la rotation.

cette production originale décorée de motifs géométriques peints en noir, rouge, jaune et blanc, se retrouve sur le site de Mundigak (Casal 1961 : Fig. 56, n° 86-87 et Fig. 91, n° 392) (Fig. 6, n° 1) mais aussi à Mehrgarh et à Nausharo dans des contextes datés entre 3100 et 2600 av. J.-C. (Quivron, en préparation).

L'innovation en matière de polychromie est également à son apogée maximal au sud du Balochistan pakistanais, où deux productions remarquables se développent au début du III<sup>e</sup> millénaire : les céramiques de style *Dasht* au Makran occidental (Fig. 6, n° 4) et les céramiques de style *Nal*, dans la région de Jhalawan (Fig. 6, n° 2-3). Caractérisées par une riche iconographie à forte valeur symbolique, mêlant compositions géométriques et naturalistes peints en noir, rouge, blanc, jaune et bleu, les céramiques de *Nal* constituent sans doute l'une des productions les plus exceptionnelles et les mieux connues du Balochistan. Très prisées par les populations locales des régions de Jhalawan (Franke-Vogt 2005a : 66, 70-71) et de Las Bela (Franke-Vogt 2005b : 101 ; Dales 1979 : 250-251), leur aire de distribution couvre un vaste territoire comprenant une grande partie du Balochistan méridional et oriental (De Cardi 1965 : 103, 1983 : 31, 48-49 ; C. Jarige & al. 1995 : Fig. 2.17f) jusqu'aux frontières irano-afghanes (Amiet & Tosi 1978 : Fig. 4).

À l'inverse, les céramiques du *Dasht* produites au même moment au Makran occidental n'ont, jusqu'à présent, pas été enregistrées à l'extérieur de leur zone de production. Identifiées parmi le mobilier funéraire des cimetières de la plaine de *Dasht* entre 2800 et 2600 av. J.-C. (Didier 2007 : Pl. 140-146), elles montrent par leurs formes et par leurs décorations certains traits spécifiques non partagés avec les autres communautés du Balochistan pakistanais.

Enfin, comme pour les céramiques du IV<sup>e</sup> millénaire, plusieurs autres variantes bichromes de céramique locales ont été enregistrées au sein des assemblages matériels du Balochistan central et oriental, en particulier sur le site de Nausharo, dans la plaine de Kachi où quelques pots globulaires portent des décorations de cercles sécants peints en noir et en rouge foncé selon une esthétique que l'on retrouvera dès le milieu du III<sup>e</sup> millénaire dans les assemblages céramiques de la civilisation de l'Indus (Quivron, en préparation) (Fig. 6, n° 5).

## Identités culturelles et traditions techniques

La diversité des céramiques peintes produites au Balochistan au chalcolithique et au bronze ancien souligne donc bien la complexité socioculturelle de cette région, qui apparaît très tôt comme un centre de rayonnement majeur en matière de polychromie sur récipients en terre cuite. De nombreuses questions subsistent toutefois quant à la manufacture des vases et la diffusion des savoir-faire dans les confins indo-iraniens aux IV<sup>e</sup> et III<sup>e</sup> millénaires. Si les poteries polychromes témoignent d'un partage culturel important, peut-on reconstituer des modèles d'identités et une dynamique culturelle propre à certaines populations du Balochistan ? Existe-t-il une évolution particulière dans la composition des peintures utilisées et quelles sont leurs méthodes d'application ? Peut-on définir des secteurs de production distincts dans lesquels des technologies spécifiques ont été mises en œuvre ?

Plusieurs éléments de réponses sur la nature des peintures utilisées ainsi que sur leurs techniques d'application peuvent d'ores et déjà être apportés grâce aux résultats des analyses physico-chimiques réalisées au *Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France* (C2RMF), grâce au soutien financier de la Fondation Fyssen. Une vingtaine d'échantillons de poteries variées provenant de deux grands secteurs du Balochistan : la plaine de Kachi, avec les sites de Mehrgarh et de Nausharo, et le Makran pakistanais, mais également du site Mundigak, au sud de l'Afghanistan, ont fait l'objet d'un programme de recherche impliquant plusieurs méthodes d'analyses. Pour la caractérisation des pâtes céramiques, des observations pétrographiques en lames minces ont été réalisées sous lumière polarisée et non polarisée. Pour l'étude des décors peints, les méthodes d'analyses ont impliqué la diffraction de rayons X (DRX) permettant d'identifier des phases minérales présentes dans les couches de peintures, la microscopie électronique à balayage (MEB-EDX) et l'analyse par faisceau d'ions réalisée selon la technique PIXE (Particule Induced X-Ray Emission) pour la caractérisation chimique des peintures et leur étude stratigraphique, et la spectroscopie Raman pour l'analyse moléculaire. Enfin, la question des liants a été abordée par la chromatographie en phase gazeuse. Cette dernière méthode d'analyse n'a malheureusement

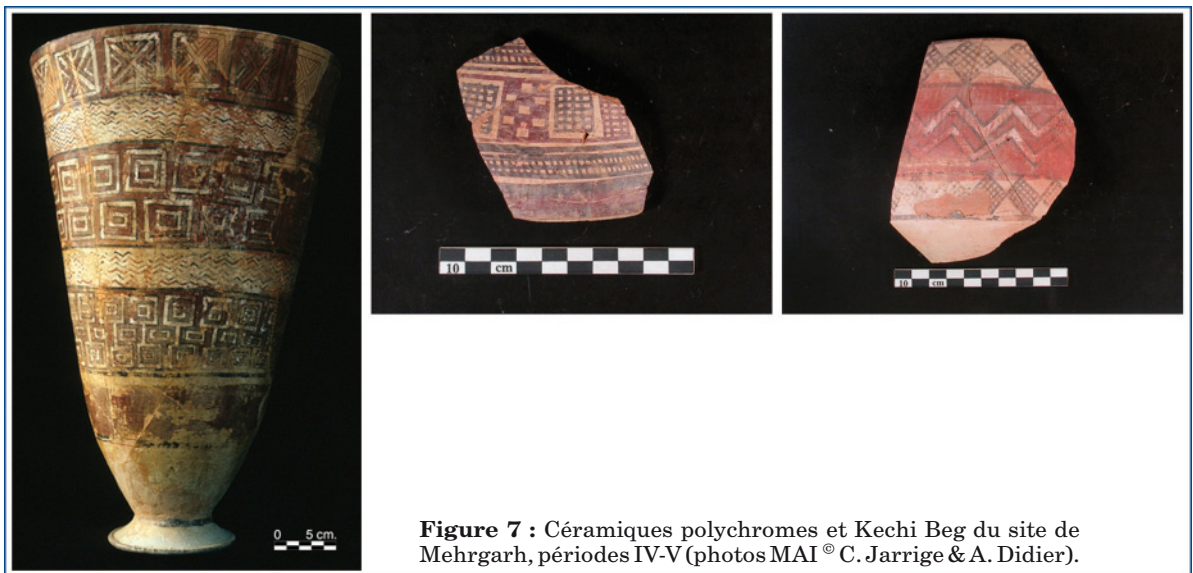
ment pas permis d'obtenir de résultats significatifs ; l'hypothèse la plus plausible serait l'usage d'un matériau organique riche en protéines (graisse animale, huiles végétale, œuf...). Étant donné l'échantillonnage de poterie limité pris en compte dans cette étude, les résultats des analyses présentés ci-dessous sous forme de synthèse restent préliminaires et ne correspondent pas nécessairement à l'ensemble des productions étudiées. Ils permettent néanmoins d'identifier certains traits techniques nécessitant d'être approfondis par de futures investigations.

#### IV<sup>e</sup> millénaire : Innovation technique et spécialisation artisanale

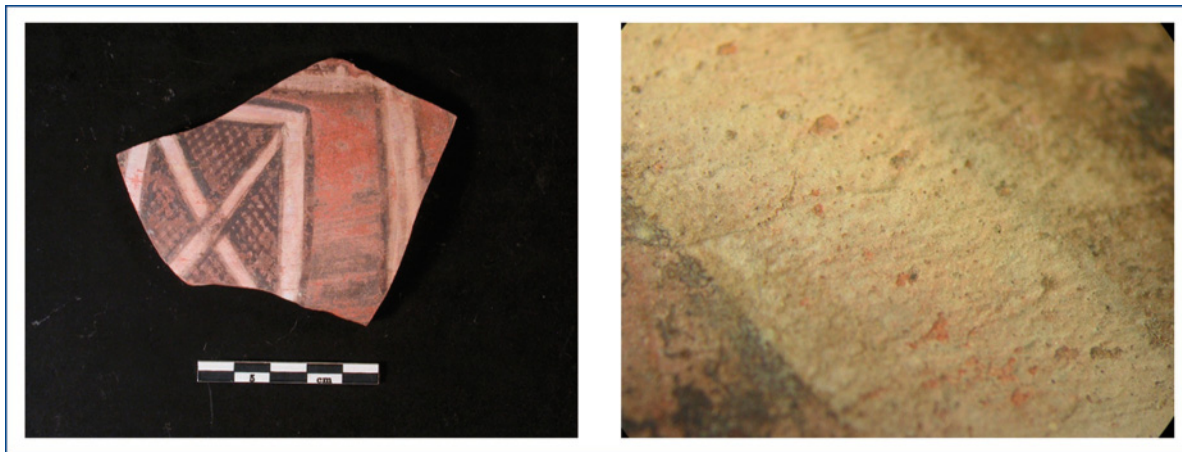
Pour les productions polychromes du IV<sup>e</sup> millénaire (céramique Kechi Beg et poterie polychrome de Mehrgarh, poterie fine rouge bichrome du Makran), les résultats soulignent tout d'abord la continuité des techniques de décor innovantes développées au Balochistan central et oriental dès 4000 avant notre ère dans les assemblages de style *Togau* ; celles-ci impliquent l'utilisation de peintures noires et rouges principalement composées d'oxydes de fer, et appliquées avant cuisson du vase. Quelle que soit la région ou le type de production considéré, les potiers semblent toujours avoir privilégié l'utilisation de l'hématite pour la peinture rouge, un matériau facilement accessible dans leur environnement immédiat et compatible avec tous les liants d'origine organique. L'utilisation de ce

matériau naturel possède un autre avantage : selon la taille de ses grains, il permet d'obtenir des nuances de couleurs variées allant du rouge vif au brun-violet. Mais la variation de couleurs obtenues par les potiers du Balochistan pourrait aussi être expliquée par différentes étapes successives de fixation des pigments.

Or, à partir de 3600-3500 av. J.-C., période marquée par le développement de la polychromie (noir, rouge et blanc), de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques de décor vont faire leur apparition, notamment l'usage ponctuel d'un engobe de couleur beige appliqué avant l'exécution du décor peint sur plusieurs poteries Kechi Beg et trichromes du site de Mehrgarh (périodes IV-V). De la même manière, pour ces dernières, une peinture de couleur rouge vif est appliquée sur la surface des vases telle une couche unie avant le traçage en noir des motifs géométriques (Fig. 7). Pour la fabrication de la couleur noire, les pigments à base d'oxydes de fer vont être associés à de nouveaux matériaux comme le manganèse, déjà utilisé dans les productions peintes du Plateau iranien et de la plaine de Téhéran (Fazeli et al. 2010 : 23), et retrouvé dans deux échantillons de Mehrgarh et du Makran. Il est intéressant de noter que c'est au sein de ces deux productions (Mehrgarh polychrome et Makran bichrome) que les motifs tracés en noir sont remplis avec de la peinture blanche, pour la première fois attestée dans cette région.



**Figure 7** : Céramiques polychromes et Kechi Beg du site de Mehrgarh, périodes IV-V (photos MAI © C. Jarrige & A. Didier).



**Figure 8 :** Céramique bichrome du site de Miri Qalat et photo détaillée de la peinture blanche (photos MAI & C2RMF © A. Didier).

Dans le cas d'un échantillon provenant du site de Mehrgarh, cette peinture d'aspect pulvérulent est obtenue à partir de la chauffe de la stéatite, un matériau déjà très largement utilisé dans la vie quotidienne des populations de la région, en particulier pour la manufacture des perles. Naturellement grise foncée, la stéatite devient très dure et prend une couleur blanche lorsqu'elle est chauffée à une température avoisinant les 1 000 °C. En revanche, pour les productions bichromes (noir et blanc) de la vallée de la Kech, au Makran pakistanais (Fig. 8), les résultats d'analyse de deux échantillons de pigments montrent l'utilisation de la marne cuite, une argile très fine de couleur blanchâtre, sélectionnée avec soin, et chauffée à une température très élevée (1 000-1 100 °C). L'élément commun qui relie les productions de la plaine de Kachi et du Makran réside, dans les deux cas, dans le niveau élevé de maîtrise des processus pyrotechnologiques mis en œuvre pour la fabrication de ces peintures. Toutefois, plusieurs incertitudes persistent quant à leur application avant ou après cuisson des vases, d'autant que les pâtes céramiques sont souvent dépourvues de minéraux thermomètres visibles. Les résultats des observations microscopiques semblent privilégier la première hypothèse. Mais les pigments pourraient également avoir été fixés durant plusieurs cycles de cuisson successifs. Quoi qu'il en soit, les décors peints des céramiques du IV<sup>e</sup> millénaire montrent une technologie parfaitement bien maîtrisée et un niveau de spécialisation élevé, correspondant à un type de société déjà très structurée tant économique-

ment que socialement avec l'existence de véritables artisans.

### III<sup>e</sup> millénaire : Diffusion des savoir-faire et traditions stylistiques

Dès le début du III<sup>e</sup> millénaire, l'usage de la polychromie sur récipients en terre-cuite connaît plusieurs évolutions dans le choix des matériaux utilisés et dans les techniques d'application des pigments colorés. Alors que les peintures noires décorant les poteries analysées du IV<sup>e</sup> millénaire sont essentiellement composées d'oxydes de fer, c'est le charbon du bois qui constitue le principal composant de la peinture noire retrouvée sur un échantillon de céramique polychrome de la plaine de Dasht (Fig. 9, à gauche). Les motifs tracés en noir sont ensuite remplis en rouge et en jaune. La peinture jaune, fabriquée à partir de goëthite (pour les productions analysées) et inexistante dans les productions du IV<sup>e</sup> millénaire, fait ainsi son apparition de manière simultanée dans plusieurs centres de production du Balochistan (région de Nal et du Makran) et au Séistan iranien (site de Shahr-i Sokhta). En revanche, les pigments verts ou bleus<sup>6</sup>, fréquemment utilisés dans les compositions décoratives de style *Nal*, ne semblent pas avoir été en vogue chez les potiers de la plaine de Dasht. L'autre conclusion importante est la disparition progressive de la peinture blanche assez épaisse et pulvérulente en usage

<sup>6</sup> Ceux-ci fabriqués très probablement à partir de lapis-lazuli.



**Figure 9** : À droite, détail du décor peint d'un tesson provenant de la plaine de Dasht (photo C2RMF<sup>®</sup> D. Bagault). À gauche, céramique polychrome de style *Hilmand* découverte à Mundigak (photo<sup>®</sup> A. Didier).

durant le Chalcolithique aussi bien dans les productions de Mehrgarh que dans celles du Makran pakistanais. Seules les productions de style *Hilmand* semblent avoir conservé cette pratique (Fig. 9, à droite).

Une nouvelle méthode d'application des peintures peut également être observée dans les productions trichromes et quadrichromes du III<sup>e</sup> millénaire. Souvent d'aspect fugitif et pulvérent, les peintures semblent être désormais appliquées à froid, après cuisson du vase<sup>7</sup>, comme en témoigne l'analyse d'échantillons de poterie Hilmand et Dasht.

Ainsi, à la lumière des travaux récents, les vases polychromes du Balochistan ne peuvent plus être considérés comme des ensembles de céramiques homogènes, qui se développent de manière conjointe et selon une technologie identique dans les assemblages matériels des populations de la région, mais comme des marqueurs identitaires privilégiés, témoignant d'un investissement technologique hors pair des artisans de la région au Chalcolithique et à l'Âge du bronze.

<sup>7</sup> Probablement sur une surface préalablement recouverte d'une très fine couche d'argile blanchâtre non cuite comme le suggère l'analyse d'un échantillon de poterie polychrome de Mundigak.

Alors que la diversité des « styles de décors » peints n'est plus à démontrer, les premiers résultats mettent en avant la variété des matériaux bruts utilisés (hématite, goéthite, oxydes de fer, charbon de bois, argiles, stéatite), dont les propriétés semblent très tôt parfaitement maîtrisées, et permettent de souligner les prouesses techniques accomplies en matière de fixation des pigments. Or, la spécialisation artisanale des potiers du Balochistan n'est pas seulement attestée par l'étude des décorations polychromes. L'analyse du support en terre-cuite traduit aussi le soin méticuleux apporté à la préparation des pâtes céramiques<sup>8</sup>, au façonnage des récipients et à la finition de leurs parties visibles<sup>9</sup>.

### Les céramiques polychromes, quelles fonctions ?

L'investissement technologique lié à la manufacture des vases polychromes et leur diversité pose nécessairement la question de leur fonction

<sup>8</sup> Pour les céramiques produites dans la plaine de Kachi, la finesse de certaines pâtes suggère l'existence d'un processus de décantation de l'argile comme c'est le cas, à la même période, pour la production des figurines en terre-cuite.

<sup>9</sup> À l'exception de certaines productions du Makran datées du IV<sup>e</sup> et du tout début du III<sup>e</sup> millénaires, la plupart des récipients étudiés combinent dans une même séquence la technique des colombins et l'usage de la rotation. L'utilisation plus intensive du tour de potier ne se généralise que dans la première moitié du III<sup>e</sup> millénaire.



dans les sociétés anciennes du Balochistan et des régions voisines. Si le développement de cet artisanat peut s'expliquer par des nécessités de goût, il peut aussi être lié à de nouveaux besoins fonctionnels ou des raisons économiques et sociales particulières. Dans certains cas, les céramiques polychromes pourraient être des éléments socialement valorisés du point de vue individuel et collectif ou intégrés à l'univers de la représentation sociale (par exemple des productions de prestige, destinées à créer des symboles de pouvoir ou à renforcer l'image élitiste de certaines communautés). L'essor des échanges régionaux et extra-régionaux dans la seconde moitié du IV<sup>e</sup> millénaire et au III<sup>e</sup> millénaire av. J.-C. a nécessairement créé une période d'émulation pouvant engendrer un environnement social compétitif dans lequel les groupes et les individus cherchent à éprouver leurs statuts respectifs en adoptant des expressions matérielles (Astruc et al. 2009).

L'application de pigments colorés dans des systèmes figuratifs distincts peut également traduire une appartenance culturelle ou ethnique à un groupe de population donné comme ce peut être le cas dans l'artisanat textile actuel et passé de plusieurs groupes tribaux du Pakistan, d'Afghanistan ou d'Asie centrale méridionale. La distribution de poteries rattachées à un style décoratif identique ne saurait toutefois suggérer qu'elles proviennent d'un même secteur de production. Les analyses morpho-stylistiques combinées à l'étude technique tendent à montrer l'existence de variantes locales distinctes d'une même production.

Dans le cas des poteries de la plaine de Dasht produites dans la première moitié du III<sup>e</sup> millénaire, la fragilité et la mauvaise conservation des pigments, surtout s'ils sont appliqués après cuisson, semblent exclure un rôle utilitaire intégré dans la sphère des activités domestiques (cuisson, transport). Une partie de la production pourrait être destinée à un usage funéraire comme en témoigne la découverte de nombreux vestiges à la surface des cimetières de cette région (Didier 2007 : 208). Certaines productions richement décorées comme la céramique de *Nal*, découverte à la fois en contextes domestique et funéraire et empreinte d'une forte connotation symbolique, pourraient avoir joué un rôle important dans la diffusion du savoir-faire et des idées au Balochistan durant la période protohistorique.

### Les récipients polychromes : témoins privilégiés des interactions culturelles et matérielles en Asie moyenne

Or, en matière de polychromie sur récipients en terre-cuite, le partage des styles, des idées et des techniques dépasse très largement les frontières de notre région d'étude comme le soulignent plusieurs découvertes de céramiques peintes d'origine locale réalisées dans le sud-est iranien (Caldwell 1967 : Fig. 27-28, pl. 10 ; Madjidzadeh 2003 : 73, 2008) et en Asie centrale méridionale (Kohl 1984 : 45-46), qui présentent de nombreux traits communs avec les productions du Balochistan. L'usage de la polychromie dans ces deux régions semble même se développer de manière simultanée vers le milieu du IV<sup>e</sup> millénaire av. J.-C. Si les techniques mises en œuvre par les potiers suivent parfois une évolution comparable à celle des poteries du Balochistan, il n'en reste pas moins que les régions concernées conservent un développement stylistique autonome (tradition de style *Aliabad ware*, au Kerman iranien et tradition de style *Geoksyur* au Turkménistan méridional<sup>10</sup>). Un autre point important est la disparition de ces poteries polychromes originales des assemblages matériels d'Asie centrale méridionale<sup>11</sup> et du sud-est iranien vers 3000 av. J.-C. au moment du développement des productions de style *Nal*, *Hilmand* et *Dasht* au Balochistan. Ce n'est pas le cas pour les autres artisanats en terre-cuite polychromes qui connaissent alors, au Turkménistan, un développement important (fusaïoles, boîtes reliquaires...).

Parallèlement, c'est à cette même période qu'apparaissent plusieurs productions locales de récipients polychromes dans les territoires localisés au Nord de la vallée de l'Indus, en particulier sur les sites de Harappa (Kenoyer et Meadow, 2000 : 62, Fig. 4.1-4), au Penjab, et de Rehman Dheri, dans la plaine de Gomal (Durrani et Wright 1993 : 152-153, Fig. 3 et 4), au Pakistan. Contrairement aux productions du Balochistan, de styles

<sup>10</sup> Cette production céramique de style *Geoksyur*, décorée de remarquables motifs géométriques ou naturalistes (motifs de bouquetins) peints en noir, rouge et brun occupe une place significative dans les assemblages matériels des périodes Namazga II et II (3800-3000 av. J.-C.) sur de nombreux sites du Turkménistan méridional.

<sup>11</sup> En Asie centrale, on constate également la disparition simultanée de la riche tradition des figurines anthropomorphes peintes.

variés et souvent limitées dans le temps, les céramiques polychromes de la vallée de l'Indus<sup>12</sup> appartiennent souvent à un style décoratif homogène et suivent une évolution continue comprise entre 3200 et 2600 av. J.-C. Leur originalité provient sans aucun doute de la grande variété des couleurs de peintures utilisées : rouge, blanc, crème, jaune, noir, brun, violet et vert, qui semble indiquer une très bonne maîtrise de la chimie des colorants. L'apparition de ces poteries polychromes dans une région où l'artisanat céramique local n'atteint pas le niveau d'habileté technique exceptionnel développé par les potiers du Balochistan depuis le début de la période chalcolithique suggère que les deux régions pourraient avoir entretenu des contacts étroits autour de 3000 av. J.-C., permettant de faciliter les transferts de technologie.

## Conclusion

Les productions céramiques polychromes du IV<sup>e</sup> et du III<sup>e</sup> millénaire av. J.-C. constituent donc des marqueurs chronologiques et culturels d'une importance significative pour la connaissance des cultures matérielles protohistoriques du Balochistan.



**Figure 10** : Productions céramiques polychromes dans les régions indo-iraniens aux IV<sup>e</sup> et III<sup>e</sup> millénaires av. J.-C. (Carte : H. Balfet & A. Didier ; Photos ©MAFM, ©MAI, ©MAFTUR et d'après Basaglia, P. et al., 1977 : fig. 30 ; Durrani, F.A., 1988 : pl. XVII A ; Franke-Vogt, U., 2005c : abb. 16 ; Catalogue d'exposition *Les cités oubliées de l'Indus. Archéologie du Pakistan*, 1988 : n° 123. Paris : Association française d'Action artistique ; Madjidzadeh 2003 : 73).

Bien que les études techniques n'aient pas permis d'identifier l'ensemble des peintures et des méthodes mises en œuvre par les potiers (la mauvaise conservation des pigments colorés, surtout dans les zones peintes en blanc, rend les analyses et leurs interprétations difficiles), leurs résultats témoignent d'une diffusion significative des styles et des procédés technologiques dans l'ensemble de la région vers 3500 av. J.-C.

La diversité des artisanats peints produits dans les régions périphériques aux IV<sup>e</sup> et III<sup>e</sup> millénaires (peintures murales, céramiques, figurines, boîtes peintes...), démontre également l'existence d'une intense circulation de matériaux et d'idées échangés sur un vaste territoire. Leur étude approfondie permettra de confronter plusieurs grands secteurs de production et de mieux comprendre les processus d'émergence et de développement de la tradition de la peinture polychrome à l'échelle de l'Asie moyenne.

## Remerciements

Je tiens à remercier la Fondation Fyssen dont le soutien financier a été décisif pour la réalisation de mes travaux de recherche, ainsi que mes principaux partenaires : les missions archéologiques de l'Indus et du Makran (UMR 9993 du CNRS - *Centre de recherche archéologique Indus-Balochistan, Asie centrale et orientale*) et le Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France. Je suis enfin très reconnaissante au Prof. Tosi de m'avoir accueillie durant mon stage post-doctoral dans son laboratoire de recherche de l'Université de Bologne (Italie).

## Bibliographie

- Amiet P. & Tosi M. (1978) Phase 10 at Shahr-i Sohka. Excavations in Square XDV and The Late 4th Millenium B.C. Assemblage of Seistan. *East and West* 28(1-4) : 9-32.
- Astruc L., Gaulon A. & Salanova L. (eds) (2009) *Méthodes d'approche des premières productions céramiques : étude de cas dans les Balkans et au Levant*. Table-ronde de la Maison de l'Archéologie et de l'Ethnologie (Nanterre, France), 28 février 2006. Rahden : Marie Leidorf GmbH.
- Barthélémy de Saizieu B. (2003) *Les Parures de Mehrgarh : Perles et Pendentifs du Néolithique précéramique à la Période pré-Indus. Fouilles 1974-1985*. Éditions Recherche sur les Civilisations, Paris : ADFP.

<sup>12</sup> Qui précèdent l'essor de la civilisation de l'Indus.

- Basaglia P. et al. (1977) *La Citta' Bruciata del Deserto Salato*. Venezia : Erizzo.
- Besenval R. (1997) Entre le sud-est iranien et la plaine de l'Indus : le Kech Makran. Recherches archéologiques sur le peuplement ancien d'une marche des confins indo-iraniens. *Arts Asiatiques* 52 : 5-36.
- Besenval R. (2000) New Data for the Chronology of the Protohistory of Kech-Makran (Pakistan) from Miri Qalat 1996 and Shahi-Tump 1997 Field-Seasons. In : Taddei M. & De Marco G. (eds) *South Asian Archaeology 1997* : 161-88. Rome : Istituto Italiano per l'Africa e l'Oriente, Serie Orientale Roma vol. XC.
- Besenval R. & Isakov A. I. (1989) Sarazm et les débuts du peuplement agricole dans la région de Samarkand. *Arts Asiatiques* 44 : 5-20.
- Caldwell J. R. (1967) *Investigations at Tali Iblis*, Illinois State Museum Preliminary Reports, vol. 9, Springfield : Illinois State Museum Society.
- Cardi B. de (1959) New Wares and Fresh Problems from Baluchistan. *Antiquity* XXXIII (129) : 15-24.
- Cardi B. de (1965) Excavation and Reconnaissance in Kalat, West Pakistan-The Prehistoric Sequence in the Surab Region. *Pakistan Archaeology* 2 : 86-182. Karachi: The Department of Archaeology, Ministry of Education, Government of Pakistan.
- Cardi B. de (1983) *Archaeological Surveys in Baluchistan, 1948 and 1957*. University of London: Institute of Archaeology, occasional Publication n° 8.
- Casal J. M. (1961) *Fouilles de Mundigak*, Mémoires de la Délégation Archéologique Française en Afghanistan, Tome XVII. Paris : Librairie C. Klincksiek.
- Dales G. F. (1979) The Balakot Project: Summary of Four Years of Excavations in Pakistan. In : Taddei M. (ed) *South Asian Archaeology 1977* : 241-74. Naples : IsMEO.
- Didier A. (2007) *Archéologie des confins indo-iraniens : Étude de la production céramique du Kech-Makran (Pakistan) dans la première moitié du III<sup>e</sup> millénaire av. J.-C.* Thèse de doctorat nouveau régime sous la direction du Prof. S. Cleuziou. Paris : Université de Paris 1 - Panthéon-Sorbonne.
- Durrani F. A. (1988) Excavations in the Gomal Valley: Rehman Dheri Excavation Report No. I. *Ancient Pakistan* 6 : 1-204.
- Durrani F. A. & Wright R. P. (1993) Excavations at Rehman Dheri: The Pottery Typology and Technology. In : Possehl G. L. (ed) *South Asian Archaeology Studies* : 145-161.
- Fairservis W. A. (1956) *Excavations in the Quetta Valley, West Pakistan*, Anthropological Papers of the American Museum of Natural History, vol. XLV, Part 2 : 169-402. New York: American Museum of Natural History.
- Fairservis W. A. (1959) *Archaeological Surveys in the Zhob and Loralai Districts, West Pakistan*, Anthropological Papers of the American Museum of Natural History, vol. XLVII, Part 2. New York: American Museum of Natural History.
- Fazeli Nashali H., Vidale M., Bianchetti P., Guida G. & Coningham R. (2010) The evolution of ceramic manufacturing technology during the Late Neolithic and Transitional Chalcolithic periods at Tepe Paridis, Iran. *Archäologische Mitteilungen aus Iran und Turan* 42 : 1-26.
- Franke-Vogt U. (2005a) Excavations at Sohr Damb/Nal: Results of the 2002 and 2004 Seasons. In : Franke-Vogt U. & Weisshaar H.-J. (eds) *South Asian Archaeology 2003* : 63-76. Aachen: Linden Soft.
- Franke-Vogt U. (2005b) Balakot Period I: A Review of its Stratigraphy, Cultural Sequence and Date. In : C. Jarrige & Lefèvre V. (eds.) *South Asian Archaeology 2001* : 95-103. Paris : Éditions Recherche sur les Civilisations.
- Franke-Vogt U. (2005c) Sohr Damb/Nal, Baluchistan, Pakistan. Ergebnisse der Grabungen 2001, 2002 und 2004, *Archäologische Mitteilungen aus Iran und Turan Band 35-36* : 83-141.
- Franke U. (2008) Baluchistan and the Borderlands. *Encyclopedia of Archaeology 2008 (1)* : 651-670.
- Jarrige C. (1988) Les figurines humaines au Baluchistan. In : *Les Cités oubliées de l'Indus. Archéologie du Pakistan* : 65-70. Paris : Association Française d'Action Artistique.
- Jarrige C. (2005) Human Figurines from the Neolithic Levels at Mehragarh (Balochistan, Pakistan). In : Franke-Vogt U. & Weisshaar H.-J. (eds) *South Asian Archaeology 2003* : 27-37. Forschungen zur Archäologie Aussereuropäischer

Kulturen 1. Deutsches Archäologisches Institut. Bonn : Aachen.

- Jarrige C. (2008) The Figurines of the First Farmers at Mehrgarh and their Offshoots. *In* : Tewari R., Saraswat K. S. & Singh G. S. (eds) *Pragdhara 18* : 155-166. Lucknow: Journal of the U.P. State Archaeology Department 2007-2008.

- Jarrige C., Jarrige J. F. Meadow R. H. & Quivron G. (1995) *Mehrgarh Field Reports 1974-1985*. Karachi: The Department of Culture and Tourism, Government of Sindh.

- Jarrige J.-F. (1996) Les Fouilles de Nausharo au Balochistan pakistanais et leur Contribution à l'Étude de la Civilisation de l'Indus. *Académie des Inscriptions et Belles-Lettres : Comptes-rendus des Séances de l'année 1996, III*. 821-877. Paris : Diffusion De Boccard.

- Jarrige J.-F. (2004) Le Néolithique des frontières indo-iraniennes : Mehrgarh. *Aux marges des grands foyers du Néolithique. Périphéries débitrices ou créatrices ?* Séminaire du collège de France sous la direction de Jean Guilaine : 29-60. Paris : Errance.

- Jarrige J.-F. (2008) L'origine des cités de l'Indus à la lumière des fouilles de Mehrgarh et de Nausharo au Pakistan. *Villes, villages, campagnes de l'Âge du Bronze*, Séminaire du Collège de France sous la direction de Jean Guilaine : 9-22. Paris : Éditions Errance.

- Jarrige J.-F., Jarrige C. & Quivron G. (2005) Mehrgarh Neolithic: The Updated Sequence. *In* : Jarrige C. & Lefèvre V. (eds) *South Asian Archaeology 2001* : 128-141. Paris : Éditions ERC.

- Kenoyer J. M. & Meadow R. H. (2000) The Ravi Phase: A New Cultural Manifestation at Harappa. *In* : Taddei M. and De Marco G. (eds.) *South Asian Archaeology 1997* : 55-76. Roma : Istituto Italiano per l'Africa e l'Oriente.

- Madjidzadeh Y. (2003) La première campagne de fouilles à Jiroft dans le bassin du Halil Roud. *Dossiers d'Archéologie n° 287* : 65-77.

- Madjidzadeh Y. (2008) Excavations at Konar Sandal in the region of Jiroft in the Halil Basin: First Preliminary Report (2002-2008). *Iran 46* : 69-103.

- Mugavero L. (2009) *Polychrome ware from Shahr-i Sokhta*. Research Center for ICHHTO. Sistan & Baluchistan region: Cultural Heritage, Handicrafts & Tourism. Organization of Sistan & Baluchistan.

- Mugavero L. & Vidale M. (2003) The Use of Polychrome Containers in the Hilmand Civilization: A Female Function? *East and West 53* : 67-94.

- Mugavero L. & Vidale M. (2006) The Helmand Polychrome Wares as Skeuomorphs. Interlacing Pottery Making, Painting and Basketry. *East and West 56* : 433-437.

- Mutin B. (2007) *Contribution à l'étude du peuplement des confins indo-iraniens au Chalcolithique : Caractérisation de la production céramique du Makran pakistanais des périodes II et IIIa (4<sup>e</sup> millénaire av. J.-C.)*. Thèse de doctorat nouveau régime sous la direction du Prof. S. Cleuziou. Paris : Université de Paris 1 - Panthéon-Sorbonne.

- Mutin B. (à paraître) Ceramic Traditions and Interactions on the Southeastern Iranian Plateau during the 4th Millennium BC, Actes du colloque *Ancient Iran and its Neighbours. Local developments and long-range interactions in the 4th millennium BC*, Cambridge, June 26-29th 2009.

- Quivron G. (non publié) *Fouilles de Mehrgarh et de Nausharo, Balochistan. Les styles céramiques du Chalcolithique récent IV à la troisième période de la Civilisation de l'Indus. 3600-1900 avant notre ère*.

- Solovyova N. F. (2000) The Wall-Painting of Ilgynly Tepe. *In* : Taddei M. & De Marco G. (eds) *South Asian Archaeology 1997* : 453-466. Rome : Istituto Italiano per l'Africa e l'Oriente, Serie Orientale Roma vol. XC.

- Sumner W. M. (2003) Early Urban Life in the Land of Anshan: Excavations at Tal-e Malyan in the Highlands of Iran. *Malyan Excavations Reports vol. III*, University Museum Monograph 117. Philadelphia : University of Pennsylvania Museum.

- Wright R. P. (1995) Fine Ware Traditions at Mehrgarh. *In* : Jarrige C., Jarrige J. F., Meadow R. H. & Quivron G. (eds) *Mehrgarh Field Reports 1974-1985*. Karachi: The Department of Culture and Tourism, Government of Sindh.

## Introduction

Since Neolithic, the colour plays a significant role in the societies of Pakistani Balochistan. The use of polychrome painting on various media (architecture, funerary practices, craft industries) constitutes a cultural tradition deeply rooted in the domestic life, the mentalities and the *savoir-faire* of the ancient people. It also repre-

sents a key-marker of interactions and influences with neighbouring cultures of south-eastern Iran and southern Central Asia. Among the most significant «colored» artefacts produced during the 4<sup>th</sup> and the 3<sup>rd</sup> millennia BC (Middle-Late Chalcolithic-Bronze Age), the study is focused on the original and diversified polychrome wares.



**Figure 1:** General map of the Indo-Iranian Borderlands.

Distributed from southern Afghanistan to the Pakistani coast and from the Indus Valley to south-eastern Iran, the considered pottery productions show an important stylistical richness and a high craft skill. The attention paid to the polychrome pottery in the Indo-Iranian borderlands is relatively recent (Mugavero & Vidale 2003, Mugavero 2009), even more considering Pakistani Balochistan. The fragility of the pigments and their bad preservation<sup>13</sup> might explain this situation. The considerable amount and the quality of the archaeological remains excavated by the French teams at Mundigak (Afghanistan) (Casal 1961), at Mehrgarh and Nausharo (Kachi-Bolan region, Pakistan) (C. Jarrige & al. 1995; Jarrige 1996) and in Pakistani Makran (Besenval 1997, Didier 2007) allow however to develop further studies (morpho-functional, stylistical and technical analyses) in order to better understand a specific craft tradition (the polychrome

painting) developed during one millennium in one of the most dynamic pottery centre in Middle Asia. Can we assess the degree of innovation, development and complexity of the polychrome wares? Can we establish a relationship between the vessel forms, the decorative motifs and the coloured fillings? How can we explain the colour and material choices and the symbolism of certain decorations? What is the role of these productions? On a larger scale, the matter is also to bring to light the outstanding dynamism of the cultural and material interactions in the Indo-Iranian borderlands (Pakistan, south-eastern Iran, north-western India, Afghanistan) and in southern Central Asia during the 4<sup>th</sup> and the 3<sup>rd</sup> millennia BC.

### The polychrome painting: a craft tradition inherited from Neolithic

Located between Iran, Afghanistan and Pakistan, the huge landmass of Balochistan occupies a bordering territory between the Indian subcontinent and Middle Asia. The region is a complex cultural landscape (Franke-Vogt 2008: 651) marked by numerous technical innovations and an important *savoir-faire* since Neolithic (Jarrige 2008: 11). It differs from the other regions of the Indo-Iranian borderlands by the quality and the diversity of its craft productions, particularly in the field of the pyrotechnological industries. The development of the pyrotechnological crafts is based on an advanced knowledge of the firing processes which allows to transform raw materials, carefully selected, in finished products.

The tradition of the polychrome painting, whose oldest remains date from the 8<sup>th</sup> millennium BC in Pakistani Balochistan, obviously constitutes a key-marker of deep socio-economic and cultural changes occurring during the Neolithic period. As for bead manufacturing<sup>14</sup> (Barthélémy de Saizieu 2003), it emphasizes a specific ability to obtain raw materials of good quality and to transform them, by fire or not, in decorative devices.

In Balochistan, the oldest remains of polychrome pigments occur at Mehrgarh, in the

<sup>13</sup> The thickness of the paint layers observed on several samples of polychrome pottery collected in Pakistani Balochistan is often less than 20 microns.

<sup>14</sup> In particular the fired-steatite beads produced since Neolithic at Mehrgarh (period I). The glazed-steatite beads occur later from 5<sup>th</sup> millennium BC in period III levels.

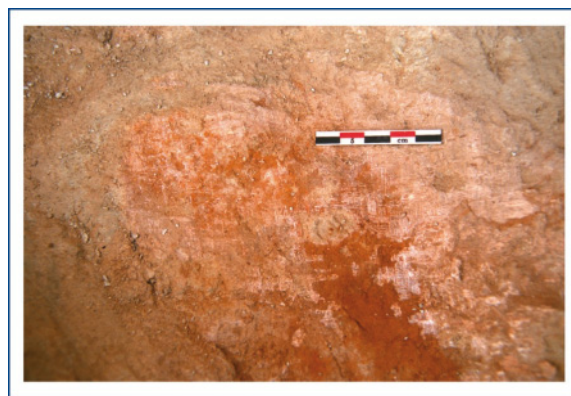
Kachi Plain (Eastern Balochistan). Mural coats made up from red ochre have been identified in the oldest Neolithic occupation level dated around 7500-7000 BC (Period I - Early) (C. Jarrige, Jarrige & Quivron 2005: 135). In the late levels of Period I (7000-6000 BC), a mudbrick wall has provided a veritable decoration painted in red, black and white (*Ibid*; Jarrige 2004: 40) (Fig. 2). Besides some floors are covered with red or white coats. From the remains of blue coats (probably coloured with lapis lazuli) on sediment associated with the mudbrick architecture, J.-F. Jarrige assumes that a wide range of colours was used on the site (Jarrige 2004: 40).



**Figure 2:** Remains of Neolithic mural painting from Mehrgarh, Period I (From Jarrige 2004: Fig. 9).

In the same period, people were buried in small mudbrick rooms covered with red ochre or laid on coated floors (Jarrige 2004: 51). This practice also predominates in funerary contexts of the 4<sup>th</sup> millennium BC in Makran, located in south-western Pakistani Balochistan (sites of Shahi-Tump and Miri Qalat in the Kech Valley). Red ochre is applied on mats covering the corpse (Fig. 3) or contained in sea-shells deposited in the graves (Besenval 2000: 167, 170). Mural pain-

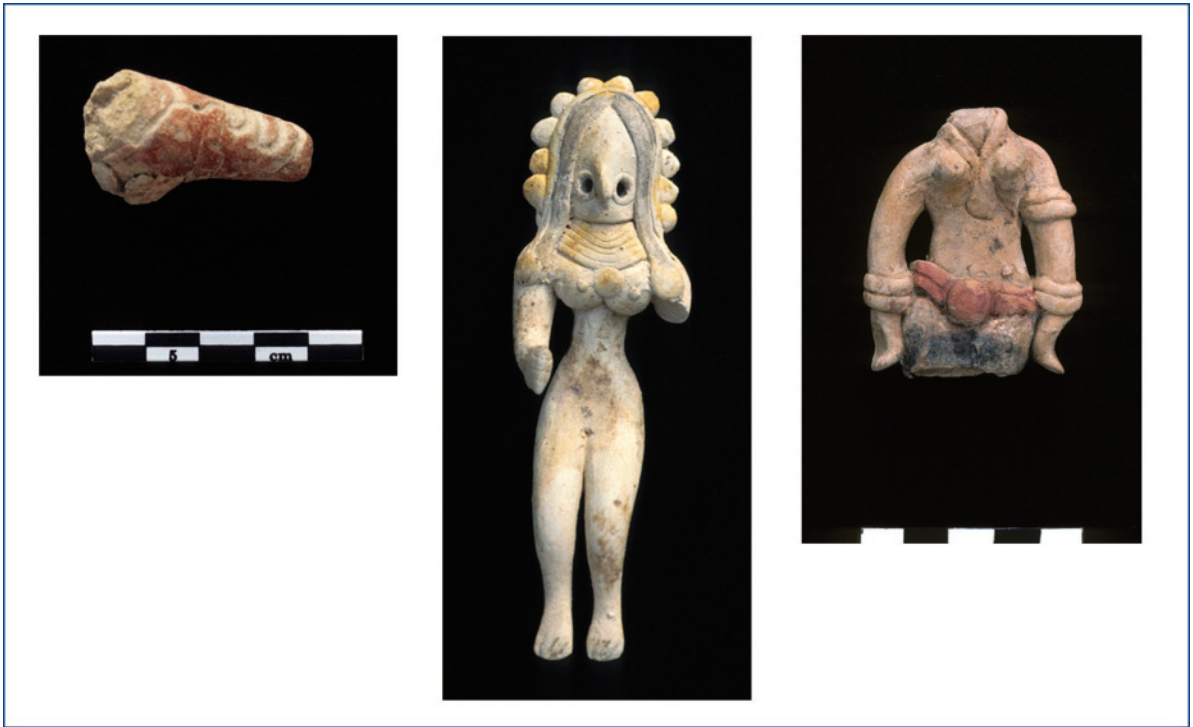
tings also occur in funerary or domestic contexts from the 4<sup>th</sup> millennium BC at Tall-e Malyan, in Fars (Iran) (Sumner 2003: Fig. 15-19) or at Ilgynly Depe in Turkmenistan (Solovyova 2000)<sup>15</sup>.



**Figure 3:** Fragment of mat covered with red ochre from Shahi-Tump cemetery, period II (Makran) (photo MAFM).

In Balochistan, the polychrome painting knows a significant development in the terracotta craft industries. Besides pottery, an important amount of painted anthropomorphic figurines has been collected in the Neolithic (period I) and Chalcolithic (period VII) levels at Mehrgarh and in the 3<sup>rd</sup> millennium levels (periods I-III) of Nausharo (C. Jarrige 2005, 2008) (Fig. 4). These decorated figurines form so far the oldest and significant assemblage from the Indo-Pakistani subcontinent (*Ibid*: 28). Their production will continue until the end of the 3<sup>rd</sup> millennium BC at the time of the Indus civilization. People might have also painted on other types of “invisible” media such as wood, textiles or skins, rarely preserved in the archaeological contexts, but showing a significant association between material and aesthetic function. Whatever is the use of the polychrome painting, the development of this craft tradition since Neolithic points out a major evolution in the mentalities and socio-economic contexts in Balochistan. Besides the aesthetic aspect, colour obviously strengthens the meaning of a distinctive visual code sometimes marked with symbolism for funerary practices or for figurines.

<sup>15</sup> Blue and red coats are also used at Sarazm (Tajikistan) (Besenval & Isakov 1989: 11).



**Figure 4:** On the left, neolithic figurine painted in red from Mehrgarh, period I. In the centre and on the right, 3<sup>rd</sup> millennium BC polychrome figurines from Nausharo (From C. Jarrige 2008: fig. 12, 17, 19).

## Polychrome wares in Balochistan

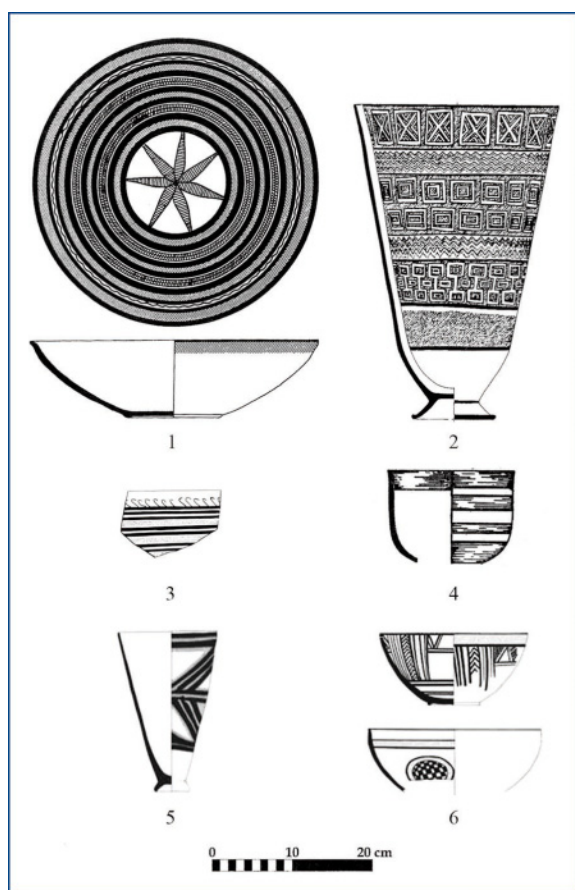
### First productions (4<sup>th</sup> millennium BC)

As the major centre of innovations in metallurgy or in glazed-bead manufacture (Barthélémy de Saizieu 2003), Balochistan shows one of its greater craft skills in pottery production. Potters have reached soon a technical ability in painted ceramic higher than those of many middle Asian populations. From 5000 BCE, craftsmen from eastern and central Balochistan produced fine painted monochrome wares in large amounts, remarkable by their exceptional plastic quality and by their manufacturing (Jarrige 2008: 19). Their decoration painted in black or in reddish brown witnesses an advanced expertise in the fixing techniques of the coloured pigments involving complex firing processes<sup>16</sup> (Wright 1995: 665-666). In this innovative context, we can identify the early appearance of the polychrome painting in a distinctive ceramic group known as *Togau* (Ibid). In Mehrgarh, these *Togau* vessels

painted in black and red occur in a potter's workshop from the beginning of the the 4<sup>th</sup> millennium BC (C. Jarrige et al. 1995: 28). *Kechi Beg* pottery mainly includes open and carinated vessel forms (bowls, truncated-conical pots, beakers). The paste is fine and the vessel is decorated with a great variety of geometrical designs painted in red/brownish red and red on buff or pinkish buff (Fig. 5, n° 1). *Kechi Beg* polychrome spreads over a vast area which includes southern Afghanistan (site of Mundigak) (Casal 1961: Fig. 50, 53, 56, 57), the Quetta, Zhob and Loralai regions (Fairervis 1956: 257-259, 277-278, fig. 53, 61; 1959: 369, 400-401, 418-420, fig. 67, 71), the Kachi Plain (C. Jarrige & al. 1995: 28, fig. 2.11-2.13), and a part of southern Pakistani Balochistan (Franke-Vogt 2005: Fig. 9). Whether scholars have often considered possible links with the Jemdet Nasr polychrome pottery produced in Mesopotamia during the Proto-Elamite period, *Kechi Beg* polychrome is probably related to a local tradition interacting from different production centres in Balochistan. Another significant element is the association of *Kechi Beg* and various vessel types in the same contexts at Mehrgarh (C. Jarrige & al.

<sup>16</sup> The firing may include successive cycles of oxidization, reduction and re-oxidization (Jarrige 2008: 19).

1995: 28). Among them, we have to notice the discovery of an outstanding local polychrome ware in the Period IV and V levels (3600-3100 BC) (Fig. 5, n° 2). Painted in black on a red coat, this pottery also displays the first use of white paint for the fillings of the geometric motifs (rarely caprids or stylized human figures). In the second half of the 4<sup>th</sup> millennium BC, new polychrome wares also appear in central and southern Balochistan (Fig. 5, n° 3-6). Most of them constitutes polychrome variants or a local adaptation of well-known ceramic styles such as *Togau C-D* pottery (Franke 2008: Fig. 10; Mutin 2007: Fig. II.231) (Fig. 5, n° 3), or *Zari ware* (De Cardi 1965: Fig. 11) (Fig. 5, n° 4).



**Figure 5:** Polychrome wares from the 4<sup>th</sup> millennium and from the beginning of the 3<sup>rd</sup> millennium BC (1-2: drawing MAI; 3: from De Cardi 1983: fig. 1; from De Cardi 1965: fig. 11; 5-6: drawings MAFM).

Although they might be inspired from certain technical or stylistical features identified in eastern Balochistan, other productions show an

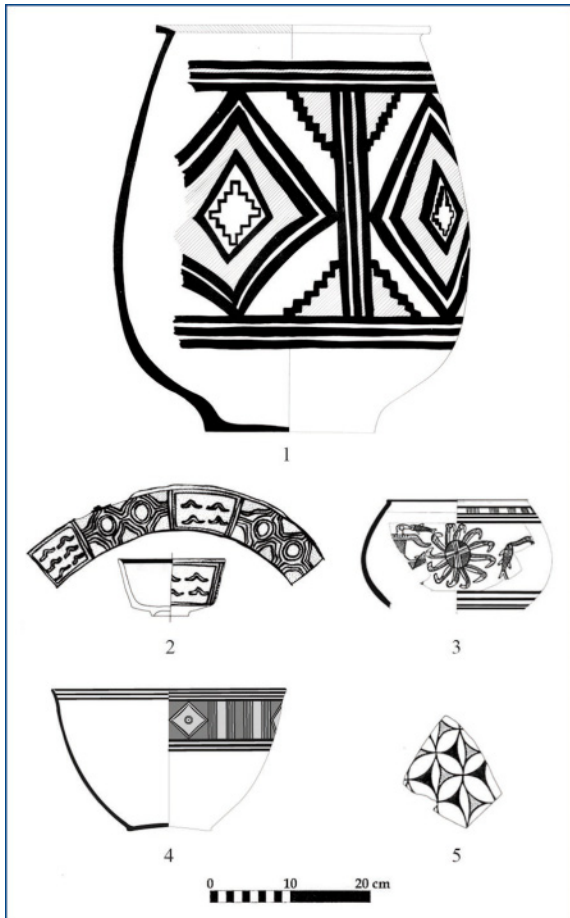
endogenous development such as the bichrome truncated-conical beakers collected in Pakistani Makran at Miri Qalat and Shahi-Tump (Mutin 2007: Fig. II.198) (Fig. 5, n° 5). Pottery productions from Makran, eastern and central Balochistan, and even from eastern Iran Indus Valley have in common the use of white paint which seems to appear simultaneously in these regions. In Makran, white paint is also observed in a fine red ware produced around 3000 BC (Fig. 5, n° 6). During this period, very distinctive pottery styles are developed in Balochistan often linked with a common technical or stylistical background. These diversified “styles” lead us to consider the existence of marked cultural entities, in which new major production centres emerge in Bronze Age.

### Bronze Age polychrome wares (first half of the 3<sup>rd</sup> millennium BC)

The transition between Chalcolithic and Bronze Age in the beginning of the 3<sup>rd</sup> millennium BC is characterized by strong socio-economic changes in the communities from Balochistan (high density of occupation, new rules in the modes of production and distribution, growing complexity of craft industries). In the field of pottery, these changes include a growing specialization, new manufacturing<sup>17</sup> and decoration technologies, new methods of production, particularly the development of specialized potter’s workshops outside the settlement areas, and the increase of long-distance exchanges which allows the access to materials and ideas from distant regions. Although it shows a stylistic continuity, the use of polychrome painting on pottery displays some stylistical evolutions and sometimes allows to visualize a material “language” of symbols.

<sup>17</sup> In particular the spread use of wheel-throwing techniques.





**Figure 6:** Polychrome wares from the 3<sup>rd</sup> millennium BC (1: from Casal 1961: fig. 91; 2: from Franke-Vogt 2005c: fig. 60; 3-4: drawings MAFM; 4: drawing MAD).

New polychrome wares interacting as cultural identity markers appear in Balochistan. This is the case of *Hilmand* polychrome ware (Fig. 6, n° 1) which witnesses the existence of ways of cultural and material exchanges between settlements located in Pakistani Balochistan, southern Afghanistan and Iranian Sistan during the 3<sup>rd</sup> millennium BC. *Hilmand* polychrome ware is mainly produced at Shahr-i Sokhta (Iran) (Mugavero & Vidale 2003, 2006; Mugavero 2009) between 2900 and 2600 BC. It is decorated with geometric motifs painted in black, red, yellow and white. This pottery is also recorded at Mundigak (Casal 1961: Fig. 56, n° 86-87 and Fig. 91, n° 392) (Fig. 6, n° 1) and at Mehrgarh and Nausharo in contexts dated from 3100 to 2600 BC (Quivron, forthcoming). In central and

southern Balochistan, two innovative polychrome pottery productions are developed in the same period: *Dasht* pottery in western Makran (Fig. 6, n° 4) and *Nal* pottery in the Jhalawan region (Fig. 6, n° 2-3). The well-known *Nal* polychrome ware is characterized by a rich iconography painted in black, red, yellow and blue, probably linked with a symbolic background. Its distribution spreads over a huge territory from southern Balochistan (Franke-Vogt 2005b: 101; Dales 1979: 250-251) to eastern Balochistan (De Cardi 1965: 103, 1983: 31, 48-49; C. Jarrige & al. 1995: Fig. 2.17f) and to Irano-Afghan margins (Amiet & Tosi 1978: Fig. 4). On the contrary, *Dasht* vessels were so far identified only in their production area (Dasht plain, Makran). They occur in the funerary material collected on the surface of the Dasht plain cemeteries dated from 2800-2600 BC (Didier 2007: Pl. 140-146). Their forms and decorations show unshared features with the other contemporaneous productions from the Indo-Iranian borderlands.

We also note other bichrome variants of local pottery productions in the material assemblages from Mundigak and in central and eastern Balochistan, particularly in Nausharo. Here archaeologists have discovered globular pots decorated with interlacing circles painted in black and red along with an aesthetic found later in the Indus ceramic assemblages (Quivron, forthcoming) (Fig. 6, n° 5).

### Cultural identities and technical traditions

The diversity of the polychrome wares produced during the 4<sup>th</sup> and 3<sup>rd</sup> millennia BC thus emphasizes the socio-cultural complexity in Balochistan, considered like a major centre for the development of this craft tradition. However, many questions are raised about the polychrome pottery manufacturing and the diffusion of techniques in the Indo-Iranian borderlands during these periods. Can we reconstruct patterns of identities and cultural dynamics appropriate for the populations of Balochistan? Do significant changes occur in the paint composition and in the decorative processes? Can we define distinct production areas in which specific technologies were displayed?

The petrographic and geochemical investigations carried out in the *Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France* (C2RMF)

thanks to the Foundation Fyssen can already bring several key-elements.

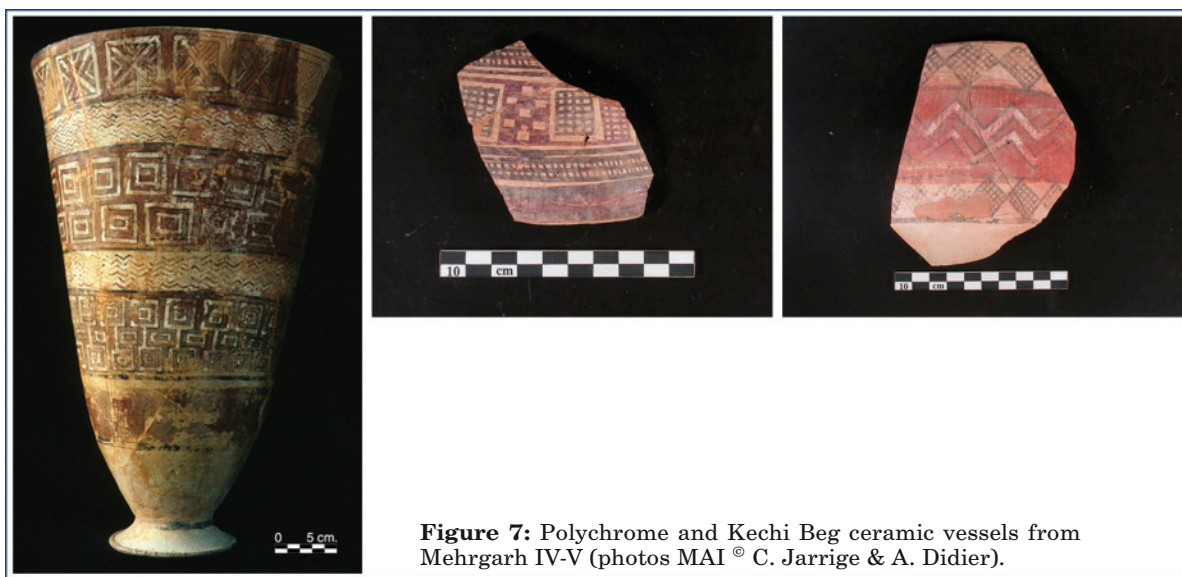
22 samples characteristic of 4<sup>th</sup> and 3<sup>rd</sup> millennia polychrome wares from the Kachi Plain (sites of Mehrgarh and Nausharo), from Makran (Dasht Plain sites) and from Mundigak were selected for the analytical program. Different analytical methods were used to characterize in the most complete way the pigments of the polychrome wares. We used Optic Microscopy (OM) for thin-section petrographical analysis under analyzed and non-analyzed polarized light. The mineralogical characterization was investigated by X-Ray Diffraction (XRD). The chemical characterization was performed with Scanning Electron Microscopy (SEM) fitted with EDX (Energy Dispersive X-Ray spectroscope) and ion beam analysis (IBA) with the PIXE technique (Particle Induced X-Ray Emission). Raman spectroscopy was used for the molecular analysis. The question of the binder was investigated by Gas Chromatography (GC). Unfortunately GC has provided no results because the organic matter was not preserved or in too low quantity. A plausible hypothesis would be the use of an organic binder rich in proteins (vegetal or animal oil, egg...). Considering the relatively limited number of analysed samples, the results of the archaeometric studies presented below remain preliminary and do not correspond to the overall pottery productions. Nevertheless, they allow to bring to light impor-

tant technical features which require further investigations.

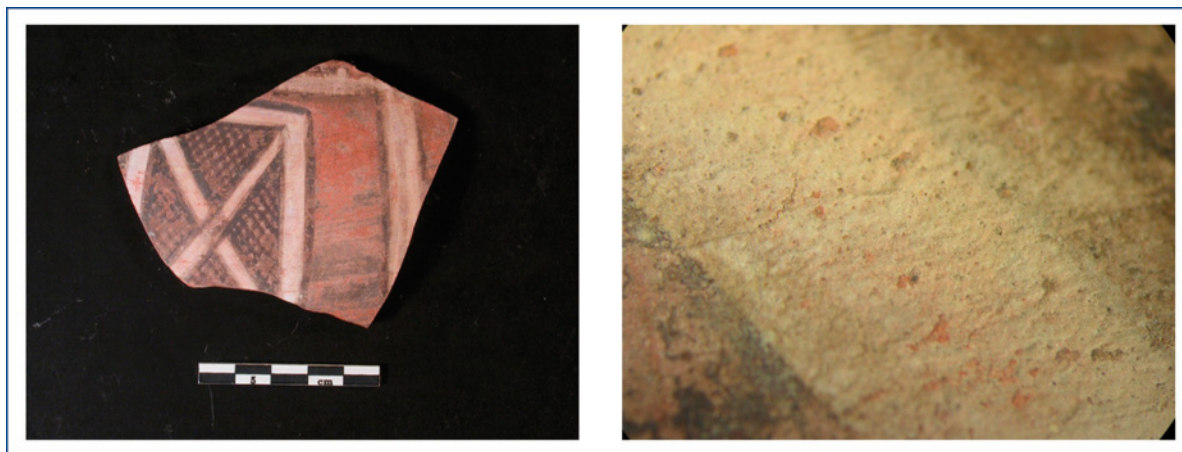
#### 4<sup>th</sup> millennium productions: Technical innovation and craft specialisation

For the 4<sup>th</sup> millennium polychrome wares (Kechi Beg and polychrome wares from Mehrgarh, fine bichrome red ware from Makran), the results emphasize a certain continuity with the innovative painting techniques developed in central and eastern Balochistan about 4000 BC, particularly in the *Togau* ceramic group. Red and black paints show iron oxide components and are applied before the vessel firing. For red, potters have privileged the use of hematite, an easily accessible material in their immediate environment and compatible with organic binders. Its different granulometries involve various hues ranging from brownish red/purple for coarser grains to light red for finer fractions. But the colour variation might also be explained by different steps of pigment fixation or different atmospheres varying during the firing.

From 3600-3500 BC, new material and decorative techniques also occur in the polychrome wares from Mehrgarh IV-V, in particular the use of a buff slip applied before the painted decoration for some Kechi Beg vessels. In the Mehrgarh polychrome group, potters used for the first time a bright red paint covering the vessel surface such as a slip before highlighting the motifs in



**Figure 7:** Polychrome and Kechi Beg ceramic vessels from Mehrgarh IV-V (photos MAI © C. Jarrige & A. Didier).



**Figure 8:** Fine bichrome red ware from Miri Qalat (Makran) and detailed picture of the white paint. (photos MAI & C2RMF © A. Didier).

black (Fig. 7, left and top). For black, the analysis performed on two samples of Mehrgarh polychrome and Makran bichrome ware shows components of iron oxide and manganese. This combination is already known in the Iranian Plateau and in the Tehran Plain (Fazeli et al. 2010: 23). Another point of comparison between Mehrgarh and Makran is the use for the first time of the white paint in the figurative system of the painted pottery for the filling of the motifs. For one sample of Mehrgarh polychrome, the powdery white paint is obtained from fired steatite, an already widely used material in the craft productions of the region, in particular for the bead manufacturing. The raw steatite of a dark grey colour becomes white and hard when it is fired around 1 000° C.

For two samples of Makran bichrome ware (Fig. 8), the results of the analysis indicate the use of whitish marly clay carefully selected and also fired at a high temperature (1 000-1 100° C). Mehrgarh and Makran samples have in common a high level of expertise in the pyrotechnological processes used to make the pigments. However, at this stage of analysis, it is not possible to define whether the white pigment was independently fired and applied after the vessel firing or applied raw before the firing<sup>18</sup>. The results tend to consider the second hypothesis. Different steps of

pigment fixation could also be involved in the decorative process. Nevertheless, the 4<sup>th</sup> millennium painted decorations witness a high degree of innovation and specialization corresponding to structured societies economically and socially with inventive craftsmen.

### **3<sup>rd</sup> millennium productions: Diffusion of savoir-faire and stylistic traditions**

Several evolutions in the raw materials and in the decorative processes can be observed in the 3<sup>rd</sup> millennium pottery productions. Although the black paint of 4<sup>th</sup> millennium pottery samples are mainly made up of iron oxide, charcoal has been found in a Dasht polychrome sample (Fig. 9, left). Black is used to draw the motifs before filling them in red and yellow. Yellow paint, made up of goethite and absent in the 4<sup>th</sup> millennium productions, seems to appear simultaneously in several pottery centres of Balochistan (Nal and Makran regions) and in Iranian Sistan (site of Shahr-i Sokhta). However, blue paint identified in the *Nal* pottery and probably obtained from complex recipes<sup>19</sup> is not used in Dasht ceramic production. White paint tends also to disappear in Makran and in Mehrgarh productions.

A new application method is also observed for samples of *Dasht* and *Hilmand* vessels. The very powdery and fugitive painting seems to be cold-applied after the vessel firing<sup>20</sup>.

<sup>18</sup> No visible thermometer minerals are identified in the ceramic pastes.

<sup>19</sup> Blue paint is likely made of lapis-lazuli.

<sup>20</sup> Probably on a preliminary whitish clay slip as suggests the analysis of a Mundigak sample.



**Figure 9:** On the right, detail of the painted decoration on a Dasht pottery sample (photo C2RMF © D. Bagault). On the left, *Hilmand* polychrome ware from Mundigak (photo © A. Didier).

From the results of the chrono-typological and archaeometric studies, polychrome wares from Balochistan can not be considered as homogeneous ceramic groups which developed jointly and following the same technological practice in the Indo-Iranian material assemblages. They can be considered as significant identity markers emphasizing a high technical investment during Chalcolithic and Bronze Age. While the diversity of the decorative “styles” is clearly established, the results point out the variety of used raw materials (hematite, goethite, iron oxide, manganese oxide, magnetite, charcoal, clays, steatite), which properties seem to have been mastered very early, and the degree of expertise in the pigment fixation processes. And yet, the craft specialization of the Balochistan potters is not only attested by the study of polychrome painting. The analysis of the clay bodies also shows a meticulous work on the preparation of the ceramic paste<sup>21</sup>, recipient making and the finishing of visible parts<sup>22</sup>.

<sup>21</sup> For the ceramics produced in the Kachi-Bolan region, the fineness of certain pastes suggests the existence of a clay decantation process that is the case at the same period for the production of terracotta figurines.

<sup>22</sup> Except for certain productions (Makran IIIa bichrome wares), most of the studied vessels from the 4<sup>th</sup> and 3<sup>rd</sup> millennia BC are manufactured with coil-building and wheel-throwing techniques combined into a single sequence.

### The polychrome wares: Which functions?

The technological investment and the diversity of the polychrome wares in Balochistan and in adjacent areas raise the problem of their function in the studied societies. The development of this craft tradition might be linked with local tastes, functional needs or socio-economic reasons. In certain cases, polychrome wares might be socially valuable items for individuals or for the group, or integrated into the world of the social representation (for example, prestige goods manufactured to create power symbols or to strengthen an elitist picture of some groups). The increase of regional and extra-regional exchanges in the second half of the 4<sup>th</sup> millennium and in the first half of the 3<sup>rd</sup> millennium BC has obviously generated a period of emulation and a competitive social environment, which are physically expressed by these kinds of craft productions (Astruc et al. 2009).

The occurrence of polychrome pigments in distinctive figurative systems may also witness a cultural or ethnic affiliation as it is the case for the decorated textiles used in and current past tribal groups from Pakistan, Afghanistan or Central Asia. However, the distribution of polychrome ceramics related to an identical decorative style does not suggest that they are produced

The use of fast wheel becomes more widespread in the first half of the 3<sup>rd</sup> millennium BC.

in the same are. The morpho-stylistical and archaeometric analyses tend to show the existence of distinct local variants of the same pottery.

For the Dasht polychrome ware produced in the first half of the 3<sup>rd</sup> millennium BC, the fragility and the bad preservation of the pigments, applied after the vessel firing, seem to exclude a domestic use such as cooking or transport. A part of the production might be intended for a funerary use as suggests the discovery of many potsherds on the surface of the Dasht Plain cemeteries (Didier 2007: 208). Other productions richly decorated like *Nal* pottery, collected in both domestic and funerary contexts and characterized by a strong symbolic connotation might also have played a key-role in the diffusion of *savoir-faire* and ideas in Balochistan.

### Polychrome wares: valuable witnesses of cultural and material interactions in Middle Asia

Polychrome wares also witness a sharing of styles, ideas and techniques with distant regions. Several local polychrome productions identified in south-eastern Iran (Caldwell 1967: Fig. 27-28, pl. 10; Madjidzadeh 2003: 73, 2008) and in southern Central Asia (Kohl 1984: 45-46) present common features with polychrome wares from Balochistan. The use of polychrome painting in pottery craft seems to develop simultaneously about the middle of the 4<sup>th</sup> millennium BC. While we observe several comparable technical evolutions with pottery from Balochistan, these productions show an endogenous stylistic development (traditions of *Aliabad ware*, in Iranian Kerman and *Geoksyur* pottery in southern Turkmenistan<sup>23</sup>. They disappear from the Iranian and centrasiatic material assemblages around 3000 BC whilst *Nal*, *Hilmand* and *Dasht* ceramics developed<sup>24</sup>. However, the use of polychrome painting continues on other terracotta media like reliquary boxes or spindle whorl in Central Asia and on mats in south-eastern Iran.

<sup>23</sup> The *Geoksyur* pottery is decorated with geometric motifs and few naturalistic motifs (caprids) painted in black, red and brown. It plays a significant part in the Namazga II and III material assemblages (3800-3000 BC) from southern Turkmenistan.

<sup>24</sup> In Turkmenistan, we can also observe the simultaneous disappearance of the rich tradition of polychrome figurines.



**Figure 10:** Polychrome wares in the Indo-Iranian borderlands during the 4<sup>th</sup> and 3<sup>rd</sup> millennia BC. (Carte : H. Balfet & A. Didier ; Photos ©MAFM, ©MAI, ©MAFTUR et d'après Basaglia, P. et al., 1977 : fig. 30 ; Durrani, F.A., 1988 : pl. XVII ; Franke-Vogt, U., 2005c : abb. 16 ; Catalogue d'exposition *Les cités oubliées de l'Indus. Archéologie du Pakistan*, 1988 : n° 123. Paris : Association française d'Action artistique ; Madjidzadeh 2003 : 73).

At the same time, local polychrome wares appear in the Indus Valley, particularly at Harappa in Punjab (Kenoyer et Meadow, 2000: 62, Fig. 4.1-4) and at Rehman Dheri in the Gomal Plain (Durrani et Wright 1993: 152-153, Fig. 3 et 4), both located in Pakistan. While polychrome productions from Balochistan are various and often limited in time, pottery from the Indus Valley are related to a homogeneous decorative style and follow a continuous evolution ranging from 3200 to 2600 BC<sup>25</sup>. It is characterized by a great variety of the painting colours (red, white, cream, yellow, black, brown, purple and green) which witness a high level of expertise in the pigment chemistry.

While the overall pottery productions from the Indus Valley do not reach the high level of technical skill developed by the Balochistan potters in the Chalcolithic period, the development of this craft tradition might suggest that the two regions had close relationships around 3000 BC, allowing technological transfers.

<sup>25</sup> Their development precedes the Indus civilization.

## Conclusion

Polychrome wares from the 4<sup>th</sup> and 3<sup>rd</sup> millennia BC constitute significant chrono-cultural markers for the knowledge of the protohistoric material cultures in Balochistan. Although the archaeometric studies did not allow to identify precisely the overall components and technical processes of the painting (the bad preservation of the pigments often makes difficult the analysis and its interpretation), the results emphasize a significant diffusion of styles and techniques in the Indo-Iranian borderlands from 3500 BC. The diversity of the polychrome painted artefacts in the neighbouring regions during the same period also shows a movement of materials and ideas exchanged on a huge territory. Further investigations will allow to confront several important

production areas and to better understand the development processes of the polychrome painting tradition on a larger scale.

## Acknowledgments

I would like to thank the Fyssen Foundation for its decisive financial support in the development of this research programme, the French archaeological missions in Pakistan (CNRS-UMR 9993 – *Centre de recherche archéologique Indus-Balochistan, Asie centrale et orientale*) and the *Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France* (C2RMF). I am also grateful to the Prof. M. Tosi and his team to have welcomed me in the Department of Archaeology at the University of Bologna (Italy) during my post-doctoral research.

# Organisation territoriale et socio-économique au Néolithique final dans la région du Grand-Pressigny

## Caractérisation des provenances des matériaux céramiques

Rémi MARTINEAU\*, Jean-Jacques MACAIRE\*\*, Isabelle GAY-OVEJERO\*\*, Nicolas BULLIT\*\*, Marie-Angélique RODOT\*, Christian VERJUX\*\*\*, Fabien CONVERTINI\*\*\*\*, Jean BRÉHÉRET\*\*

### Résumé

Dans la région du Grand-Pressigny (Indre-et-Loire, France), une étude pétrographique a été conduite sur 92 échantillons céramiques du Néolithique final provenant des sites du Petit-Paulmy et de Bergeresse (Abilly), respectivement situés dans la vallée de la Claise et de la Creuse. Les analyses ont montré que les sédiments utilisés provenaient majoritairement de sources locales, correspondant aux alluvions de la Claise, de la Creuse, au substrat local et à des limons loessiques. Quantitativement, l'étude a montré que presque tous les matériaux céramiques de Bergeresse et plus de la moitié de ceux du Petit-Paulmy proviennent de la vallée de la Creuse. Les compositions minéralogiques de trois échantillons du Petit-Paulmy, dont un concernant une forme particulière, indiquent des provenances exogènes, du Massif central (alluvions de la Loire ou de l'Allier). Ces résultats montrent l'importance du rôle joué par la vallée de la Creuse dans l'organisation territoriale de la région du Grand-Pressigny. L'étude des céramiques apporte une contribution originale dans le débat sur l'organisation socio-économique de l'exploitation du silex du Grand-Pressigny et devrait permettre de proposer de nouveaux modèles interprétatifs.

### Mots-clés

Néolithique final, Grand-Pressigny, Creuse, Claise, Poterie, Source des matériaux céramiques, Minéraux traceurs, Silex, Cultures néolithiques

## Territorial and socio-economic organisation in Le Grand-Pressigny

### Raw material characterisation and sources of Final Neolithic ceramic

### Abstract

In and around Le Grand-Pressigny (Indre-et-Loire, France), a petrographic study was implemented on 92 ceramic samples from the Final Neolithic sites of Le Petit-Paulmy and Bergeresse (Abilly). Analyses showed that the sediments used were extracted from local sources: Claise and Creuse alluvium, local substrate and loessic silts. Quantitatively, the study showed that almost all the ceramic materials in Bergeresse and more than half of those in Le Petit-Paulmy come from the valley of the Creuse. The mineralogical compositions of three samples from Le Petit-Paulmy, including one of unusual form, indicate sources from an exogenous region, the Massif Central (perhaps the alluvium of the Loire or the Allier). These results show the important role played by the valley of the Creuse in the territorial organisation of Le Grand-Pressigny. This study therefore makes an original contribution to the debate on flint exploitation in this region. These ceramic data are expected to offer new interpretative models concerning the socio-economic organisation of local Neolithic communities.

### Keywords

Late Neolithic, Final Neolithic, Le Grand-Pressigny, Creuse, Claise, Pottery, Ceramic raw-material sources, Petrography, Flint, Neolithic cultures

Dans la région du Grand-Pressigny (Indre-et-Loire, France), des prospections archéologiques pédestres ont mis en évidence des centaines de sites préhistoriques, notamment à partir d'innombrables déchets de taille de silex, résultant de productions à l'échelle quasi-industrielle (Mallet 1992, Alilaire et Thooris 1993, Rancien *et al.* 2004, Marquet et Millet-Richard 2000, Villes 2006a). En effet, dès la fin du quatrième millénaire avant notre ère s'est développée dans cette région une activité de taille spécialisée dans la production de grandes lames, à partir de grandes dalles de silex de très bonne qualité, issues du Turonien supérieur local (Giot *et al.* 1986).

Ces grandes lames mesurent jusqu'à 40 cm de long et ont été produites grâce à des connaissances et des savoir-faire techniques très élaborés (Geslin *et al.* 1975, Kelterborn 1980, Pelegrin 2002, Sestier 2006, Ihuel et Pelegrin 2008), avant d'être transformées en outils multifonctionnels, principalement utilisés pour la coupe de végétaux, notamment pour la récolte des céréales (Plisson *et al.* 2002, Beugnier et Plisson 2004). Ces outils, appelés « poignards », ont été fabriqués à partir de méthodes standardisées pour être diffusés par dizaines de milliers dans toute l'Europe nord-occidentale, au cours du Néolithique récent et final, entre 3100 et 2500 avant J-C. (Mallet 1992, Mallet *et al.* 2008 et 2009, Ihuel 2004, 2008 et 2009).

C'est à partir de ces milliers d'outils exportés et retrouvés dans les sites néolithiques qu'a été élaborée la chronologie des productions de grandes lames en silex du Grand-Pressigny (Mallet 1992, Ihuel et Pelegrin 2008, Ihuel 2008 et 2009). En l'absence de chronologie relative ou absolue dans la zone de production, il s'agit donc d'une chronologie indirecte, basée exclusivement sur les sites récepteurs de ces « poignards ». Les conditions économiques et sociales d'exploitation de ce silex sont également très mal connues. Les habitats et le mode de vie néolithiques de cette région restent entièrement à découvrir. Les cultures archéologiques locales du Néolithique récent et final qui pourraient être à l'origine de l'exploitation du silex, restent entièrement à caractériser. Une hypothèse alternative consiste à penser que des tailleurs de silex itinérants venaient saisonnièrement fabriquer ces grandes lames de silex (Millet-Richard 1997 et 1998, Pelegrin 2002 et 2005). Selon cette hypothèse, ces tailleurs de silex, dotés de très bons niveaux de

savoir-faire, seraient venus d'une autre région et auraient été accueillis par la population locale. Il s'agit sans aucun doute d'un modèle original pour le Néolithique, dont l'organisation socio-économique reposait avant tout sur la sédentarité, même si un modèle semi-sédentaire, lié au pastoralisme, est probablement défendable, par exemple pour les sociétés du Néolithique moyen de la vallée du Rhône (Beeching *et al.* 2000, Beeching 2003).

Dans ce contexte d'exploitation intensive du silex, plusieurs questions archéologiques peuvent être abordées par l'étude de la poterie. Un ou plusieurs groupes culturels a-t-il exploité les affleurements de silex ? Quelle est la chronologie de ces groupes culturels et des exploitations ? S'agissait-il de groupes locaux ou extérieurs à la région du Grand-Pressigny ? A quelle(s) culture(s) appartenaient les producteurs de grandes lames de silex ?

La caractérisation typologique, technologique et pétrographique des poteries de cette région devrait permettre de préciser s'il existe une ou plusieurs traditions céramiques particulières dans la région du Grand-Pressigny, ou si ces productions céramiques s'intègrent dans des traditions culturelles dépassant ce cadre régional. L'étude de toutes les étapes de la chaîne opératoire est alors indispensable pour répondre à ces questions.

La caractérisation des matériaux utilisés pour la fabrication des poteries découvertes dans la région du Grand-Pressigny devrait nous permettre de documenter leur diversité pétrographique et de savoir si leur provenance est locale ou extérieure à la zone de production des grandes lames de silex.

## 1. Présentation géographique, géologique et archéologique de la région du Grand-Pressigny

La région du Grand-Pressigny est caractérisée par des plateaux souvent boisés, d'altitude moyenne variant entre 120 et 140 m et entaillés par plusieurs vallées (Fig. 1). La vallée de la Creuse est la plus importante (près de 2 km de large) ; le chenal de la rivière est incisé de plusieurs mètres dans la plaine alluviale dont l'altitude moyenne est voisine de 55 m. Le bassin versant de la Creuse s'étend sur le nord du Massif central, en amont. La Claise, cours d'eau secondaire (plaine alluviale large de 500 m environ) rejoint la Creuse dans ce secteur. Le plateau qui



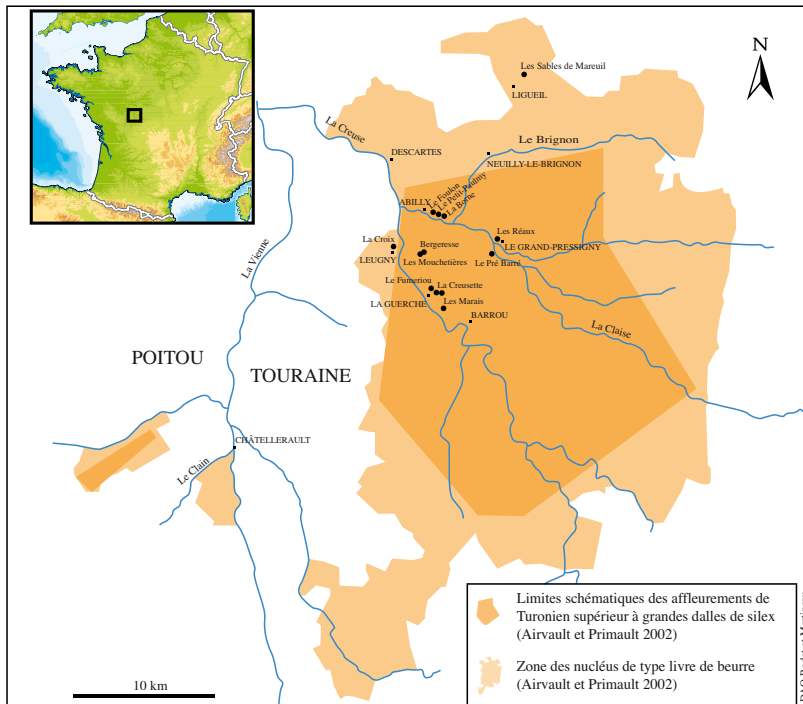


Fig. 1 : Carte de localisation des sites du Néolithique final de la région du Grand-Pressigny ayant livré de la céramique. Les couleurs indiquent l'extension des affleurements du Turonien supérieur à grandes dalles de silex et les communes ayant livré des nucléus de type Livre de beurre (d'après Airvaux et Primault 2002).

les sépare est réduit à 1 ou 2 km entre le Grand-Pressigny et Abilly. La Claise prend sa source en Brenne, région déprimée et humide du sud du Bassin parisien. L'Aigronne et le Brignon sont deux petits affluents de la Claise en rive droite.

Du point de vue géologique, le substrat est constitué de formations sédimentaires marines du Crétacé supérieur et continentales du Tertiaire, à faibles pentages vers le nord-nord-ouest (Médioni *et al.* 1974, Rasplus *et al.* 1978). Les marnes sableuses verdâtres du Cénomaniens (C2) affleurent localement dans les berges de la Creuse (Fig. 1). Elles sont recouvertes par les craies blanches des parties inférieures et moyennes du Turonien et le calcaire sableux jaunâtre à bancs de silex représentant la partie supérieure du Turonien. Le silex a été extrait des formations d'altération du tuffeau constituées d'une argile sableuse renfermant en quantité d'énormes dalles d'excellente qualité, pouvant dépasser un mètre de longueur et 20 cm d'épaisseur (Millet 1985, Giot *et al.* 1986). Ces formations turoniennes (C3) constituent l'essentiel des versants des vallées. Elles sont couvertes par les formations argilo-siliceuses sénoniennes (connues aussi sous le nom d'« argiles à silex ») qui constituent l'assise principale des plateaux. Au Tertiaire, après le retrait de la mer, les cours d'eau

ont déposé à l'Éocène (e) des galets, des sables et des argiles. Ces sédiments ont été fortement altérés sous un climat à tendance tropicale et des croûtes pédologiques siliceuses très dures, appelées « perrons », se sont formées. Ils affleurent de façon discontinue à la surface des plateaux. À la fin de l'Éocène et au début de l'Oligocène, la région se trouvait en bordure méridionale de la vaste dépression lacustre qui occupait le centre de la Touraine, comme en témoignent les calcaires et les marnes affleurant sur le plateau au nord de la vallée de la Claise. Des poches de sables argileux fluviatiles mio-pliocènes, proches du secteur représenté sur la figure 1, peuvent aussi exister localement.

Ce substrat ancien est souvent masqué par les formations superficielles, d'âge quaternaire, qui les recouvrent. Il s'agit principalement d'alluvions fluviatiles, surtout abondantes dans la vallée de la Creuse (Macaire 1981). Les alluvions anciennes (Fv : 22-40 m et Fw : 10-22 m au dessus de la plaine alluviale) sont constituées de sables, graviers et silt-argileux fortement altérés, attribués au Pléistocène inférieur et moyen : elles affleurent sous forme de placages discontinus ou de terrasses parfois continues (Fw dans la vallée de la Creuse) sur les versants. Les alluvions Fx (5-10 m), peu altérées, sont attribuées au Pléistocène supérieur ; elles sont souvent très grossières

res dans la vallée de la Creuse où elles forment l'essentiel de la plaine alluviale non inondable. Elles sont plus fines et constituent une basse terrasse fréquente dans la vallée de la Claise. Les alluvions Fy-z, sableuses à silto-argileuses, comblent la plaine alluviale de la Claise et de ses affluents ou sont emboîtées dans les alluvions Fx à proximité du chenal de la Creuse. Les « limons des plateaux » (LP) sont des sédiments loessiques pouvant contenir une fraction sableuse, d'origine éolienne, mis en place lors des épisodes très froids et secs du Pléistocène supérieur. Ils forment des placages fréquents, mais généralement peu épais (1 m) et discontinus sur les plateaux. Ils ont été alimentés par remaniement éolien des formations géologiques régionales, notamment fluviales. Les colluvions, bien que non représentées sur la carte géologique (Fig. 1) car peu épaisses et très discontinues, sont fréquentes sur les versants des vallées. Leur composition, à dominante sablo-silteuse, varie selon le substrat local et comprend souvent une part remaniée des limons loessiques. Ces colluvions résultent souvent de l'augmentation de l'érosion hydrique liée aux défrichements holocènes. En fond de vallon ces colluvions peuvent être d'âge pléistocène.

La zone de répartition des nucléus et des déchets de taille liés à la production des grandes lames s'étend sur un espace qui recouvre l'aire de répartition du silex de la craie de tuffeau jaune du Turonien supérieur (Fig. 2). Des fouilles d'ateliers de débitage du silex dans la vallée de la Creuse (Geslin *et al.* 1982, Verjux 1991, Fouéré 2002, Verjux *et al.* 2007, 2008, 2009, 2010, Villes 2001, 2002 et 2006b, Millet-Richard 2006), ont montré qu'ils ne sont pas circonscrits à la zone dite des plateaux et concernent aussi bien la vallée de la Creuse que celle de la Claise. Les études technologiques ont permis de reconstituer les chaînes opératoires d'exploitation et de transformation du silex, depuis les affleurements jusqu'aux ateliers et aux dépôts de lames brutes (Geslin *et al.* 1975, Marquet et Millet-Richard 1995, Pelegrin 1997, Fouéré 2002, Airvaux et Primault 2002).

À ce jour, dans la zone des affleurements de silex du Grand-Pressigny, on connaît au moins 12 sites qui ont livré de la céramique (Fig. 2). Au total, le corpus réunit pour le moment 832 individus céramiques appartenant au Néolithique final. Quelques autres sites du Néolithique récent et final sont présents en périphérie de la zone

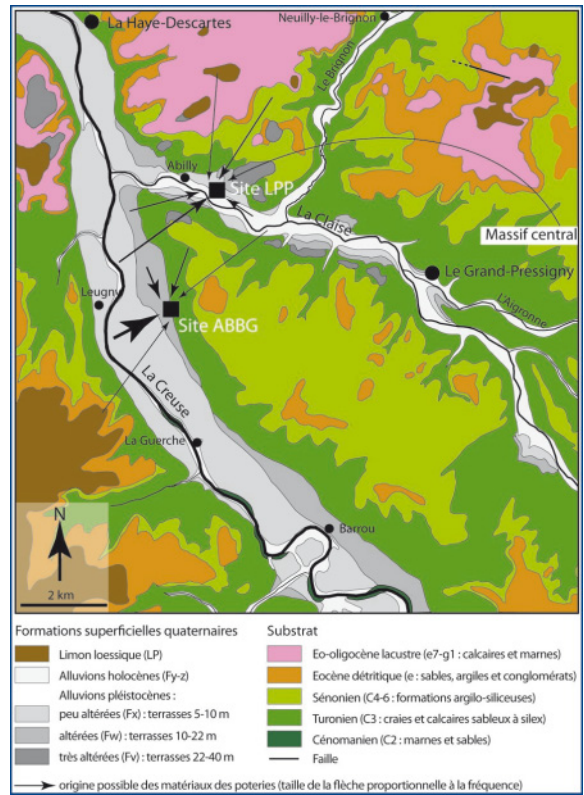


Fig. 2 : Carte géologique de la région du Grand-Pressigny (Indre-et-Loire) et provenances possibles des matériaux céramiques. D'après les cartes à 1/50000<sup>e</sup> de Preuilly-sur-Claise (Rasplus *et al.* 1978) et Châtellerault (Médioni *et al.* 1974).

d'exploitation du silex du Turonien supérieur (Fig. 2), notamment les Sables de Mareuil à Ligueil, avec un corpus équivalent à celui de toute la région du Grand-Pressigny (Villes 1985, 1986 et 2007), et du Carroi-Potet à La Celle-Saint-Avant (Ranger 1998, Leroy 2006, Landreau *et al.* 2008, Landreau et Kildea 2010). À 35 km au nord-ouest du Grand-Pressigny, le site de La Bouchardière/Le Pain Perdu à Monts (Ranger 2002, Rodot 2007) permet également d'intéressantes comparaisons.

## 2. Contextes archéologiques et corpus céramiques

Parmi les 12 sites de la région qui ont livré de la céramique, deux ont pour le moment fait l'objet d'analyses pétrographiques détaillées : Le Petit-Paulmy et Bergeresse, tous deux situés sur la commune d'Abilly (Indre-et-Loire).

Le site du Petit-Paulmy (LPP) est situé sur le versant de la rive droite de la Claise. Le mobilier provient d'un seul niveau archéologique et aucune structure en creux n'était identifiable sur le terrain (Marquet et Millet-Richard 1995, Marquet 1999). Le site a livré 18 600 vestiges lithiques, principalement représentés par des éclats de taille et 310 pièces retouchées (Millet-Richard 1998, Marquet et Millet-Richard à paraître). Parmi quelques centaines de tessons de poterie, assez mal conservés, on compte entre 79 et 110 individus typologiques, selon le mode de calcul (Nombre Minimum d'Individus : NMI ou Nombre Maximum d'Individus : NMAI) (Martineau à paraître a et b). Le corpus est constitué de six formes différentes, à fonds plats ou à fonds ronds, associées à des cuillères et des fusaïoles. Cette céramique a déjà fait l'objet d'une analyse pétrographique qualitative (Convertini à paraître), précisée par cette étude quantitative. La caractérisation typologique et culturelle, ainsi que les dates radiocarbone permettent d'attribuer ce site à la première moitié du 3<sup>e</sup> millénaire et plus probablement entre 2900 et 2700 avant notre ère.

Le site de Bergeresse (ABBG), en cours de fouille, est installé sur le versant de la vallée de la Creuse, en rive droite. 18 amas de débitage, correspondant à la production de grandes lames extraites de nucléus de type livre de beurre, ont été fouillés de 2006 à 2009 sur une surface de 5 000 m<sup>2</sup>. Le mobilier, très abondant, représente au total près de 130 000 restes de taille, pour une masse de 1,8 tonne. À l'exception des grands éclats corticaux d'entame des dalles de silex et de mise en forme initiale des blocs, toutes les étapes de la chaîne opératoire sont présentes (épannelage, délamage, ré-épannelage), ainsi que différentes phases de reprises des nucléus (Verjux *et al.* 2007, 2008 et 2009). Deux amas ont livré un grand nombre d'outils (lames de hache, poignards, scies à encoches, meules...), ainsi que de la céramique. L'amas 2009\_1 comprend 28 tessons typologiques auxquels il faut ajouter 3 tessons de panse pour obtenir le NMAI typologique (Verjux *et al.* 2010). La recherche des attributions au même individu et l'élimination des doublons typologiques (par exemple bords et panses appartenant à la même forme) permettent d'estimer que le nombre minimum d'individus typologiques de l'amas 2009\_1 était de 18. L'amas 2008\_3 a livré 53 individus typologiques représentant entre 44 et 52 individus différents. La céramique

de ces deux amas présente la particularité de posséder des décors, ce qui est tout à fait exceptionnel pour la région à cette époque. L'une des formes décorées est bitronconique avec une légère inflexion sous un col concave ; le fond devait être aplati (Verjux *et al.* 2010). Tous les décors sont des triangles alternés, remplis de hachures obliques senestres, sauf pour un triangle pour lequel elles sont orientées verticalement. L'alternance des triangles crée un décor de chevrons laissés en réserve. L'ensemble est organisé dans une bande horizontale située trois centimètres sous le bord, limitée par deux incisions parallèles qui ont permis la réalisation de triangles isocèles.

Ce corpus est donc très différent de celui du Petit-Paulmy, tant par ses formes, ses moyens de préhension, que par ses décors, mais aussi par certains aspects technologiques liés notamment aux traitements des surfaces qui sont parfois engobées. La datation radiocarbone des poteries du site de Bergeresse, qui pourrait être un peu plus récent que Le Petit-Paulmy, est en cours.

### 3. Méthodologie

#### 3.1. Échantillonnage des tessons

Dans les cas où cela est possible il est grandement préférable d'étudier les matériaux céramiques à partir de poteries typologiques dont la forme et le décor éventuel sont connus, afin de permettre de meilleures interprétations archéologiques. Malheureusement, la forte fragmentation des tessons ou leur faible nombre ne permet pas toujours de réaliser cet échantillonnage dans les meilleures conditions ; il est alors nécessaire de prélever sur des tessons de panse rattachés à des groupes techniques.

Pour ce qui concerne le site du Petit-Paulmy à Abilly, seuls cinq individus céramiques ont pu être échantillonnés à partir de formes (Martineau et Convertini à paraître). Les 32 autres correspondent à des tessons de panse dont les caractéristiques techniques sont identiques à celles des tessons typologiques. Ainsi, 37 échantillons ont été analysés pour un corpus total de 136 individus typologiques.

En ce qui concerne l'amas 2009\_1 du site de Bergeresse à Abilly, 9 échantillons ont été choisis parmi les 28 individus typologiques et 15 autres sélectionnés parmi les tessons de panse. Pour l'amas 2008\_3, 28 des 53 individus typologiques

ont été sélectionnés, auxquels ont été ajoutés 3 échantillons de tessons de panse. Au total, ce sont 55 analyses qui ont été réalisées sur les deux amas de Bergeresse. La présente étude concerne donc un total de 92 échantillons archéologiques.

### 3.2. Identification pétrographique sur lame mince et comptage de points

Les échantillons ont fait l'objet d'analyses pétrographiques en lame mince. Cette méthode, appliquée aux pâtes céramiques, a déjà fait l'objet de nombreuses études de cas. Elle est directement empruntée aux sciences de la Terre et a été décrite à maintes reprises (Courtois 1976, Echallier 1984 et 1987, Rice 1987, Freestone 1995, Barclay 2001). Une « lame mince » (épaisseur 30 µm) a été réalisée dans chaque échantillon de céramique après imprégnation par une résine. Chaque lame mince a été étudiée au microscope optique polarisant. Les inclusions présentes dans la matrice (fragments de roches, minéraux...) ont été déterminées grâce à leur forme, leur texture et leurs caractéristiques optiques selon Roubault (1963). Les échantillons ont fait l'objet d'un comptage par points (au moins 300 points, sauf pour LPP32) selon la méthode de Gazzi-Dickinson (Dickinson 1970, Ingersoll *et al.* 1984), afin d'obtenir la composition modale (en %) des inclusions sur chaque lame mince. La part de la matrice a également été évaluée par la même méthode.

L'analyse quantitative des inclusions céramiques sur lame mince a déjà fait l'objet d'une mise au point méthodologique et de tests (Middleton *et al.* 1985, Freestone 1991), mais la mise en œuvre de ces comptages sur les lames minces de céramiques n'a été réalisée que dans de très rares cas (Schubert 1986). L'important investissement en temps de comptage en est sans doute la cause. Un tel comptage est rendu nécessaire lorsque la seule présence de certains minéraux fréquents n'est pas suffisante pour déterminer l'origine des matériaux. Il est rendu possible à condition que la composition minéralogique quantitative de ces sources soit elle-même connue avec la même précision, ce qui est le cas dans la région du Grand-Pressigny.

## 4. Résultats

Les inclusions représentent 20 à 66 % et 23 à 73 % de la composition modale des lames des séries LPP et ABBG respectivement, la part restante étant la matrice. Celle-ci est généralement phylliteuse, ou plus exceptionnellement de type « silicite », avec spicules de spongiaires siliceux.

Les « inclusions indéterminées » (opaques ou très petites) ont été exclues des calculs ultérieurs : elles représentent, en moyenne, moins de 1,8 % des inclusions pour la série LPP et moins de 1,4 % pour la série ABBG. Ont été observés, selon les lames :

- *des grains monominéraux* : quartz, très souvent dominant (jusqu'à 96,8 % dans LPP et 92,8 % dans ABBG) avec un minimum de 20 % des grains, feldspaths potassiques (0 à 33,2 %), feldspaths plagioclases (0 à 14 %), biotite (jusqu'à 9,8 %), muscovite (jusqu'à 12,1 %), parfois glauconite (jusqu'à 24 %), amphiboles dans environ 2/3 des lames (au plus quelques %, surtout hornblende verte), olivine et pyroxènes (en traces, rares) et grenat plus fréquent. Les minéraux du métamorphisme (andalousite, sillimanite, disthène) et les « ubiquistes résistants » (tourmaline, zircon, sphène) sont épisodiques et très peu abondants (jusqu'à 0,7 %) ;
- *des grains polyminéraux* (fragments de roches) : roches plutoniques (quelques % à 47,5 %, essentiellement granite avec microgranite et exceptionnellement diorite ou gabbro), roches métamorphiques (gneiss, micaschiste et grains séricitisés (maximum 10,9 %), roches volcaniques dans deux échantillons (trachyte, rhyolite et surtout basaltes) et roches sédimentaires siliceuses (silex, opale, calcédoine et fragments de grès : jusqu'à 43 %) ;
- *des bioclastes* (fragments de fossiles siliceux) : spicules de spongiaires essentiellement (jusqu'à 16,8 % des inclusions).

Les observations microscopiques et macroscopiques montrent qu'aucun tesson de ces deux sites ne comprend de chamotte ajoutée à la pâte. Les observations macroscopiques réalisées sur presque tous les sites de la région semblent confirmer ce résultat. Les pâtes céramiques de la région du Grand-Pressigny semblent pouvoir être caractérisées par l'absence d'inclusions ajoutées (dégraissants) et notamment par l'absence de la chamotte, si fréquente dans les corpus de nombreuses cultures contemporaines du Néolithique final, dans la moitié nord de la France.

## 5. Discussion

### 5.1. Origine possible des matériaux utilisés pour la fabrication des poteries

Les interprétations sur l'origine géologique des matériaux utilisés pour la fabrication des

Origines possibles des matériaux	Massif central		Substrat régional	Alluvions de la Claise	Alluvions de la Creuse				Limon loessique			
	avec volcanisme	sans volcanisme			anciennes		récentes					
Echantillons	LPP20	LPP2	LPP6	ABBG14	LPP10	ABBG8	LPP4	ABBG25	LPP1	ABBG4	LPP25	ABBG36
	LPP33		LPP9	ABBG18	LPP12		LPP5	ABBG42	LPP3	ABBG11	LPP27	
			LPP18	ABBG58	LPP14		LPP19	ABBG43	LPP7	ABBG17	LPP28	
			LPP22	ABBG59	LPP15		LPP21	ABBG46	LPP8	ABBG19		
			LPP23		LPP16		LPP26	ABBG48	LPP11	ABBG27		
			LPP24				LPP29	ABBG51	LPP13	ABBG29		
			LPP32					ABBG55	LPP17	ABBG30		
								ABBG56	LPP30	ABBG31		
								ABBG57	LPP31	ABBG32		
								ABBG62	LPP34	ABBG33		
								ABBG63	LPP35	ABBG34		
								ABBG66	LPP36	ABBG35		
								ABBG73	LPP37	ABBG37		
								ABBG74		ABBG38		
										ABBG39		
										ABBG40		
										ABBG41		
										ABBG44		
										ABBG45		
										ABBG47		
										ABBG49		
										ABBG52		
										ABBG53		
									ABBG54			
									ABBG60			
									ABBG64			
									ABBG68			
									ABBG69			
									ABBG70			
									ABBG71			
% de LPP	5	3	19		14		16		35		8	
% de ABBG	-	-	8		2		28		60		2	

Fig. 3 : Répartition des origines possibles des matériaux utilisés pour la fabrication des poteries du Petit-Paulmy et de Bergeresse.

poteries proposées ci-après supposent qu'il n'y a pas eu de mélange volontaire de matériaux différents dans la fabrication de celles-ci. Les interprétations sont présentées sur la figure 3. Quatre groupes d'inclusions peuvent être définis en fonction de leur origine géographique possible. Le premier correspond aux composants issus des roches sédimentaires du substrat local (Traceurs substrat = Tsub). Il comprend les inclusions de roches sédimentaires siliceuses, glauconie et bioclastes. Le second groupe comprend les inclusions caractéristiques des alluvions de la Creuse (Traceurs Creuse = TCr). Ce sont les minéraux absents du substrat local et apportés par la rivière depuis les roches du Massif central situé en partie amont du bassin versant : plagioclases, biotite, amphiboles, grenat, roches plutoniques et métamorphiques (Macaire 1981, 1985). Le troisième groupe correspond aux minéraux d'origine volcanique (Traceurs volcaniques = Tvolc), absents dans le substrat local et le bassin versant de la Creuse : olivine, pyroxènes et roches volcaniques. Le quatrième groupe comprend tous les autres minéraux (Am) qui constituent souvent la majorité des inclusions et peuvent se trouver aussi bien dans le substrat sédimentaire local que dans les alluvions de la Creuse : quartz, felds-

paths potassiques, muscovite, minéraux de métamorphisme et ubiquistes résistants.

Les inclusions du groupe Tvolc, déjà remarquées par F. Convertini (à paraître), n'ont été identifiées que dans deux échantillons : LPP20 (6,1 % de la totalité des inclusions déterminées) et LPP33 (7,3 % des inclusions). Les matériaux constitutifs de ces poteries ont donc une provenance lointaine, probablement les régions volcaniques du Massif central (Fig. 3). L'absence d'inclusions Tsub et le mélange des inclusions Tvolc avec des inclusions de roches plutoniques et métamorphiques dans ces échantillons, pourraient indiquer une source alluviale. Peut-être un cours d'eau du bassin Loire-Allier ?

Le diagramme ternaire Tsub/TCr/Am (Fig. 4) a été construit en excluant les échantillons LPP20 et LPP33 d'origine non locale certaine. Les points situés sur ou proches de l'axe Tsub-Am ne semblent pas pouvoir provenir des alluvions de la Creuse. Les très faibles teneurs (< 2 %) en TCr ont été jugées non significatives, car elles peuvent résulter de la pollution éolienne qui a pu affecter toutes les formations superficielles régionales. Ces échantillons peuvent provenir soit du substrat local, soit de formations superficielles qui en

dérivent, soit des alluvions de la Claise, ces dernières étant marquées par des teneurs fortes en feldspaths potassiques, peu abondants (quelques % maximum) dans les autres formations : la limite arbitraire de 5 % de feldspaths potassiques a permis de séparer les 11 échantillons provenant plus probablement du substrat (formations crétacées ou éocènes plus ou moins altérées ou colluvions qui en sont issues) des 6 issus plus probablement des alluvions de la Claise (Fig. 3). L'échantillon LPP2 situé strictement sur l'axe TCr-Am (Fig. 4), ne contenant donc pas du tout de composants d'origine sédimentaire, comme déjà noté par F. Convertini (à paraître), peut provenir d'une altérite sur granite (type « arène ») dans une région de socle comme le Massif central : cependant l'existence de grains de minéraux et roches métamorphiques associés aux grains de roches plutoniques, et la nécessité d'une phase limono-argileuse suffisante pour la fabrication de poteries, souvent très peu abondante dans les arènes en place (Dejou *et al.*, 1972 et Seddoh *et al.*, 1973), pourraient être l'indice d'arènes remaniées sur un versant ou d'alluvions fluviales. L'échantillon LPP32 paraît aussi particulier. Sa teneur en TCr (5 %) n'est pas représentative car elle correspond à une seule inclusion de biotite comptabilisée dans cet échantillon très pauvre en inclusions sableuses (22 grains comptés seulement). La composition des autres inclusions de type Tsub (dont des spicules de spongiaires abondants) et la nature particulière de la matrice (silicite) rappellent certains niveaux du Sénonien argilo-siliceux de la région (« spongolite » de Paulmy, Rasplus 1979).

Dans tous les autres échantillons, le mélange en proportions variées de Tsub et TCr (> 2 %) indique qu'ils proviennent de sites proches de la vallée de la Creuse : alluvions de la rivière ou formations éoliennes. Dans les alluvions, les teneurs variables en TCr et Tsub relativement à Am peuvent résulter d'apports variables, phénomène classique dans les systèmes fluviaux (Potter 1978, Pettijohn *et al.* 1987). De faibles valeurs de TCr peuvent aussi se trouver dans les alluvions anciennes des terrasses ayant subi une altération météorique prolongée (Macaire 1986) qui affecte en premier lieu les inclusions de roches relativement aux grains monominéraux (Basu 1976, Suttner *et al.* 1981). Elles peuvent aussi correspondre à des dépôts éoliens, souvent alimentés en partie par les alluvions fluviales

dans le sud du Bassin parisien (Macaire 1986). Dans ce cas le brassage par le vent a fragmenté les grains de roches qui se sont dilués dans les grains monominéraux (quartz très résistant notamment ; Bagnold 1941). Cette évolution de la composition des grains par diminution des composants fragiles (grains de roches notamment) relativement aux grains résistants, est nommée « maturité » du sédiment. Le degré de maturité de la fraction TCr, évalué à partir du pourcentage de grains de roches plutoniques et métamorphiques (Rpm) relativement au total des grains TCr, peut permettre une première approche de la distance des matériaux exploités relativement à la Creuse : plus les dépôts sont éloignés du fond de la vallée, moins ils sont riches en Rpm (donc plus leur maturité croît). 35 % des échantillons LPP

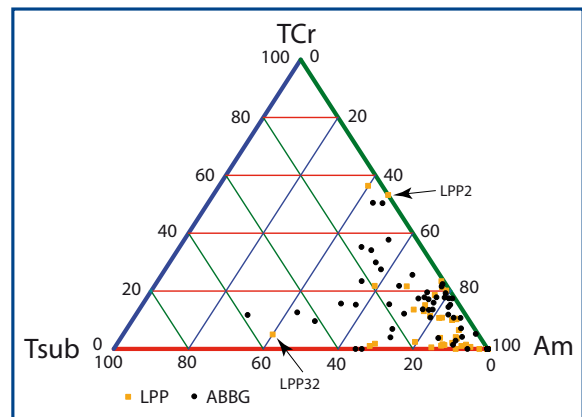


Fig. 4 : Diagramme ternaire TCr/Am/Tsub. TCr : traceurs Creuse (plagioclases, biotite, amphiboles, grenat, roches plutoniques et métamorphiques). Am : autres minéraux. Tsub : traceurs de substrat crétacé et tertiaire (= Rexo : roches sédimentaires siliceuses, glauconie et bioclastes).

(13 sur 37) et 60 % des échantillons ABBG (30 sur 50) présentent une faible maturité minéralogique ( $Rpm/TCr > 50\%$ ) : ils proviennent en majorité des alluvions récentes de la Creuse (Fx à Fz) situées en fond de vallée. Les échantillons qui présentent une maturité minéralogique moyenne ( $5\% < Rpm/TCr < 50\%$ ) représentent 16 % pour LPP (6/37) et 28 % pour ABBG (14/50) : ils pourraient provenir surtout des alluvions des terrasses anciennes de la Creuse (Fv et Fw). Ces valeurs limites de  $Rpm/TCr$  sont arbitraires, mais elles montrent clairement que les poteries du site ABBG ont été plus fréquemment (88 % des tessons étudiés) fabriquées à partir des alluvions de la Creuse, proches, que celles du site

LPP (51 % des tessons). Cependant, les poteries du site LPP ont aussi été fabriquées pour moitié à partir d'alluvions de la Creuse. Les échantillons à forte maturité minéralogique (Rpm/TCr < 5 %), pouvant provenir d'alluvions très anciennes de la Creuse, de sédiments éoliens, ou de colluvions les remaniant, sont peu nombreux : 3 dans la série LPP et 1 dans la série ABBG (Fig. 3).

En résumé, bien que les limites des valeurs chiffrées définies ci-dessus soient parfois arbitraires et à considérer avec précaution, l'analyse minéralogique de la fraction sableuse des tessons fait apparaître une très nette différence entre les sites LPP et ABBG. Dans le site ABBG localisé dans la vallée de la Creuse, la grande majorité des matériaux (88 %) semble issue des alluvions de la Creuse, surtout de la plaine alluviale (alluvions récentes), mais aussi probablement des terrasses alluviales plus anciennes. Les autres sources sont rares : substrat crétacé ou tertiaire local, et peut-être exceptionnellement des alluvions de la Claise et du limon loessique. Dans le site LPP, les matériaux sources des poteries semblent plus diversifiés : 14 % paraissent assez sûrement issus des alluvions de la Claise. 27 % peuvent être d'origine rapprochée (substrat ou limon loessique), mais ces sources peuvent aussi être communes avec ABBG. 59 % des tessons analysés ont cependant été fabriqués avec des matériaux qui ne sont pas issus de la vallée de la Claise : 51 % ont été prélevés dans la vallée de la Creuse et 8 % dans une région plus lointaine alimentée par le Massif central ou dans le Massif central lui-même.

## 5.2. Organisation territoriale et sociale de la région du Grand-Pressigny au Néolithique final

Les analyses des matières premières céramiques ont mis en évidence l'existence d'une production principalement locale des poteries de la région du Grand-Pressigny. Le même résultat a été obtenu pour le site contemporain de La Bouchardière à Monts (Indre-et-Loire), situé à 35 km (Rodot 2007). Au Néolithique final, il n'existe donc pas d'ateliers de production diffusant les poteries à l'échelle régionale. Ces observations sont conformes à la majorité des analyses pétrographiques réalisées jusqu'à présent pour le Néolithique d'Europe occidentale (Hardmeyer *et al.* 1995, Convertini 1996, Rodot et Martineau 2007). La circulation des matériaux ou des pote-

ries dépasse rarement 10 km ; les provenances sont alors considérées comme locales, en référence au modèle ethno-archéologique défini par D. Arnold (2005).

On peut considérer que les sources d'acquisition des matériaux céramiques constituent un des témoins de l'occupation et de la gestion de l'espace au Néolithique. Dans ces conditions, et dans le cadre d'une économie néolithique, il semble raisonnable de penser que les producteurs de poteries réalisées à partir de matériaux locaux résidaient dans un rayon de quelques kilomètres au plus. Ce résultat est extrêmement important pour notre connaissance de l'occupation de la région du Grand-Pressigny au Néolithique final car il atteste que, comme on le soupçonnait déjà fortement, des communautés vivaient sur place pendant les périodes d'exploitation du silex. Ces très fortes présomptions concernant la présence locale de communautés néolithiques dans la région du Grand-Pressigny au troisième millénaire, malgré l'absence d'habitats et de sépultures connus pour le moment, devraient renforcer notre conviction que de tels sites existent, ou tout au moins ont existé.

Des différences sensibles sont observables entre les sites du Petit-Paulmy et de Bergeresse. 96 % des poteries étudiées de Bergeresse ont été fabriquées à partir de sédiments situés dans la vallée de la Creuse. Il s'agit des alluvions récentes ou anciennes de la Creuse pour 88 % du corpus analysé ou du substrat crétacé pur dans 8 % des cas. Ces résultats montrent une occupation centrée sur la vallée de la Creuse et une faible circulation des matières premières céramiques ou des poteries, même si cela ne signifie pas forcément l'absence de circulation des populations. Une poterie (ABBG8) pourrait d'ailleurs provenir de la vallée de la Claise. Ces provenances locales concernent toutes les catégories typologiques du corpus puisque l'échantillonnage a été réalisé en fonction de la diversité des formes et des décors. Il n'existe pas de différences de nature ou de provenance des matériaux céramiques entre les deux amas de taille échantillonnés.

Dans 60 % des cas les potiers ont privilégié les terrasses récentes, ce qui se traduit par une exploitation préférentielle des sédiments proches de la rivière. À Bergeresse, le faciès d'atelier est prépondérant malgré la présence de vestiges domestiques associés (outillage usagé,

meules, céramique et restes fauniques non conservés). Dans la vallée de la Creuse, des vestiges domestiques ont été rencontrés dès les années 70 lors des interventions autour du dépôt de La Creusette à Barrou (Geslin *et al.* 1975 et 1982). L'évaluation réalisée par A. Villes en 2000 a confirmé la présence de céramiques et d'outils en grande quantité (Villes 2001). Le site proche du Fumeriou à La Guerche a livré également des vestiges d'occupation domestique (Villes 2002).

À Bergeresse, l'absence de structures d'habitat (trous de poteau, foyers, bâtiments, enceintes...) ne permet pas d'interpréter facilement le contexte fonctionnel de ces vestiges domestiques. La production locale de céramiques ne signifie pas qu'il s'agit d'un site d'habitat. Soit ces poteries ont été produites par les occupants de ces ateliers de taille du silex pour les repas des tailleurs, soit elles ont été apportées par eux depuis un site proche localisé dans la vallée de la Creuse. Le style des décors de ces céramiques a été comparé au Conguel/Groh-Collé de Bretagne (Verjux *et al.* 2009), ce qui demande à être confirmé (Verjux *et al.* 2010). Si cette attribution culturelle était confirmée, elle montrerait l'existence d'un apport culturel exogène, bien que les poteries soient de fabrication locale. Par ailleurs, la fouille de Bergeresse a montré, d'après Jacques Pelegrin, la co-existence sur les amas de taille de produits issus de maîtres-tailleurs et de productions domestiques de moindre qualité.

Les résultats obtenus pour le Petit-Paulmy dans cette étude précisent les analyses qualitatives précédentes réalisées par F. Convertini (à paraître). Les sources de matière première y sont très diversifiées. La vallée de la Claise et le substrat, dont un échantillon très probable des spongolites de Paulmy, représentent 41 % du corpus étudié. Ces matériaux correspondent à une exploitation « au plus proche », à laquelle s'ajoutent les 51 % provenant de la proche vallée de la Creuse. 92 % des poteries étudiées du Petit-Paulmy sont donc d'origine locale (moins de 10 km) et concernent aussi bien les formes tronconiques que les formes hémisphériques. Dans 35 % des cas les matériaux ont été exploités dans des terrasses récentes, c'est-à-dire à proximité de la rivière. Comme pour le site de Bergeresse, ceci indique que les potiers privilégiaient certainement des sédiments humides prélevés sur les

rives des cours d'eau, afin de faciliter le processus de préparation des pâtes. Trois échantillons (8 %) proviennent du Massif central. L'un d'entre eux correspond à la poterie T192 qui présente une morphologie très particulière, unique parmi le corpus de ce site et sans réelle comparaison régionale (Martineau à paraître a et b). Pétrographiquement, technologiquement et typologiquement, il pourrait s'agir d'une importation depuis les vallées de la Loire ou de l'Allier (Martineau et Convertini à paraître).

Il faut sans doute privilégier l'hypothèse d'un déplacement des poteries, plutôt que celle des matériaux. Néanmoins, la démonstration de cette hypothèse nécessiterait de montrer l'absence d'outils de production de la céramique au Petit-Paulmy et leur présence dans des sites de la vallée de la Creuse. Ces résultats montrent que les occupants du site étaient assez mobiles et qu'ils entretenaient des relations privilégiées avec la vallée voisine de la Creuse. On pourrait supposer que cette vallée était leur lieu d'habitat, mais elle peut tout aussi bien n'avoir été qu'un axe de circulation. Pourtant, dans la vallée de la Claise, le site du Petit-Paulmy et le proche site du Foulon à Abilly, de même que celui des Réaux au Grand-Pressigny, ont toujours été considérés comme des sites d'habitat. L'absence de structures et ces résultats sur les provenances de la céramique incitent à revoir cette hypothèse. Au Petit-Paulmy, d'après L-A. Millet-Richard (1997), le corpus lithique présenterait un faciès mixte constitué à la fois de productions locales et de récupérations ou d'échanges de nucléus Livre de beurre avec les tailleurs de grandes lames. D'après cet auteur, les occupants de cet atelier ne seraient pas des tailleurs de grandes lames.

Il apparaît clairement que la vallée de la Creuse a joué un rôle important en ce qui concerne l'occupation et l'organisation du territoire dans la région du Grand-Pressigny, malgré l'absence de véritables sites d'habitat et funéraires, qui font encore tant défaut pour la connaissance. Ces résultats nous incitent à penser qu'il existe localement des occupations domestiques, et sans doute des habitats pérennes, dans la vallée de la Creuse, dont la large plaine alluviale était particulièrement propice aux implantations de communautés villageoises néolithiques, à proximité des gîtes de matière première. Il reste néanmoins possible que les tailleurs de grandes lames, ou



certains d'entre eux, n'aient pas résidé sur place (hypothèse L-A. Millet-Richard et J. Pelegrin), mais qu'une population locale les ait accueillis. Ainsi, au Petit-Paulmy, le corpus lithique montre la récupération de supports et de nucléus Livre de beurre sur des ateliers de taille, ainsi qu'un niveau de savoir-faire médiocre, ce qui irait à l'encontre de la présence permanente de tailleurs spécialisés (Millet-Richard 1997 et 2006). On ne peut également exclure l'hypothèse d'une occupation saisonnière de cette région ; la vallée de la Creuse aurait été alors avant tout un axe de circulation.

## 6. Perspectives

La caractérisation des pâtes et la détermination de la provenance des matériaux céramiques de nouveaux sites (Les Réaux et Le Pré Barré au Grand-Pressigny, La Borne et Le Foulon à Abilly, Les Sables de Mareuil à Ligueil, Le Carroi-Potet à La Celle-Saint-Avant) sont en cours. Ces études vont permettre de savoir si tous les matériaux utilisés proviennent bien de sources locales et de préciser le rôle de la vallée de la Creuse concernant les sources et l'approvisionnement en matière première.

L'absence de chamotte dans les pâtes céramiques des sites de la région du Grand-Pressigny permet de montrer l'existence d'un groupe technique régional particulier. À l'échelle régionale, et bien que les données demandent encore à être confirmées par des études quantitatives, l'absence de chamotte dans les pâtes céramiques des Loups à Échiré et du Camp Allaric à Aslonnes renforce les observations réalisées dans la région du Grand-Pressigny. Ces sites montrent une différence notable avec ceux de La Bouchardière – Le Pain Perdu à Monts (Indre-et-Loire), des Vaux à Moulins-sur-Céphons (Indre), de Diconche à Saintes (Charente-Maritime), de La Perroche à Dolus (Charente-Maritime) ou encore de La Hersonnais à Pléchâtel (Îlle-et-Vilaine). Ces différences techniques permettent de proposer l'existence d'un groupe régional de matériaux céramiques sans inclusions de chamotte. La question reste de savoir si cette spécificité concerne également d'autres aspects techniques ou typologiques qui permettraient d'identifier un groupe culturel local ou régional. Dans la région du Grand-Pressigny et en périphérie immédiate, une définition typomorphologique et technologique des assemblages céramiques, intégrant tous les

paramètres des chaînes opératoires, associée à des datations radiocarbone, permettrait d'établir un cadre chrono-culturel relatif. Bien évidemment, seuls le croisement et la confrontation de ces données céramiques avec les informations issues des contextes archéologiques, de l'analyse spatiale, de la technologie lithique, des études tracéologiques, etc, permettront de discuter pleinement des problématiques archéologiques et des modèles interprétatifs proposés jusqu'à présent.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier en premier lieu la Fondation Fyssen qui a soutenu ces recherches et permis de franchir cette nouvelle étape dans la connaissance de l'organisation socio-économique et territoriale de la région du Grand-Pressigny à la fin du Néolithique. Nous tenons à remercier chaleureusement les collègues qui nous ont aidés à mener à bien ces travaux, et notamment Stella Weisser, Jean-Claude Marquet, Catherine Louboutin, Laure-Anne Millet-Richard, Audrey Maingaud, Pascal Taubaty et Marie Philippe. Nous remercions aussi vivement la Région Bourgogne qui a financé une partie de la Bourse de docteur ingénieur de M-A. Rodot.

## Bibliographie

- Airvaux J., Primault J., 2002, Considérations sur l'extension géographique du Néolithique final à « livre de beurre » en Touraine et Poitou (France), *L'Anthropologie*, 106, p. 269-294.
- Arnold D. E., 2005, Linking society with the compositional analyses of pottery: a model from comparative ethnography, in : Livingstone Smith A., Bosquet D. et Martineau R. (ed.) : *Pottery manufacturing process: reconstruction and interpretation*. Actes du XIV<sup>e</sup> Congrès de l'Union Internationale des Sciences Préhistorique et Protohistorique (2001, Liège). British Archaeological Reports, International Series. Oxford, tome 1349, p. 15-21.
- Barclay K., 2001, Scientific Analysis of Archaeological Ceramics. A Handbook of Resources, Oxbow Books, Oxford.
- Alcaidé G., Brossé R., Lorenz C., Lorenz J., Rasplus L., avec la collaboration de Pierre G., Obert D., Macaire J.-J., Gigout M., Rampnoux J.-P., Cadet J.-P. et Debrand-Passard S., 1990, Val

de Loire. Anjou, Touraine, Orléanais, Berry. Guides géologiques régionaux, Masson, Paris, 197 p.

- Alilaire P., Thooris C., 1993, Inventaire archéologique des communes d'Abilly, Barrou et Le Grand-Pressigny (Indre-et-Loire), *Bulletin de l'Association des Amis du Musée Préhistorique du Grand-Pressigny*, 44, p. 46-48.

- Bagnold R.-A., 1941, The physics of blown sand and desert dunes. Methuen, London, 265 p.

- Basu A., 1976, Petrology of Holocene fluvial sand derived from plutonic source rocks : implications of paleoclimatic interpretation, *J. Sediment. Petrol.*, 46, p. 694-709.

- Beeching A., 2003, Mobilité et société néolithiques dans les Alpes occidentales et la France méridionale, *Preistoria Alpina*, 39, Museo Tridentino di Scienze Naturali, Trento, p. 175-187.

- Beeching A., Berger J.-F., Brochier J.-L., Ferber F., Helmer D., Sidi Maamar H., 2000, Chasséens : agriculteurs ou éleveurs, sédentaires ou nomades ? Quels types de milieux, d'économies et de sociétés ?, in : Leduc M., Valdeyron N. et Vaquer J. (dir.), Sociétés et espaces, 3<sup>e</sup> Rencontres méridionales de Préhistoire récente, Toulouse, nov. 1998, Archives d'Écologie Préhistorique, Toulouse, p. 59-79.

- Beugnier V., Plisson H., 2004, Les poignards en silex du Grand-Pressigny : fonction de signe et fonctions d'usage, in : Bodu P. et Constantin C. (dir.), *Approches fonctionnelles en préhistoire*, Actes du XXV<sup>e</sup> Congrès Préhistorique de France, 24-26 novembre 2000, Nanterre, Société préhistorique française, p. 139-154.

- Convertini F., 1996, Production et signification de la céramique campaniforme à la fin du 3<sup>e</sup> millénaire avant J.-C. dans le sud et le centre-ouest de la France et en Suisse occidentale, Oxford, (British Archaeological Reports, International Series ; 656).

- Convertini F., à paraître, Étude pétrographique de la céramique du Petit-Paulmy, in : Marquet J.-C. et Millet-Richard L.-A. (dir.), *Le site Néolithique final du Petit-Paulmy à Abilly (Indre-et-Loire)*, Supplément à la Revue Archéologique du Centre.

- Courtois L., 1976, Examen au microscope pétrographique des céramiques archéologiques, Valbonne : CRA/CNRS, (Notes et monographie techniques ; 8).

- Dejou J., Guyot J., Chaumont C., 1972, Évolution superficielle des roches cristallines et cristallophylliennes dans les régions tempérées humides. Pub. INRA, 464 p.

- Dickinson W. R., 1970, Interpreting detrital modes of graywacke and arkose, *Jour. Sed. Petrology*, 37, p. 1031-1044.

- Echallier J.-C., 1984, Éléments de technologie céramique et d'analyse des terres cuites archéologiques, *Documents d'archéologie méridionale*, numéro spécial « Méthodes et techniques » n° 3, p. 4-40.

- Echallier J.-C., 1987, Étude des céramiques, in : Miskovsky J.-C. (ed.), La géologie de la Préhistoire, Géopré.

- Fouéré P., 2002, Val Creuse, La Roche Posay (Vienne), DFS de fouille de sauvetage, INRAP Grand Sud-ouest, Poitiers, Service Régional de l'Archéologie, 106 p., 55 fig.

- Freestone I. C., 1991, Extending ceramic petrology, in : Middleton A. et Freestone I. (eds), Recent Developments in Ceramic Petrology, British Museum Occasional Paper n° 81, Londres, p. 399-410.

- Freestone I. C., 1995, Ceramic Petrography, *American Journal of Archaeology*, 99, p. 111-115.

- Geslin M., Bastien G., Mallet N., 1975, Le dépôt de grandes lames de La Creusette, Barrou, (Indre-et-Loire), *Gallia Préhistoire*, 18, 2, p. 402-422.

- Geslin M., Bastien G., Mallet N., Freslier B., Genty P., 1982, Le petit atelier de taille de la Creusette (commune de Barrou, I.-et-L.), *Bulletin de la Société préhistorique française*, 79, 10-12, p. 399-410.

- Giot D., Mallet N., Millet D., 1986, Les silex de la région du Grand-Pressigny (Indre-et-Loire). Recherche géologique et analyse pétrographique, *Revue Archéologique du Centre de la France*, 25, 1, p. 21-36.

- Hardmeyer B., Maggetti M., Weiss J., 1995, Kapitel 4.9, in : Stöckli W. E., Niffeler U. et Gross-Klee E., *Die Schweiz vom Paläolithikum bis zum frühen Mittelalter, SPM II (Neolithikum)*, Verlag Schweizerische Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte, Basel, p. 174-183 et 349-351.

- Ihuel E., 2004, *La diffusion du silex du Grand-Pressigny dans le Massif armoricain au Néolithique*, Supplément n° 2 au Bulletin de l'association des Amis du Musée du Grand-Pressigny, Collec-

tion Documents préhistoriques n° 18 du Comité des Travaux Historiques et Scientifiques.

- Ihuel E., 2008, De la circulation des lames à la circulation des poignards. Mutations des productions lithiques spécialisées dans l'Ouest de la France du V<sup>e</sup> au III<sup>e</sup> millénaire. Thèse de doctorat, Université de Paris X Nanterre, 2 vol.

- Ihuel E., 2009, De la circulation des lames à la circulation des poignards dans l'ouest de la France entre le V<sup>e</sup> et le III<sup>e</sup> millénaire, *Bulletin des amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 60, p. 45-65.

- Ihuel E., Pelegrin J., 2008, Du Jura au Poitou en passant par le Grand-Pressigny : une méthode de taille et des poignards particuliers vers 3000 av. J.-C., in : Dias-Meirinho M.-H., Léa V., Gernigon K., Fouéré P., Briois F., Bailly M. (éd.), *Les industries lithiques taillées des IV<sup>e</sup> et III<sup>e</sup> millénaires en Europe occidentale*, actes du colloque international de Toulouse, avril 2005, BAR S1884, p. 135-182.

- Ingersoll R. V., Bullard T. F., Ford R., Grimm J. P., Pickle J. D., Sares S. W., 1984, The effect of grain size on detrital modes: a test of Gazzi Dickinson point-counting method. *Jour. Sed. Petrology*, 54, p. 103-116.

- Kelterborn P., 1980, Zur Frage des Livre de beurre, *Jahrbuch der Schweizerischen Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte*, Basel, 63, p. 7-20, 9 fig.

- Landreau C., Couvin F., Creusillet M.-F., Holzem N., Pont-Tricoire C., 2008, La Celle-Saint-Avant « Le Carroi Potet » Tranche 3, 37045018 AP (Indre-et-Loire), rapport de diagnostic, INRAP Centre-Ile-de-France, SRA Centre.

- Landreau C., Kildea F., avec la collaboration de Gosselin R., Liard M., 2010, Des amas de débitage de la fin du Néolithique dans la plaine alluviale de la vallée de la Creuse : le site des Mouchetières à La Guerche (Indre-et-Loire), *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 61, p. 65-78.

- Leroy D., 2006, Archéologie préventive en Indre-et-Loire : quelques résultats concernant la pré- et protohistoire de 2003 à 2005, *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 57, p. 74-79.

- Macaire J.-J., 1977, Étude comparée des minéraux argileux des alluvions de trois rivières du Sud du bassin de Paris : la Creuse, le Cher, la Claise. *Rev. géog. phys. et géol. dyn.*, XIX, 4, p. 339-352.

- Macaire J.-J., 1981, Contribution à l'étude géologique et paléopédologique du Quaternaire dans le Sud-ouest du bassin de Paris (Touraine et ses abords), Thèse de doctorat d'État, Sciences, Université de Tours, 2 tomes, 450 p.

- Macaire J.-J., 1985, Relations entre les altérites formées sur les roches endogènes du Massif central français et les épandages détritiques périphériques, au Cénozoïque récent, *Géologie de la France*, 2, p. 201-212.

- Macaire J.-J., 1986, Apport de l'altération superficielle à la stratigraphie. Exemple des formations alluviales et éoliennes plio-quaternaires de Touraine (France), *Bull. Ass. Fr. Et. Quat.*, 3-4, p. 233-245.

- Mallet N., 1992, Le Grand-Pressigny : ses relations avec la civilisation Saône-Rhône, Supplément au bulletin de la Société des Amis du Musée du Grand-Pressigny, 2 vol.

- Mallet N., Ihuel E., Verjux C., 2008, La diffusion des silex du Grand-Pressigny au sein des groupes culturels des IV<sup>e</sup> et III<sup>e</sup> millénaires avant J.-C., in : Dias-Meirinho M. H., Léa V., Gernigon K., Fouéré P., Briois F., Bailly M. (dir.) : *Les industries lithiques taillées des IV<sup>e</sup> et III<sup>e</sup> millénaires en Europe occidentale*, Colloque international, Toulouse, 2005, BAR S1884, p. 183-205.

- Mallet N., avec la collaboration de Ihuel E., Genty P., Richard G., Delcourt-Vlaeminck M., Verjux C., Weisser S., 2009, La diffusion des silex du Grand-Pressigny au Néolithique récent et final. Nouvel état de l'inventaire et cartographie, *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 60, p. 11-16.

- Marquet J.-C., 1999, La Préhistoire en Touraine, ed. CLD, Chambray.

- Marquet J.-C., Millet-Richard L.-A., 1995, L'habitation-atelier Néolithique final du Petit-Paulmy à Abilly (Indre-et-Loire). Présentation préliminaire, in : *Actes du colloque interrégional sur le Néolithique*, Evreux 1993, Revue Archéologique de l'Ouest, supplément n° 7, p. 247-271.

- Marquet J.-C., Millet-Richard L.-A., 2000, Les sites préhistoriques de la Touraine du sud, éditions Archa.

- Marquet J.-C., Millet-Richard L.-A. (dir.), à paraître, *Le site Néolithique final du Petit-Paulmy à Abilly (Indre-et-Loire)*, Supplément à la Revue Archéologique du Centre.

- Martineau R., à paraître a, Typologie et technologie de la céramique du Petit-Paulmy (Abilly, Indre-et-Loire), in : Marquet J.-C. et Millet-Richard L.-A. (dir.), *Le site Néolithique final du Petit-Paulmy à Abilly (Indre-et-Loire)*, Supplément Revue Archéologique du Centre.
- Martineau R., à paraître b, La céramique du Néolithique final dans la zone des affleurements de silex du Grand-Pressigny, in : Bostyn F., Martial E. et Praud I., *Le Néolithique du Nord de la France dans son contexte européen : habitat et économie aux 4<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> millénaires avant notre ère*, 29<sup>e</sup> colloque Interrégional sur le Néolithique, oct. 2009, Villeneuve d'Ascq.
- Martineau R., Convertini F., à paraître, Croisement des données typologiques et pétrographiques, in : Marquet J.-C. et Millet-Richard L.-A. (dir.), *Le site Néolithique final du Petit-Paulmy à Abilly (Indre-et-Loire)*, Supplément à la Revue Archéologique du Centre.
- Medioni R., Debrand-Passard S., Perna G., Weeksteen M., 1974, Carte géologique de la France à 1/50000. Feuille de Chatellerault, n° 541 et notice, Orléans, éd. Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- Middleton A. P., Freestone I. C., Leese M. N., 1985, Textural analysis of ceramic thin sections: evaluation of grain sampling procedures, *Archaeometry*, 27, 1, p. 64-74.
- Millet D., 1985, Géologie du bassin de la Claise tourangelle, *Les Cahiers de la Claise*, 2, Patrimoine vivant en Claise tourangelle.
- Millet-Richard L.-A., 1997, Habitats et ateliers de taille au Néolithique final dans la région du Grand-Pressigny (Indre-et-Loire). Technologie lithique. Thèse de doctorat de l'Université de Paris I Panthéon-Sorbonne.
- Millet-Richard L.-A., 1998, À la recherche des artisans-tailleurs de « livres de beurre », *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 49, p. 55-65.
- Millet-Richard L.-A., 2006, La production lithique dans la région pressignienne à la fin du Néolithique, in : Vaquer J. et Briois F. (dir.), *La fin de l'Age de Pierre en Europe*, Actes de la table-ronde de l'EHESS, Carcassonne, 2003, Éditions des Archives d'Écologie Préhistorique, Toulouse, p. 57-69.
- Pelegrin J., 1997, Nouvelles observations sur le dépôt de lames de la Creusette (Barrou, Indre-et-Loire), *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 48, p. 19-34.
- Pelegrin J., 2002, La production des grandes lames de silex du Grand-Pressigny, in : J. Guislaine (ed.), *Matériaux, productions, circulations, du Néolithique à l'Âge du bronze*, Paris : Errance, p. 125-141.
- Pelegrin J., 2005, L'extraction du silex au Grand-Pressigny pendant le Néolithique final : proposition d'un modèle, *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 56, p. 67-71.
- Pettijohn F. J., Potter P. E., Siever R., 1987, Sand and sandstone. Springer, 2<sup>e</sup> éd., 553 p.
- Plisson H., Mallet N., Bocquet A., Ramseier D., 2002, Utilisation et rôle des outils en silex du Grand-Pressigny dans les villages de Charavines et de Portalban (Néolithique final), *Bulletin de la Société préhistorique française*, 99, 4, p. 793-811.
- Potter P. E., 1978, Petrology and chemistry of modern big river sands, *Journal of Geology*, 86, p. 423-449.
- Rancien E., Alilaire P., V. Aubourg, 2004, Mise en place d'un SIG dans le cadre des travaux du projet collectif de recherches sur le Grand-Pressigny au Néolithique final, *Bulletin des amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 55, p. 17-24.
- Ranger O., 1998, Un habitat néolithique au « Carroi-Potet-Les Fontenelles », commune de la Celle-Saint-Avant (Indre-et-Loire), *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 49, p. 30-36.
- Ranger O., 2002, Monts « La Bouchardière – Le Pain Perdu », rapport de diagnostic archéologique, INRAP, Orléans, Service Archéologique de la Région Centre.
- Rasplus L., Alcaydé G., Macaire J. J., 1978, Carte géologique de la France à 1/50000. Feuille de Preuilly-sur-Claise, n° 542 et notice, Orléans, éd. Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- Rasplus L., 1979, Données nouvelles sur le Sénonien de Touraine. *Bull. BRGM*, I, 3, p. 197-204.
- Rasplus L., 1982, Contribution à l'étude géologique des formations continentales détritiques tertiaires de la Touraine, de la Brenne et de

la Sologne. *Mémoire de la Société Géologique de Strasbourg*, 66, 227 p.

- Rice P. M., 1987, Pottery analysis. A sourcebook. 2 vol, The University of Chicago Press.

- Rodot M.-A., 2007, Les matériaux céramiques au Néolithique final dans le Centre et le Centre-ouest de la France : natures, provenances et habitudes techniques. Thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne.

- Rodot M.-A., Martineau R., 2007, Les matériaux céramiques, du Néolithique moyen au Néolithique final, du lac de Constance (Suisse) à la vallée de la Saône (France) : marqueurs technoculturels de l'évolution des sociétés, in : Besse M. (dir.), *Sociétés néolithiques. Des faits archéologiques aux fonctionnements socio-économiques*, 27<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique Interneo 27, 1-2 oct. 2005, Neuchâtel, Suisse, Lausanne : *Cahiers d'archéologie romande* 108, p. 227-248.

- Roubault M., 1963, *Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant*. Lamarre-Poirat éd., Paris, 365 p.

- Schubert P., 1986, Petrographic modal analysis. A necessary complement to chemical analysis of ceramic coarse ware, *Archaeometry*, 28, 2, p. 163-178.

- Seddoh F., 1973, Altération des roches cristallines du Morvan (granites, granophyres, rhyolites). Étude minéralogique, géochimique et micromorphologique. Thèse de doctorat d'État, Dijon. Mém. géol. univ. Dijon, Doin, 377 p.

- Sestier C. 2006, Reproduction de nucléus de type « livre de beurre » et du délamage, in : L. Baray (dir.) *Artisanats, Sociétés et Civilisations : hommage à Jean-Paul Thevenot, Actes du colloque de Sens, 2-3 avril 2003*, 24<sup>e</sup> supplément à la Revue Archéologique de l'Est, p. 193-216.

- Suttner L. J., Basu A., Mack G. H., 1981, Climate and the origin of quartz arenites, *J. Sediment. Petrol.*, 51, p. 1235-1246.

- Verjux C., 1991, Fouille de sauvetage sur un atelier de taille du silex du Néolithique final dans la région du Grand-Pressigny (Indre-et-Loire), in : Actes du XV<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique, Châlons-sur-Marne, 22-23 oct. 1988, Voipreux, 1991, p. 173-181, 7 fig.

- Verjux C., Millet-Richard L.-A., Weisser S., Leroy D., 2007, Ateliers de taille du silex du Néolithique final à Abilly « Bergeresse » (Indre-

et-Loire) – résultats de la campagne de fouilles 2006, *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 58, p. 31-53.

- Verjux C., Millet-Richard L.-A., Weisser S., Linton J., Leroy D., 2008, Deuxième campagne de fouilles sur les ateliers de taille du silex du Néolithique final à Abilly « Bergeresse » (Indre-et-Loire), *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 59, p. 39-64.

- Verjux C., Weisser S., Rodot M.-A., Leroy D., 2009, Découverte de vestiges domestiques en contexte d'ateliers de taille du silex du Néolithique final à Abilly « Bergeresse » (Indre-et-Loire), *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 60, p. 17-44.

- Verjux C., Weisser S., Martineau R., 2010, Ateliers de taille du silex du Néolithique final à Abilly « Bergeresse » (Indre-et-Loire). Résultats de la quatrième campagne de fouilles (2009), *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 61, p. 37-63.

- Villes A., 1985, Les récentes découvertes céramiques du Néolithique à Ligueil (Indre-et-Loire) et leur intérêt. 2<sup>e</sup> partie : le Néolithique final, *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 36, p. 10-16.

- Villes A., 1986, Deux implantations septentrionales de la civilisation d'Artenac : Ligueil (Indre-et-Loire) et Fort-Harrouard II (Eure-et-Loir), *Revue Archéologique de l'Ouest, supplément 1*, p. 217-236.

- Villes A., 2001, Résultats de la fouille d'évaluation du site de « La Creusette » à Barrou (Indre-et-Loire). Première partie : la céramique, *Bulletin des Amis du Musée de Préhistoire du Grand-Pressigny*, 52, p. 47-67.

- Villes A., 2001, *Résultats de la fouille d'évaluation du site de « La Creusette » à Barrou (Indre-et-Loire)*, Rapport de fouilles, Service régional de l'Archéologie de la Région Centre, multigraphié.

- Villes A., 2002, *La Guerche – « Fumeriou » (Indre-et-Loire)*, Rapport de sondages, Service régional de l'Archéologie de la Région Centre, multigraphié.

- Villes A., 2006a, La question de l'attribution chrono-culturelle des sites du Néolithique récent et final de la région du Grand-Pressigny (Indre-et-Loire), in : Baray L. (dir.), *Artisanats, sociétés et civilisations : hommage à Jean-Paul Thevenot*,

24<sup>e</sup> supplément à la Revue Archéologique de l'Est, S.A.E., p. 217-249.

- Villes A., 2006b, Évaluations archéologiques sur le complexe néolithique du Grand-Pressigny : le site de Barrou « La Creusette » (Indre-et-Loire). Résultats préliminaires du diagnostic réalisé en 2000, in : Duhamel P. (dir.), *Impacts interculturels au Néolithique moyen. Du terroir au territoire : sociétés et espaces*, 25<sup>e</sup> supplément à la Revue Archéologique de l'Est, S.A.E., p. 353-382.

- Villes A., 2007, La céramique du Néolithique final à Ligueil « Les Sables de Mareuil » (Indre-et-Loire), in : Agogué O., Leroy D. et Verjux C. (dir.), *Camps, enceintes et structures d'habitat néolithiques en France septentrionale*, 24<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique, Orléans, 19-21 novembre 1999, 27<sup>e</sup> supplément à la Revue archéologique du Centre de la France, Tours, FERACF, p. 271-292.

In and around Le Grand-Pressigny (Indre-et-Loire, France), archaeological prospection by field walking has highlighted hundreds of prehistoric sites, especially represented by flint flakes, indicating production on a quasi-industrial scale (Mallet 1992, Alilaire and Thooris 1993, Rancien *et al.* 2004, Marquet and Millet-Richard 2000, Villes 2006a). Large slabs of high-quality flint from the local Upper Turonian (Giot *et al.* 1986) were used, between the late fourth millennium and nearly 2200 cal. BC, in the development of a specialised craft of long-blades.

These long-blades are up to 40 cm in length and provide evidence of technical knowledge and sophisticated skill (Geslin *et al.* 1975, Kelterborn 1980, Pelegrin 2002, Sestier 2006, Ihuel and Pelegrin 2008). This standardised method produced multifunctional tools, mainly used for cutting plants, especially for grain harvesting (Plisson *et al.* 2002, Beugnier and Plisson 2004). These tools, called “daggers”, were distributed in tens of thousands across north-western Europe during the Late and Final Neolithic, between 3100 and 2500 cal. BC. (Mallet 1992, Mallet *et al.* 2008 and 2009, Ihuel 2004, 2008 and 2009).

The chronology of long-blade production in Le Grand-Pressigny has been established by studying thousands of exported tools, discovered in Neolithic sites (Mallet 1992, Ihuel and Pelegrin 2008, Ihuel 2008 and 2009). But no relative or absolute chronology exists in the production

area. Chronology is exclusively based on the receptor sites of these “daggers”. The social and economic conditions of flint exploitation are very poorly known. Dwelling sites and the Neolithic way of life in this region are yet to be discovered. It seems that several local archaeological cultural groups of the Late and Final Neolithic exploited this flint, but it will be necessary to characterise them precisely. An alternative hypothesis could be that mobile flint-knappers produced these long-blades seasonally (Millet-Richard 1997 and 1998, Pelegrin 2002 and 2005). According to this hypothesis, these flint-knappers, with very good levels of skill, may have come from another region and been welcomed by the local population. This is undoubtedly an original model for the Neolithic because at that time, socio-economic organisation was based above all on sedentarity. Nevertheless, a semi-sedentary model including pastoral activity is probably arguable in some cases, for example in societies of the Middle Neolithic from the Rhône Valley (Beeching *et al.* 2000, Beeching 2003).

In this context of intensive exploitation of flint, many archaeological questions can be addressed by the study of pottery. Did one or more cultural groups exploit the flint outcrops? What is the chronology of these groups? Where did the flint-knappers live? Which cultural group did the long-blade flint-knappers belong to?

The typological, technological and petrographical characterisation of pottery should clarify whether there was more than one specific ceramic tradition in the region of Le Grand-Pressigny, or if the ceramics come from beyond the regional framework. The study of all stages of the *chaîne opératoire* will be necessary in order to answer these questions. Characterisation of the raw materials used in the manufacture of pottery from Le Grand-Pressigny should allow us to document petrographical diversity and origin, whether local or exogenous.

### **1. Geographical, geological and archaeological contexts of Le Grand-Pressigny**

The region of Le Grand-Pressigny is characterised by plateaus, with an average altitude ranging between 120 and 140 m, incised by several valleys (Fig. 1). The Creuse valley is the largest (about 2 km wide); the river channel is incised several meters into the floodplain with an ave-

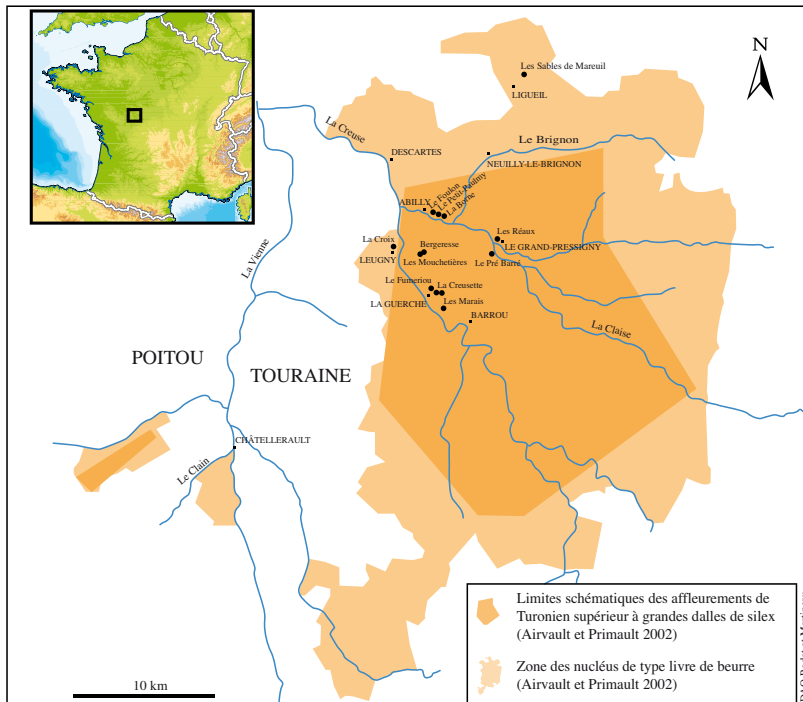


Fig. 1: Location map of the Grand-Pressigny area showing Late and Final Neolithic sites where ceramics have been discovered. The flint outcrops of the Upper Turonian and the area with nucleus *livre de beurre* are also shown (after Airvaux and Primault 2002).

rage altitude of approximately 55 m. The Creuse catchment basin begins upstream in the north of the Massif Central. The Claise, a tributary with an alluvial plain about 500 m wide, joins the Creuse in this sector. The plateau between them shrinks to 1 or 2 km between Le Grand-Pressigny and Abilly. The Claise rises in Brenne, a low-lying humid region in the southern Paris Basin. The Aigron and Brignon are two small tributaries on the right bank of the Claise.

From the geological point of view, the substrate is composed of sedimentary marine Cretaceous and continental Tertiary formations, with low dips to the north-northwest (Médioni *et al.* 1974, Rasplus *et al.* 1978). Some outcrops of green sandy marls of the Cenomanian (C2) are observable on the banks of the Creuse (Fig. 1). They are covered by the white chalk of the Lower and Middle Turonian and by the yellow sandy limestone containing flint layers of the Upper Turonian. The flint was extracted from the eroded limestone formations, which contain a huge quantity of high quality slabs, sometimes exceeding one metre in length and 20 cm in thickness (Millet 1985, Giot *et al.* 1986). The valley sides are formed of sediments which are mostly Turonian (C3). They are covered by Senonian clayey-sili-

ceous formations (also known as “flint clay”). During the Eocene (e), after the withdrawal of the sea, the rivers deposited pebbles, sands and clays. These sediments were strongly eroded in a near tropical climate and hard, siliceous soil crusts formed. They crop out intermittently on the surface of the plateaus. At the end of the Eocene and early Oligocene, the region was the southern edge of a vast depression lake that occupied the centre of Touraine, as evidenced by the limestone and marl outcrops on the plateau in the north of the Claise valley. Pockets of Mio-Pliocene fluvial sandy clay, near the area represented in Figure 1, may also exist locally. The former substrate is often masked by superficial Quaternary age formations. It is primarily river alluvium, especially abundant in the Creuse valley (Macaire 1981). The Lower and Middle Pleistocene alluvium (Fv: 22-40 m Fw: 10-22 m above the alluvial plain) is composed of sand, gravel and greatly weathered clayey silts, exposed as discontinuous veneers or terraces, sometimes continuous on the slopes (Fw in the Creuse valley). Upper Pleistocene slightly eroded alluvial deposits (Fx, 5-10 m), are often very coarse in the Creuse valley, where they form the bulk of the non-flooded alluvial plain. They are thinner and often form a low terrace in the Claise valley. The

Fy-z alluvium, sandy to silty-clay, fills the flood plain of the Claise and its tributaries, nested in the Fx alluvium near the Creuse channel. The “plateau silts” (LP) are loessic sediments which may contain a sandy fraction, of aeolian origin, deposited during very cold and dry episodes in the Late Pleistocene. They frequently form veneers, which are generally thin (1 m) and discontinuous on the plateaus. They were powered by wind reworking of the regional geological formations, notably alluvium. Colluvium, although not shown on the geological map (Fig. 1) as it is discontinuous and not very thick, is common on the valley slopes. These deposits are mainly sandy-silty, varying with the substrate and often including reworked loess silt. This colluvium often results from the increased hydric erosion due to forest clearing during the Holocene. At the bottom of the valley this colluvium may be dated from the Pleistocene.

The production of long-blades and daggers covers a period of at least eight centuries, which can be divided into two main phases: the Late Neolithic (3200-3000 cal. BC) and the Final Neolithic (3000-2400 cal. BC). The distribution of nuclei and flakes resulting from long-blade production extends over the Upper Turonian flint outcrops of Le Grand-Pressigny (Fig. 2). Excavations of flint-knapping workshops in the valley of the Creuse (Geslin *et al.* 1982, Verjux 1991, Fouéré 2002, Verjux *et al.* 2007, 2008, 2009, 2010, Villes 2001, 2002 and 2006b, Millet-Richard 2006) have shown that they were located on the plateaus as well as in the Claise and Creuse valleys. Technological studies have reconstructed the *chaînes opératoires* of exploitation and processing of flint, from the outcrops to the workshops and long-blade hoards (Geslin *et al.* 1975, Marquet and Millet-Richard 1995, Pelegrin 1997, Fouéré 2002, Airvaux and Primault 2002).

To date, pottery has been discovered in at least twelve sites near the flint outcrops (Fig. 2). The corpus comprises 832 vessels from the Late and Final Neolithic. Some other sites, notably “Les Sables de Mareuil” in Ligueil (Villes 1985, 1986 and 2007), “Le Carroi-Potet” in La Celle-Saint-Avant (Ranger 1998, Leroy 2006, Landreau *et al.* 2008, Landreau and Kildea 2010) (Fig. 2), are located just beyond the flint outcrops. The site of La Bouchardière/Le Pain Perdu in Monts

(Ranger 2002, Rodot 2007), 35 km northwest of Le Grand-Pressigny, also provides interesting comparisons.

## 2. Archaeological contexts and ceramic corpus

Ceramics from two of the twelve sites (Le Petit-Paulmy and Bergeresse, in Abilly) have been petrographically analysed. Le Petit-Paulmy (LPP) is located on the side of the right bank of the Claise. The pottery corpus comes from a single archaeological level and no hollow structures were detected in the site (Marquet and Millet-Richard 1995, Marquet 1999). Around 18,600 lithic remains were discovered, with a majority of flakes and 310 resharpened tools (Millet-Richard 1998, Marquet and Millet-Richard forthcoming). The number of vessels identified, among the hundreds of poorly preserved pottery sherds, varies from 79 (Minimum

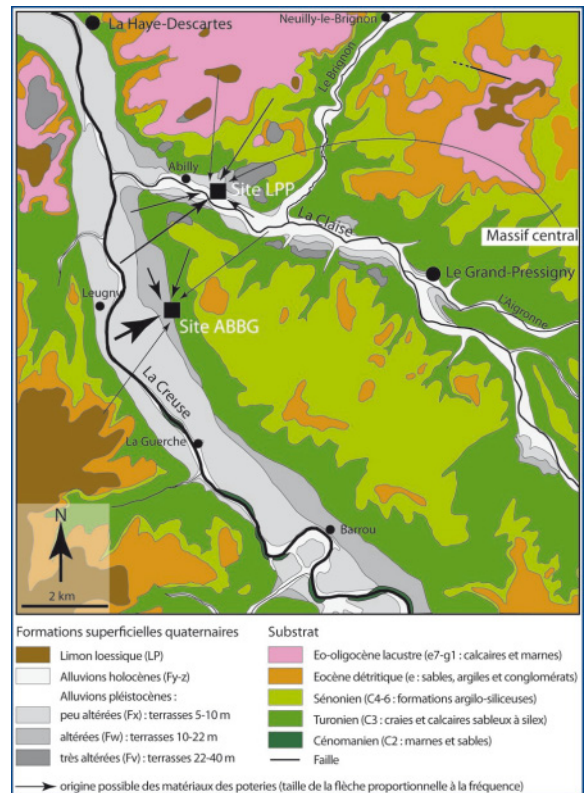


Fig. 2: Geological map of the Grand-Pressigny area (Indre-et-Loire) and possible sources of ceramic raw materials. Based on the 1/50000 map of Preuilly-sur-Claise (Rasplus *et al.* 1978) and Châtelleraut (Médioni *et al.* 1974).



Number of Vessels: MNV) to 110 (Maximum Number of Vessels: MANV), depending on the method of calculation used (Martineau 2011 and in press). The corpus is composed of six different shapes with round or flat bottoms, associated with spoons and spindle whorls. An initial qualitative analysis (Convertini in press) is completed by this quantitative study. The cultural and typological characterisation and radiocarbon dating indicate that this site is from the first half of the third millennium, most probably between 2900 and 2700 cal. BC.

The Bergeresse site (ABBG) is located on the right side of the Creuse valley. So far, 18 clusters of debitage, corresponding to the nucleus *livre de beurre* long-blade production, have been discovered over an area of 5,000 m<sup>2</sup>. The corpus of lithic remains is composed of 200,000 objects, weighing 2 tonnes. All the steps of the *chaîne opératoire* of the *livre de beurre* method (core pre-shaping, blade detachment phase, core re-shaping) and the different phases of nucleus recycling have been identified in the corpus, apart from the large cortical flakes from the flint paving stone, corresponding to the initial debitage (Verjux *et al.* 2007, 2008 and 2009). Two clusters have yielded tools (axes, daggers, wheels and slotted side-scrapers – a typical French Final Neolithic tool) and ceramics. Cluster 2009\_1 contains between 18 (MNV) and 31 (MANV) vessels (Verjux *et al.* 2010). Cluster 2008\_3 contains between 44 (MNV) and 52 (MANV) vessels. Some vessels in this corpus present decorations, which are exceptional for this period in this region. A decorated bitronconic pot has a concave wide neck and a flat bottom (Verjux *et al.* 2010). All the decorations are of alternating triangles, filled with leftward incised hatching, except in one triangle where they are vertically oriented. Alternating triangles create a zig-zag pattern. The decoration is organised in an horizontal strip three centimeters below the edge, bounded by two parallel incisions facilitating the creation of isosceles triangles. By its forms, lugs, decors and some technological aspects (notably surface treatments: presence of slip), this corpus is very different from that of Le Petit-Paulmy. The radiocarbon dating of several samples extracted from Bergeresse pottery is underway. The site seems to be slightly more recent than Le Petit-Paulmy.

### 3. Methodology

#### 3.1. Sampling of sherds

In cases where this is possible, for better archaeological interpretations, it is preferable to analyse raw-material sources on typologically characterised vessels. Unfortunately, the high fragmentation and the small number of sherds do not always allow this sampling to take place in the best conditions. It is also necessary to sample on body sherds. For Le Petit-Paulmy site, only 5 morphological pots were sampled (Martineau and Convertini in press). The remaining 32 samples correspond to body sherds whose technical characteristics are identical to the typological sherds. Thus, among 136 typological vessels, 37 samples from Le Petit-Paulmy were petrographically analysed. Concerning cluster 2009\_1 of Bergeresse, 9 samples were selected from 28 vessels and 15 others selected from the body sherds. For cluster 2008\_3, with 53 typological vessels, 18 were sampled from typology, with 8 samples from body sherds. In total, 50 analyses were performed on the two Bergeresse clusters. This study therefore relates to a total of 87 archaeological samples.

#### 3.2. Petrographic analysis and point-counting

The samples were petrographically analysed in thin section. This method, applied to pottery, has already been the subject of numerous case studies. Originally the method was used in the earth sciences and has often been described (Courtois 1976, Echallier 1984 and 1987, Rice 1987, Freestone 1995, Barclay 2001). A thin section (thickness 30 microns) was taken from each sample after impregnation with a resin. Each thin section was examined under an optical polarising microscope. The inclusions present in the matrix (rock fragments, minerals etc.) were determined by their shape, texture and optical characteristics, following Roubault (1963). The samples were counted by points (at least 300 points, except for LPP32) using the Gazzi-Dickinson method (Dickinson 1970, Ingersoll *et al.* 1984), to obtain the modal composition (in %) of inclusions on each thin section. The percentage of the matrix was also evaluated by the same method.

Quantitative analysis of inclusions in ceramic thin section has already been the subject of methodological development and testing (Middleton *et al.* 1985, Freestone 1991), but the imple-

Origines possibles des matériaux	Massif central		Substrat régional	Alluvions de la Claise		Alluvions de la Creuse				Limon loessique		
	avec volcanisme	sans volcanisme				anciennes		récentes				
Echantillons	LPP20	LPP2	LPP6	ABBG14	LPP10	ABBG8	LPP4	ABBG25	LPP1	ABBG4	LPP25	ABBG36
	LPP33		LPP9	ABBG18	LPP12		LPP5	ABBG42	LPP3	ABBG11	LPP27	
			LPP18	ABBG58	LPP14		LPP19	ABBG43	LPP7	ABBG17	LPP28	
			LPP22	ABBG59	LPP15		LPP21	ABBG46	LPP8	ABBG19		
			LPP23		LPP16		LPP26	ABBG48	LPP11	ABBG27		
			LPP24				LPP29	ABBG51	LPP13	ABBG29		
			LPP32					ABBG55	LPP17	ABBG30		
								ABBG56	LPP30	ABBG31		
								ABBG57	LPP31	ABBG32		
								ABBG62	LPP34	ABBG33		
								ABBG63	LPP35	ABBG34		
								ABBG66	LPP36	ABBG35		
								ABBG73	LPP37	ABBG37		
								ABBG74		ABBG38		
										ABBG39		
										ABBG40		
										ABBG41		
										ABBG44		
										ABBG45		
										ABBG47		
									ABBG49			
									ABBG52			
									ABBG53			
									ABBG54			
									ABBG60			
									ABBG64			
									ABBG68			
									ABBG69			
									ABBG70			
									ABBG71			
% de LPP	5	3	19		14		16		35		8	
% de ABBG	-	-	8		2		28		60		2	

Fig. 3: Possible sources of raw materials used for pottery-making in Le Petit-Paulmy and Bergeresse.

mentation of these counts on thin sections of ceramics has only been performed in very rare cases (Schubert 1986). The significant investment of time required for counting is probably one of the reasons. Such a count is made necessary when the mere presence of certain minerals is not frequent enough to determine the origin of the raw materials. The method is efficient only if the mineralogical composition of the sources is extremely well known, which is the case in Le Grand-Pressigny.

#### 4. Results

The inclusions are 20 to 66 % and 23 to 73 % of the modal composition of samples LPP and ABBG series, respectively. The remainder is the matrix, which is generally composed of phyllites, or more rarely of “silicite” with siliceous sponge spicules. The “indeterminate inclusions” (opaque or very small) were excluded from subsequent calculations: they represent, on average, less than 1.8 % of the inclusions in the LPP corpus and less than 1.4 % for the ABBG series. Three types of inclusions were observed:

- Monomineralic grains: quartz, often dominant (up to 96.8 % in LPP and up to 92.8 % in ABBG)

with a minimum of 20 % of the grains, K-feldspar (0 to 33.2 %), plagioclase feldspar (0 to 14 %), biotite (up to 9.8 %), muscovite (up to 12.1 %), some glauconite (up to 24 %), amphiboles in about 2/3 of the samples (a few grains, mainly green hornblende), pyroxene and olivine (rare traces) and garnet (more frequently). Metamorphic (andalusite, sillimanite, kyanite) and “ubiquitous resistant” (tourmaline, zircon, sphene) minerals are episodic and in very low abundance (up to 0.7 %).

- Polymineral grains (rock fragments), igneous rocks (a few % to 47.5 %, mainly granite with microgranite and exceptionally diorite or gabbro), metamorphic rocks (gneiss, mica schist and sericitised grains (maximum 10.9 %), volcanic rocks in 2 samples (trachyte, rhyolite and mainly basalt) and siliceous sedimentary rocks (chert, opal, chalcedony and fragments of sandstone up to 43 %).
- Bioclasts (fragments of siliceous fossils): sponge spicules mainly (up to 16.8 % of the inclusions).

Microscopic and macroscopic observations show that no sherds from these two sites contain grog added to the paste. Macroscopic

observations on almost all pottery from the region seem to confirm this result. The ceramic pastes of Le Grand-Pressigny seem to be characterised by the absence of added inclusions (temper), and notably the lack of grog, so frequent in the corpus of many contemporary cultures of the Final Neolithic in the northern half of France.

## 5. Discussion

### 5.1. Possible sources of the raw materials used for pottery making

Interpretations of the geological origins of the raw materials used for pottery making and proposed below assume that there was no deliberate mixing of different materials. Four groups of inclusions can be defined according to their possible geographical origin. The first corresponds to components of sedimentary rocks from the local substrate (substrate tracers = Tsub). It contains inclusions of siliceous sedimentary rocks, bioclasts and glauconite. The second group includes the characteristic inclusions of the Creuse alluvium (Creuse tracers = TCr). Transported by the river from the Massif Central bedrock, these minerals (plagioclases, biotite, amphiboles, garnet, plutonic and metamorphic rocks) are not present in the local substrate (Macaire 1981, 1985) (Fig. 3). The third group corresponds to minerals of volcanic origin (volcanic tracers = Tvolc), absent in the substrate and in the local catchment basin of the Creuse: olivine, pyroxene and volcanic rocks. The fourth group includes all other minerals (Am), which are often the majority of inclusions and can be found both in the local sedimentary substrate and in the alluvium of the Creuse: quartz, potassic feldspars, muscovite, metamorphic and resistant ubiquitous minerals.

Inclusions of Tvolc group, already noticed by F. Convertini (in press), were identified in two samples: LPP20 (6.1 % of all inclusions determined) and LPP33 (7.3 % of inclusions). The raw materials of these pots come from a distance, therefore probably the volcanic regions of the Massif Central (Fig. 4). The absence of Tsub inclusions and the blending of Tvolc inclusions with plutonic and metamorphic rocks in these samples, could indicate an alluvial source in the Loire-Allier catchment basin.

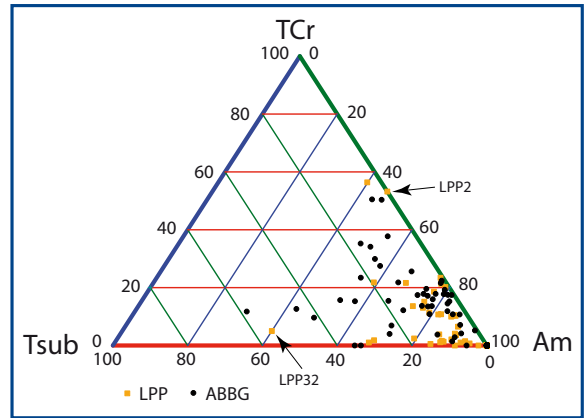


Fig. 4: Ternary diagram TCr/Am/Tsub. TCr: minerals characteristic of the Creuse (plagioclases, biotite, amphiboles, garnet, plutonic and metamorphic rocks). Am: other minerals. Tsub: minerals characteristic of the Cretaceous and Tertiary substrate (= Rexo: siliceous sedimentary rocks, glauconite and bioclasts).

The ternary diagram Tsub/TCr/Am (Fig. 5) includes the exogenous samples LPP20 and LPP33. The points situated on or near the Tsub-Am axis seem not to be from the Creuse alluvium. The very few values (< 2 %) in TCr have been judged non-significant because they may result from the aeolian pollution affecting all the regional and superficial formations. These samples may come from the local substrate, from superficial formations or from the Claise alluvium. This alluvium is characterised by high values in potassic feldspars, which are far less frequent in the other formations. The arbitrary limit of 5 % of potassic feldspars separates 11 samples, which are more probably substrate, from 6 samples of Claise alluvium. As already noticed by Convertini (in press), sample LPP2, placed on the TCr-Am axis (Fig. 5), contains no sedimentary components. This sample may be a granitic arenite from a crystalline area of the Massif Central. Nevertheless, as arenite is low in the silty-clayey fraction required for pottery making, (Dejou *et al.* 1972, Seddoh 1973), the presence of metamorphic minerals and rock inclusions associated with plutonic rock fragments could indicate the use of alluvium or arenite in a secondary position on river banks. The TCr value of 5 % in LPP 32 is not representative because it corresponds to a single inclusion of biotite in a sample comprising only 22 sandy inclusions. The composition of Tsub inclusions (like sponge spicules) and the

particular nature of the matrix (silicite) might correspond to some levels of the clayey siliceous Senonian of this region ("spongolite" of Paulmy, Rasplus 1979) (Fig. 1).

In all other samples, the mixing in various proportions of Tsub and TCr ( $> 2\%$ ) indicates that they come from sources close to the Creuse valley: alluvium or aeolian formations. In the alluvium, the variable contents of TCr and Tsub, with respect to Am, may result from different origins, a classic phenomenon in river systems (Potter 1978, Pettijohn *et al.* 1987). Low TCr values can also be found in the ancient alluvial terraces which have undergone prolonged weathering (Macaire 1986). This process primarily affects rock inclusions with respect to monomineralic grains (Basu 1976, Suttner *et al.* 1981). But these low values of TCr may also correspond to aeolian deposits, often fueled in part by alluvium in the southern Paris Basin (Macaire 1986). In this case, weathering has produced rock grains, which are mixed with the more abundant monomineralic grains (notably quartz, which is very resistant) (Bagnold 1941). This changing mineral composition with the decrease of fragile inclusions (rock minerals in particular) related to grain resistance, is called sediment "maturity". The maturity of the TCr fraction, evaluated from the percentage of grains of plutonic and metamorphic rocks (Rpm) in relation to the total TCr grains, may indicate the distance of the raw-material sources from the Creuse River. The further the deposits are from the valley floor, the less rich they are in Rpm and the more their maturity increases. Around 35 % of the LPP samples (13 of 37) and 60 % of the ABBG samples (30 of 50) are of low mineralogical maturity (Rpm/TCr  $> 50\%$ ). They come mainly from the recent alluvium of the Creuse (Fx to Fz) (Fig. 6). Samples of average mineralogical maturity ( $5\% < \text{Rpm/TCr} < 50\%$ ) make up 16 % of the LPP samples (6/37) and 28 % of the ABBG samples (14/50). They may come mainly from the alluvium of the old terraces of the Creuse (Fv and Fw). These limits for the Rpm/TCr values are arbitrary, but they clearly show that the ABBG pots were more frequently (88 % of ceramics studied) made with the Creuse alluvium, close to the site, than the LPP pots (51 % of samples). Nevertheless, half of the LPP pots were produced using alluvial deposits from the Creuse. Rare samples (3 in the LPP site and 1 in the ABBG)

have high mineralogical maturity (Rpm/TCr  $< 5\%$ ) and may come from very old alluvium of the Creuse, from aeolian sediments, or from colluvium in a secondary position (Fig. 6).

In the ABBG site, located in the Creuse valley, the large majority of raw materials (88 %) may come from the Creuse alluvium, notably from the alluvial plain (recent alluvium), but also probably from more ancient alluvial terraces. The other sources are rare: from the Cretaceous substrate or from the local territory, and possibly sometimes from the Claise alluvium and from the loessic silt. In the LPP site, the pottery raw materials seem to be more diversified. Almost certainly, 14 % came from the Claise alluvium. 27 % may come from a local source (substrate or loessic silt), but these sources could also be common to ABBG. 59 % of the pottery samples analysed were produced with raw materials which do not come from the Claise valley, where the site is located. 51 % of raw materials are from the Creuse valley and 8 % from a more distant region, geologically related to the Massif Central.

In summary, although the numerical limits defined above are arbitrary and subject to debate, the mineralogical analysis of the sand fraction of the inclusions shows a clear difference between the LPP and ABBG sites. In the ABBG site, located in the valley of the Creuse, the vast majority of materials (88 %) seems to come from the Creuse alluvium, especially from the alluvial plain (recent alluvium), but probably also from the oldest alluvial terraces (Fig. 1). Other sources are rare: Cretaceous and local Tertiary substrate, and perhaps even Claise alluvium or loessic silt. In the LPP site, the pottery raw materials seem more diverse: 14 % almost certainly came from the Claise alluvium, 27 % from the substrate or the loessic silts, but these sources may also be shared with ABBG. However, 59 % of the samples analysed were made of raw materials that are not present in the Claise valley, where the site is located: 51 % were taken from the Creuse valley and 8 % from a more distant region, either the Loire-Allier catchment basin, or the Massif Central itself.

## 5.2. Social and territorial organisation of Le Grand-Pressigny in the Final Neolithic

The analysis of ceramic raw materials has demonstrated the existence of a predominantly local production of pottery in Le Grand-Pressi-

gny. The same result was obtained (Rodot 2007) for the contemporary site of “La Bouchardière” in Monts (Indre-et-Loire), located 35 km from Le Grand-Pressigny. In the Neolithic period, there were no workshops disseminating pottery production at a regional scale. These observations are consistent with the majority of the petrographical analyses conducted to date on the Neolithic of Western Europe (Hardmeier *et al.* 1995, Convertini 1996, Rodot and Martineau 2007). The transport of raw materials or pottery rarely exceeds 10 km, the sources are therefore considered to be local, following the ethno-archaeological model defined by Arnold (2005).

Significant differences were observed between the sites of Le Petit-Paulmy and Bergeresse. 96 % of the Bergeresse pottery was made from sediments from the Creuse valley. These are recent or old alluvial deposits of the Creuse for 88 % of the corpus analysed or from the pure Cretaceous substrate for 8 % of the samples. These results show an occupation centered on the Creuse valley and a low flux of ceramic raw materials or pottery, even if it does not necessarily mean the absence of movement of populations. Pot ABBG8 might also come from the Claise valley. As the sampling included the full variety of shapes and decorations, local sources can be determined for all the morphological categories of the pottery corpus. There are no differences in the nature or sources of ceramic raw materials between the two flint clusters sampled.

In 60 % of the cases, potters gave preference to recent terraces, resulting in the preferential use of sediments close to the river. Since the 1970s, domestic remains have been discovered in the Creuse valley: Barrou – “La Creusette” (Geslin *et al.* 1975 and 1982). The evaluation conducted by A. Villes in 2000 confirmed the presence of many ceramics and lithic tools (Villes 2001). At La Guerche, in the “La Creusette” and “Le Fume-riou” many remains of domestic occupation have also been discovered (Verjux 1991, Villes 2002).

In Bergeresse, the workshop context is dominant despite the presence of domestic remains (tools, grindstones, ceramics, etc.) associated with most of the lithic flakes. It is also interesting to note that the study by Jacques Pelegrin has shown the co-existence in the clusters of flakes from both master long-blade flint-knappers and from low quality production for domestic uses.

The total absence of dwelling structures (post holes, fireplaces, habitats, etc.) and the non-conservation of faunal remains does not facilitate the interpretation of the functional aspects of this domestic context. Even the local production of pottery does not mean that it is a dwelling site. The pots could have been produced close to a flint-knapping workshop, or made at a nearby site located in the Creuse valley. The style of the decoration of these ceramics was compared to the Conguel/Groh-Collé cultural group in Brittany (France) (Verjux *et al.* 2009), but this comparison needs to be confirmed (Verjux *et al.* 2010). If this cultural attribution is confirmed, it would show the existence of an exogenous cultural influx, although pots have been produced locally.

In this study, results from the LPP site confirm the previous qualitative analysis performed by F. Convertini (in press). The raw-material sources are very diverse. The Claise valley and the substrate sources, with one sample probably from the spongolites of Paulmy, represent 41 % of the corpus studied. These raw materials are the nearest to the sites, supplemented with 51 % from the nearby valley of the Creuse (Fig. 1 and 6). So, 92 % of the LPP pots studied are of local origin (less than 10 km) and concern both tronconic and hemispheric forms. 35 % of raw materials were extracted from recent terraces, close to the river. As with the Bergeresse site, this indicates that the potters have certainly favoured wet sediments collected on the river banks, facilitating the preparation of paste used for pottery making. Three samples (8 %) come from the Massif Central. One of them (T192) has an unusual morphology, unique in this corpus and with no real regional comparison (Martineau 2011 and in press). Petrographically, technologically and typologically, it could be an import from the Loire or Allier valleys (Martineau and Convertini in press).

The transport of pottery is a more probable hypothesis than the transport of materials. Nevertheless, more research is needed to prove the lack of potters’ tools at the LPP site and their presence at Creuse valley sites. These results show that the occupants of the LPP site were quite mobile and that they maintained close relations with the neighbouring Creuse valley. One might assume that this valley was their place of residence, but it may just as easily have been a major traffic artery. However, in the Claise val-

ley, Le Petit-Paulmy and the nearest sites of “Le Foulon” and “La Borne” (Abilly), just like “Les Réaux” in Le Grand-Pressigny, have always been considered as dwelling areas. The absence of structures in the LPP site and our results on raw-material sources encourage this hypothesis.

The pottery raw-material sources are a witness to the occupation and organisation of the territory in the Neolithic period. Under these conditions and as part of the Neolithic economy, it seems reasonable to think that the potters used local raw materials, found within a few miles at most. This result is extremely important for our understanding of the occupation of Le Grand-Pressigny during the Final Neolithic. It could confirm that, as we already strongly suspected, communities lived in this region during the periods of flint exploitation. These strong assumptions about the local presence of Neolithic communities in this region during the third millennium cal. BC, should strengthen our belief that there are local domestic occupations, and probably perennial dwellings, in the Creuse valley. This large alluvial plain was favourable to settlements of Neolithic village communities, close to the flint outcrops.

The Creuse valley must have played an important role in terms of occupation and territorial organisation in and around Le Grand-Pressigny, despite the absence of any identified dwellings or burial sites. It is possible that long-blade flint-knappers did not live on site, but that local people provided them with accommodation (L-A. Millet-Richard and J. Pelegrin hypothesis). Thus, at the LPP site, the lithic corpus shows the recycling of supports and nucleus *livre de beurre* in the workshops, and a lack of skill, which would run counter to the permanent presence of specialised flint-knappers (Millet-Richard 1997 and 2006). We can not exclude the hypothesis of a seasonal occupation of this region; the Creuse valley was primarily an axis of circulation and probably a traffic artery.

## 6. Perspectives

The characterisation of the nature and sources of the ceramic pastes from other sites (“Les Réaux” and “Le Pré Barré” in Le Grand-Pressigny, “La Borne” and “Le Foulon” in Abilly, “Les Sables de Mareuil” in Ligueil, “Le Carroi-Potet” in La Celle-Saint-Avant) is underway. These studies will help determine whether all raw mate-

rials used are from local sources. They should also clarify the role of the Creuse valley concerning the sources and supply of pottery raw materials.

The absence of grog in the ceramic pastes in Le Grand-Pressigny may indicate the existence of a particular regional technical group. At the regional scale, and although the data still need to be confirmed by systematic quantitative studies, the absence of grog in the pastes of “Les Loups” in Échiré and the low proportion of grog in “Le Camp Allaric” in Aslonnes reinforce the observations from Le Grand-Pressigny. These sites are significantly different from those of “La Bouchardière – Le Pain Perdu” in Monts (Indre-et-Loire), “Les Vaux” in Moulins-sur-Céphons (Indre), “Diconche” in Saintes (Charente-Maritime), “La Perroche” in Dolus (Charente-Maritime) and “La Hersonnais” in Pléchâtel (Îlle-et-Vilaine). These technical differences suggest the existence of a regional group using raw materials without grog. The question remains whether this specificity also concerns other technical or typological ceramic aspects that could identify a regional or local cultural group. In and around Le Grand-Pressigny, it is still necessary to define the ceramic traditions, including all the technological and typological parameters, combined with radiocarbon dating, in order to establish a relative chronological framework. The comparison of these parameters with data from archaeological contexts, spatial analysis, lithic technology and use-wear analyses will help to resolve the remaining archaeological issues and will also serve to evaluate the interpretative models proposed to date.

## Acknowledgements

The authors wish first to thank the Fyssen Foundation for supporting this research, thus promoting a new stage in the understanding of the socio-economic and territorial organisation of the Grand-Pressigny area during the Final Neolithic. We thank the colleagues who helped us carry out this work, notably Matthieu Honegger, Catherine Louboutin, Audrey Maingaud, Jean-Claude Marquet, Laure-Anne Millet-Richard, Jacques Pelegrin, Catherine Perlès, Pascal Taubat and Stella Weisser. Burgundy Regional Council provided financial support for the PhD of M.-A. Rodot. Carmela Chateau participated in the translation.

# Apport de la saisonnalité de chasse du Daim à Kébara (Israël) à la connaissance des capacités de planification des activités et d'anticipation des besoins chez les Néandertaliens du Levant

William RENDU

## Résumé

Les études de la saisonnalité de prédation permettent de discuter des modalités de sélection des proies et de la gestion des ressources animales par les populations passées. De plus, elles abordent l'organisation spatio-temporelle des activités au sein du territoire. Ainsi, elles contribuent grandement à la caractérisation des capacités de réflexion et d'anticipation développées par les chasseurs-cueilleurs pour l'exploitation de leur milieu. Bien que largement appliquées aux comportements de chasses des Hommes anatomiquement modernes, ces approches n'ont que rarement été développées pour discuter des stratégies de prédatons des Néandertaliens. Le gisement de Kébara est un site majeur du Paléolithique moyen du Levant. Les études archéozoologiques précédentes ont souligné la possibilité de chasses saisonnières impliquant une sélection poussée des proies. Deux taxons principaux ont été exploités, le Daim et la Gazelle. Alors que les données saisonnières sont nombreuses pour cette dernière, elles sont beaucoup plus rares pour le Cervidé. Ainsi, une étude de la saisonnalité de chasse a été réalisée sur le Daim de l'ensemble inférieur (IX-XI) attribué au Moustérien récent. Les résultats confirment notamment les hypothèses précédemment avancées et apportent des éléments clés pour la compréhension de l'anticipation des besoins par la population néandertalienne qui a exploité cette cavité.

## Mots clés

Kébara, saisonnalité, stratégie de chasse, daim, Neanderthal

## Hunting seasonality of the Fallow deer from Kebara cave (Israel): new insights to the scheduling capacities of Levantine Neanderthals

### Abstract

Kebara cave is well known for having delivered a major Levantine middle Palaeolithic sequence. The zooarchaeological analyses have underlined the possibility of an important selection of the two main prey: the Gazelle and the Fallow deer. While the seasonal data are numerous for the first game, few have been obtained on the deer. For this reason a skeletochronological analysis has been conducted on the Fallow deer remains from levels IX to XI attributed to the Late Mousterian. The results confirm the previous hypotheses and bring new insights to the understanding of the need anticipation and to the scheduling capacities of Levantine Neanderthals.

### Keywords

Keraba cave, Seasonality, hunting strategy, fallow deer, Neanderthal

Les stratégies de prédatons développées par les néandertaliens sont depuis longtemps utilisées pour discuter des capacités de planification et d'anticipation mises en œuvre par cette

population pour l'exploitation de son environnement.

D'abord perçu comme un Hominidé dont la chasse se limitait aux proies de petites tailles

(Binford, 1984, 1988, 1989), Néandertal était vu comme incapable d'exploiter de grands Herbivores autrement que par un charognage plus ou moins actif (Klein, 1989). Cette vision a depuis été largement rejetée dans les années 90 par les études archéozoologiques qui ont démontrées la capacité chez ce taxon de chasser un très large éventail de proies provenant de tous types d'environnements (*e.g.* : Jaubert *et al.*, 1990 ; Brugal et David, 1993 ; Brugal, 1999a, 1999b ; Grayson et Delpech, 1994 ; Auguste, 1995 ; Gaudzinski, 1995, 1999, 2000 ; Speth et Tchernov, 1998, 2001 ; Patou-Mathis, 2003). Cependant, l'existence de stratégies de chasses spécialisées pour les populations du Paléolithique moyen est encore débattue par nombre d'auteurs (Mellars, 1973, 1989, 1996, 2004a ; Strauss 1983) et la possibilité d'une organisation temporelle et spatiale des activités est souvent remise en question (Binford, 1982 ; Strauss, 1997 ; Mellars, 1996). Cette faible planification des besoins aurait comme conséquence une absence de spécialisation des activités et par conséquent, des sites au sein du territoire. Dans ce schéma, l'exploitation de l'environnement animal par les Neanderthaliens est décrite comme opportuniste, remettant implicitement en question les capacités cognitives de cette espèce (Mellars, 2004b).

L'organisation des activités de ces populations du Paléolithique moyen a souvent été abordée à travers l'étude des productions lithiques et de la gestion de la matière première (Geneste, 1985 ; Kuhn, 1995, Porrage, 2005), mais n'a été que peu traitée au travers des comportements de prédation (voir cependant : Chase, 1986 ; Farizy *et al.*, 1994 ; Meignen *et al.*, 1998 ; Costamagno *et al.*, 2006). Ces rares études ont cependant largement nuancé l'idée d'une absence d'anticipation en proposant l'existence au Moustérien de stratégies complexes d'exploitation du territoire (Delagnes, 2010 ; Rendu, 2007, 2010 ; Rendu et Armand, 2009). Celles-ci se caractériseraient notamment par la mise en œuvre de chasses collectives et l'hypothèse d'une consommation différée des denrées alimentaires a été avancée (Costamagno *et al.*, 2006). Cette organisation des activités se percevrait, notamment par une segmentation temporelle des activités et une spécialisation des sites au sein du territoire.

Dans ce cadre, la saisonnalité de prédation est de toute évidence, un paramètre clé pour l'iden-

tification et la compréhension d'une gestion, dans le temps et dans l'espace, d'une économie de subsistance impliquant une occupation raisonnée du territoire.

De récents travaux menés sur le Paléolithique moyen final du Sud-ouest européen ont montré le développement par certaines populations néandertaliennes d'une planification des activités au sein du territoire en fonction du cycle saisonnier (Rendu, 2007, 2010 ; Daujeard et Moncel, 2010). Ces résultats témoignent des capacités techniques et cognitives des néandertaliens, qui leur ont permis la mise en œuvre une telle organisation socio-économique. Ces derniers travaux soulignent l'existence de différentes stratégies de prédation impliquant une spécialisation de certaines économies de subsistance néandertalienne à la fin du Paléolithique moyen. Dans ce contexte, l'organisation saisonnière des activités au sein du territoire aurait pour conséquence une adaptation de la mobilité pour l'exploitation de l'environnement animal par les groupes humains considérés.

Une question s'impose alors : ce schéma comportemental est-il un trait culturel partagé par l'ensemble des individus rattachés au taxon néandertalien, ou correspond-il au contraire, à une variabilité régionale particulière aux populations du Sud-Ouest de l'Europe ?

Les Néandertaliens du Proche-Orient ont souvent été décrits tant d'un point de vue biologique que comportemental comme différents de leurs homologues occidentaux (*e.g.* : Bar-Yosef et Vandermeersch, 1991 ; Vandermeersch 1995 ; Mann, 1995). Cette région se trouve à l'interface des écosystèmes des espèces néandertaliennes et « *sapiens* » qui semblent avoir occupé par alternance cette même zone. De plus, elle constitue un couloir de migration majeur et une voie de passage obligé et avéré pour les Hommes sortis d'Afrique. Pour ces raisons, l'étude de cette région est capitale pour mieux appréhender les processus menant à la « *modernité culturelle* ».

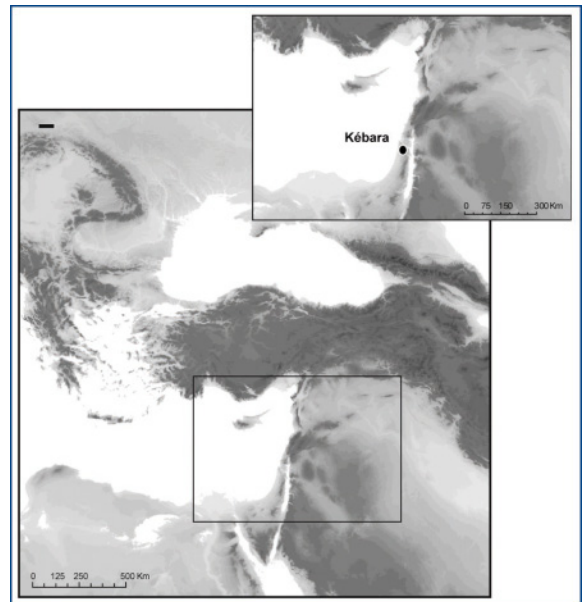
À travers l'étude de la saisonnalité de prédation du gisement de Kébara (Israël), ce travail propose d'apporter des éléments de discussion sur les capacités de planification des activités et d'anticipation des besoins des sociétés néandertaliennes du Levant.



## Le Gisement de Kébara

Situé sur le versant ouest du mont Carmel à quelques kilomètres de la ligne de rivage (figure 1), Kébara est une large grotte qui a fait l'objet de trois campagnes de fouilles, dont deux nous intéressent directement. La première dirigée par M. Stekelis dans les années 50 et jusqu'au milieu des années 60 et la deuxième par O. Bar-Yosef et B. Vandermerch durant les années 80 (Bar-Yosef, 1991 ; Bar-Yosef *et al.*, 1992) ont livré le matériel de cette étude. Le site a livré un grand nombre d'ensembles archéologiques et en particulier plusieurs niveaux du Paléolithique moyen attribués au MIS 3 (Valladas, 1987). Plusieurs centaines de vestiges lithiques et fauniques ont été retrouvés au sein de ces dépôts qui ont également livré une grande quantité de foyers (e.g. : Meignen *et al.*, 2008 ; Albert *et al.*, 2010). De plus, une grande quantité de vestiges végétaux ont été identifiés (Lev *et al.*, 2005). Le site doit tout particulièrement sa renommée à la découverte d'une sépulture néandertalienne pour laquelle une intervention secondaire sur le cadavre a pu être proposée, attestant de comportements symboliques complexes développés par cette population néandertalienne (Bar-Yosef et Vandermerch, 1991). Plusieurs centaines de milliers de vestiges osseux ont également été collectés dans les différentes unités qui constituent la stratigraphie établie par les derniers fouilleurs. L'étude archéozoologique a mis en évidence un spectre faunique centré sur la Gazelle et le Daim et complété par le Sanglier, le Cerf et l'Aurochs (Speth et Tchernov, 2001, 2008 ; Speth et Clark, 2006). L'évolution du spectre faunique au sein de la stratigraphie, avec notamment la disparition des espèces de grande taille et l'enrichissement des proies en individus juvéniles au sommet de la stratigraphie attesterait d'une sur-chasse conduite par les Moustériens qui aurait abouti à la raréfaction, voire la disparition, de certains taxons au sein de l'environnement du site de Kébara (Speth et Clark, 2006).

Les chasseurs néandertaliens ont développé des stratégies originales de prédatons en pratiquant une sélection différentielle entre les Gazelles et les Daims. Alors que leur attention s'est portée sur les femelles de ces premières, ils semblent avoir chassé de manière non sélective les cervidés puisque mâles et femelles sont présents dans des proportions proches de celles des popu-



**Figure 1 :** Localisation de la grotte de Kébara. Fond de carte Amante et Eakins, 2009.

lations sauvages actuelles et la courbe d'abattage est de type catastrophique (Speth et Tchernov, 2008 ; Speth et Clark, 2006). La Gazelle aurait été chassée pendant la saison de pluie (Speth et Tchernov, 2008 ; Speth et Clark, 2006 ; Lieberman, 1993 ; Lieberman et Stutz, 2008) qui correspond au moment où elles sont regroupées et faciles à localiser, alors que les daims sont dispersés dans l'environnement. Ainsi Speth et Clark (2006) proposent que la différence dans les modalités de sélections des proies entre ces deux taxons puisse résulter de différences de comportements lors d'une même saison.

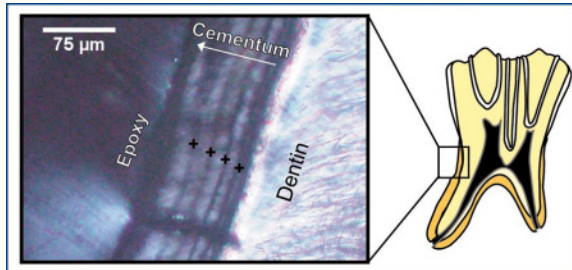
Abattu en moins grand nombre, le Daim a certainement joué un rôle majeur au sein de la diète moustérienne. Bien que les vestiges de Gazelle soient moins fréquents que ceux de Daim, la quantité de viande fournie par ce taxon, en considérant le poids théorique moyen des individus de cette espèce (60 kg-100 kg), ne doit pas être minorée par rapport à ceux de Gazelle, dont les individus sont moins robustes (18-25 kg). Dans ce contexte, si l'étude archéozoologique soulignait une exploitation différentielle des deux taxons majoritaires, possiblement liée à la saison de prédation, la précision des modalités d'acquisition du Daim du point de vue saisonnier s'avérerait indispensable à la compréhension globale des

stratégies de subsistance mises en œuvre par les Néandertaliens de Kébara.

Ainsi, cette présente étude porte sur la détermination de la saison de chasse du Daim. Ont été sectionnées 22 troisièmes prémolaires inférieures gauches provenant des unités inférieures (représentant 24 % du nombre total d'individus identifiés, Speth et Clark, 2006) de ce taxon pour être analysées par cémentochronologie.

### La cémentochronologie

La cémentochronologie est une méthode couramment utilisée pour identifier la saison de mort des animaux en contexte archéologique. Cette méthode repose sur l'observation au microscope polarisant des marques de croissance au sein du ciment des dents de mammifères (Klevezal' et Kleinenberg, 1969 ; Klevezal', 1996).



**Figure 2 :** Coupe schématique d'une dent d'ongulé. En gris : ciment. La photographie représente des bandes de ciments observées au microscope polarisant. La flèche indique le sens de croissance du ciment. Les + positionnent les annuli.

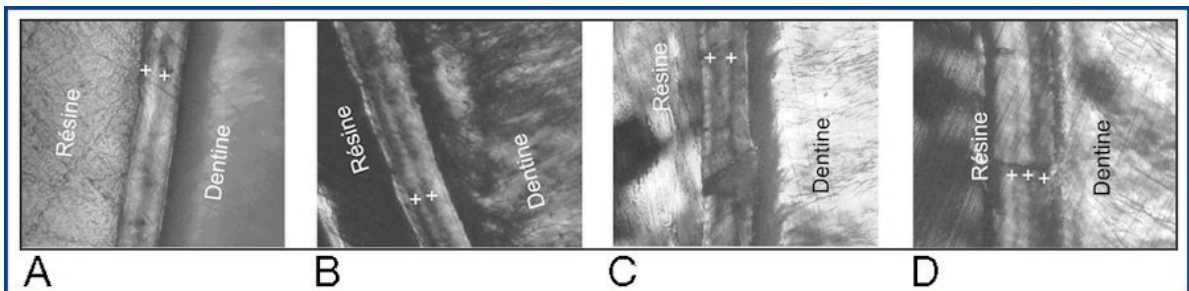
La croissance du ciment (répond à un cycle saisonnier qui voit l'apposition successive d'une bande à croissance rapide, ou *zone*, et d'une bande à croissance lente, *annulus* et/ou LAG, pendant le ralentissement métabolique (Klevezal' et Kleinenberg, 1969 ; Klevezal', 1996 ;

zal' et Kleinenberg, 1969 ; Klevezal' et Pucek, 1987 ; Klevezal', 1996 ; Lieberman et Meadow, 1992, Burke et Castannet, 1995). La nature du dernier dépôt détermine la saison, mauvaise ou bonne. Quand la qualité de lecture le permet, un découpage supplémentaire est proposé, fondé sur l'estimation de l'avancée de la croissance de la dernière bande quand celle-ci est une *zone* (Pike-Tay, 1991 ; Martin, 1994 ; Rendu, 2006, 2007, 2010) (Tableau 1, Figure 3).

**Tableau 1 : Détermination saisonnière en fonction de la cémentogénèse (d'après Rendu et Armand, 2009)**

Nature du dernier dépôt	Stade de développement	« Néo-Saison »
Zone	Début de croissance	Début de la <b>Bonne Saison (DBS)</b>
	Milieu de croissance	Milieu de la <b>Bonne Saison (MBS)</b>
	Fin de croissance	Fin de la <b>Bonne Saison (FBS)</b>
Annulus		Mauvaise Saison (MS)

L'analyse a suivi le protocole que nous avons établi (Rendu, 2007 ; Rendu, 2010). Les processus de remobilisation post-mortem du ciment (recristallisation et destruction de l'enregistrement saisonnier) ont été recherchés selon la méthode préconisée par A. J. Stutz (2002a, 2002b). L'ensemble du matériel a été regardé quatre fois en aveugle. La détermination a été retenue quand au moins trois des observations étaient identiques et que la quatrième ne différait pas au plus d'une saison des trois autres.



**Figure 3 :** photographie en lumière polarisée analysée de lames de bovidé à quatre stades de développement différents du ciment. Le dernier dépôt est le plus extérieur. Les + positionnent les annuli. A) mauvaise saison ; B) début de bonne saison ; C) milieu de bonne saison ; D) fin de bonne saison.

## Une saison de chasse restreinte

Au total, plus de quarante lames minces ont été réalisées et analysées sous microscope polarisant au Muséum d'Anthropologie de l'University of Michigan (Ann Arbor, USA) et au laboratoire TRACES de l'Université Toulouse Le Mirail (Toulouse, France).

Les modifications post-dépositionnelles affectent plus de la moitié des lames minces observées. Dans la majorité des cas, il s'agit d'une fissuration transversale des bandes de ciment liée à la météorisation de ces dernières, n'ayant qu'une incidence limitée sur la lisibilité du matériel. En revanche, plusieurs remobilisations post-mortem du ciment, sous-forme de recristallisation, sont observables. Elles ont eu pour conséquence de détruire l'enregistrement saisonnier de trois dents. Rappelons que ces mêmes modifications avaient été déjà identifiées dans l'analyse du ciment des gazelles de ce même gisement (Stutz, 2002a, 2002b, Lieberman et Stutz, 2008).

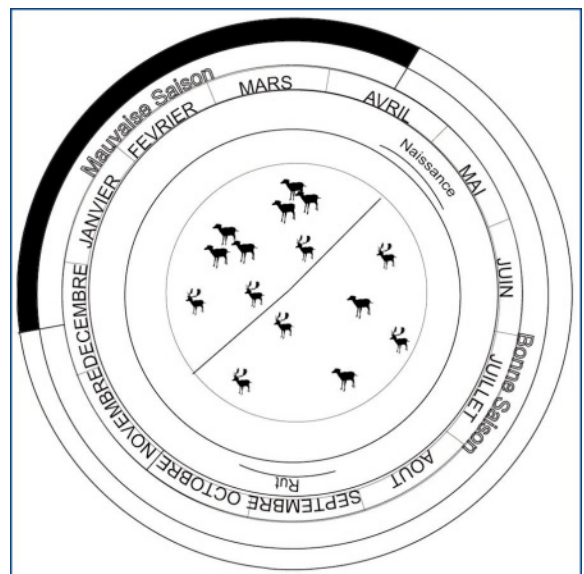
Les résultats préliminaires obtenus soulignent que dans la très large majorité des cas (NMI = 16) la dernière bande s'avère être un annulus en cours de formation. Dans certains cas, bien que le dernier dépôt semble correspondre à un dépôt à croissance lente (annulus) la possibilité d'une zone en tout début de croissance n'a pas pu être complètement écartée (NMI = 3). La conduite ultérieure d'une analyse d'image assistée par ordinateur précisera le résultat (Lieberman *et al.*, 1990). Le faible nombre d'échantillons ne permet pas ici de traiter individuellement les différentes unités stratigraphiques. Cependant, en considérant l'absence de variation des résultats saisonniers au sein de la stratigraphie, les résultats sont traités dans leur globalité.

À quelle période de l'année correspond cette phase de ralentissement métabolique du Daim de Kébara pendant laquelle il a été abattu ? Bien que ne disposant pas encore de référentiel de cémentogenèse suffisant pour ce taxon, il est possible de proposer une approximation. Pour un environnement donné, les rythmes de cémentogenèse sont souvent proches au sein d'une même famille (Klevezal' et Kleinenberg, 1969 ; Klevezal', 1996 ; Grue et Johnson, 1976 ; Pike-Tay, 1991) impliquant que la période de début et de fin de formation d'un annulus sont comparables entre

ses taxons. Ainsi, pour le Cerf, le Chevreuil, le Renne etc. (Pike Tay, 1991, 1995 ; Martin, 1994), le début du ralentissement métabolique s'étale de la fin de l'automne au début du printemps. La saison de chasse reconnue par l'analyse correspondrait ainsi au plus fort de la saison des pluies (hiver). Notons que nos premières observations personnelles sont en adéquation avec cette proposition et que pour la Gazelle, la formation de l'annulus dans cette région du Proche Orient est synchronisée avec le début de la saison des pluies (*e.g.* : Lieberman, 1993). La constitution de référentiel sur les processus de cémentogenèse du Daim permettra de confirmer ou d'infirmer cette proposition.

## La Chasse au Daim

La mise en perspectives des résultats cémento-chronologiques avec les données éthologiques disponibles sur le daim permettent de mieux comprendre les stratégies de sélection et d'acquisition des proies mises en œuvre par les Néandertaliens (Figure 4). En effet, la saison de chasse reconnue correspond à une phase de changement à la fois éthologiques (modification de l'organisation sociale) et biologiques (importantes variations de la masse carnée) chez le Daim.



**Figure 4** : résultats de l'étude cémento-chronologique (en noir) en fonction du cycle saisonnier du Daim. Les images de daims au centre de la figure évoquent les moments où les individus sont concentrés ou dispersés.

Concernant les changements comportementaux, cette période marque le début du regroupement des femelles habituellement solitaires en hardes de quelques individus qui profitent alors du couvert forestiers pour s'abriter. Leur mobilité est facilitée par la fin de la période de lactation, de la plus grande autonomie et la plus grande vitesse de déplacement de leur jeune. Les mâles quant à eux, maintiennent leur mode de vie solitaire.

À la fin de la saison sèche, de nombreuses modifications biologiques apparaissent dans la population de Daim. Elles entraînent d'importants changements dans les matières premières (peau, viande, graisse et moelle) susceptibles d'être utilisées par les chasseurs-cueilleurs, altérant ainsi le potentiel de ce taxon pour leur subsistance.

À ce moment de l'année, les mâles sortant du rut sont au plus mauvais de leur condition physique (e.g. : Asher *et al.*, 2005 ; Appolinio et Di Vittorio, 2004). Progressivement pendant la saison des pluies, leur masse carnée se reconstitue, augmentant considérablement leur intérêt pour le chasseur en terme de quantité de viande qu'ils sont susceptibles de fournir, pour atteindre un niveau optimal dès la fin de l'hiver (Appolinio et Di Vittorio, 2004).

À l'inverse, les femelles ont viandé tout l'été retrouvant ainsi une bonne condition physique qui avait drastiquement chuté après la mise bas au printemps. La masse carnée de ces dernières augmente progressivement pour atteindre son optimum à la fin de la saison des pluies juste avant la mise bas (Appolinio et Di Vittorio, 2004). Simultanément, les jeunes de première année ont constitué leurs premières réserves de graisses.

La période de chasse du Daim reconnue par l'étude cémentochronologique correspond donc au moment de l'année où l'ensemble de la population de daim présente les meilleures conditions physiques, confirmant les résultats de J. Speth et E. Tchernov (2008). Ce résultat suggère que les Néandertaliens de Kébara ont spécifiquement choisi d'exploiter ce taxon à ce moment de l'année pour des raisons économiques, mais également stratégiques, en profitant que les individus se regroupent en hardes à ce moment-là, optimisant par la même son exploitation (Speth et Clark, 2006).

## Un Chasseur

Le Daim n'est pas la seule proie exploitée par les Néandertaliens de Kébara. La Gazelle a également tenu une place majeure dans leur alimentation. Speth et Clarks (2006) ont mis en évidence une chasse très largement centrée sur les adultes femelles. L'étude de l'usure dentaire souligne une chasse en hiver et au printemps (Speth et Tchernov, 2008). L'étude cémentochronologique réalisée par D. E. Lieberman (1993) et reprise par A. J. Stutz (2008 ; Stutz et Lieberman, 2008), identifie une même période d'exploitation principale : hiver et printemps, c'est-à-dire similaire à celle du Daim même si des abattages, moins nombreux, ont également été identifiés à d'autres périodes de l'année.

On assiste donc à Kébara au développement d'une chasse sélective poussée, où la qualité de la proie en terme de quantité de nourriture (viande et surtout graisse) qu'elle est susceptible de fournir est le facteur clé (Speth et Tchernov, 2001, 2008 ; Speth et Clark, 2006).

L'exploitation sélective de proies de petite taille au mieux de leurs conditions atteste des excellentes capacités de prédation des Néandertaliens de Kébara. Cette observation trouve d'ailleurs un écho intéressant dans les modalités de chasse des plus grands ongulés. Si les chasseurs ont été tellement efficaces dans la capture de ces grandes proies, ils semblent être arrivés à une surchasse de ces taxons (Speth et Clark, 2006). Ainsi, s'ils étaient capables de les chasser, ils n'auraient cependant pas mis en œuvre une gestion de leur prédation pour empêcher la raréfaction de ces taxons voire leur disparition dans leur environnement.

Cette adaptation de la sélection des individus en fonction de la saison de chasse a déjà été proposée comme une caractéristique des comportements de prédation des Néandertaliens européens à la fin du Paléolithique moyen. En effet sur le site du Pech-de-l'Azé I, en fonction des saisons d'occupation du site les chasseurs moustériens ont exploité différenciellement femelles et mâles (Rendu, 2010). Notons cependant, alors qu'à Kébara ce sont les animaux les mieux portants qui ont été abattus, au Pech-de-l'Azé I ce sont les individus les plus faibles. Ainsi, si dans un cas c'est la qualité des proies qui a été préférée, dans l'autre c'est la facilité de la prédation qui a été à l'origine du choix de la proie (Rendu, 2007, 2010).

## Occupation du site

Mises en perspectives avec les données disponibles sur le site, les résultats de saisonnalité permettent de renforcer les hypothèses d'utilisation du site préalablement avancées (Meignen *et al.*, 2006). L'étude de l'industrie lithique atteste de la réalisation sur place de l'ensemble des étapes de la chaîne opératoire. Ces éléments associés à l'absence d'outil réalisé en matière première exogène (Meignen et Bar-Yosef, 1991, 1992), à l'abondance des vestiges archéologiques ainsi qu'à l'importante structuration de l'espace au sein de la cavité avec l'existence d'espaces réservés à certaines activités (aire de débitage, aire de boucherie, et aire de rejet, voir Speth, 2006) ont permis de conclure à une utilisation de la cavité comme un camp de base (Meignen *et al.*, 2006). En combinant nos résultats et ceux obtenus sur les Gazelles (Speth et Tchernov, 2001 et Lieberman, 1993) il est ainsi possible de proposer que le site a fonctionné en camp de base principal hivernal pour les populations Néandertaliennes. La position du site au carrefour des collines du mont Carmel et des plaines côtières méditerranéennes, a offert aux habitants de la cavité la possibilité d'exploiter différents biotopes pour la chasse des Gazelles et du Daim sur leur zone d'hivernage respective pendant la saison des pluies.

Le fait que les chasseurs de Kébara soient revenus chaque hiver pour exploiter de manière sélective les proies qui présentaient les meilleures conditions physiques dans leur environnement souligne l'importante anticipation de leurs besoins. De plus ces résultats attestent d'une grande planification à l'échelle de l'année de l'exploitation des ressources dans le but d'optimiser l'acquisition. En considérant la puissance sédimentaire du gisement, il semble que cette caractéristique dans l'économie des Moustériens du Levant ait perduré sur une longue période. Ceci doit être mis en relation avec les résultats provenant des autres champs disciplinaires de l'archéologie. Si l'on considère l'absence d'évolution au sein de la production lithique (Meignen et Bar-Yosef, 1991, 1992 ; Meignen *et al.*, 2006) ainsi que l'utilisation continue pendant toute la durée des occupations des aires d'activités spécifiques (aire de combustion, de boucherie) il est possible de constater une pérennisation des activités sur cette période (Meignen *et al.*, 2006).

Ces éléments sont la preuve d'une planification de l'occupation du site sur l'année attestant des importantes capacités d'anticipation des Moustériens de Kébara.

## Conclusion

Cette étude portant sur l'ensemble inférieur du gisement de Kébara apporte des éléments importants pour la caractérisation des périodes de chasse du Daim et contribue à caractériser les modalités de sa sélection. Cette analyse souligne une sélection du Daim sur sa zone d'hivernage dans l'objectif d'exploiter des animaux qui se trouvent au meilleur de leur condition physique.

Il apparaît que les Néandertaliens du Levant partagent des stratégies de chasses communes avec leurs homologues occidentaux. Cette subsistance s'organise autour d'une importante planification des activités de prédation, couplée à une anticipation poussée dans la gestion des besoins. Cependant, contrairement aux Homini-dés d'Europe, on peut se demander si les Proche-Orientaux n'auraient pas eu moins souvent recours aux abattages en nombre et s'ils n'auraient pas développé moins de gisements spécialisés (pour une synthèse voir Delagnes, 2010 et Delagnes et Rendu, soumis). Si c'était confirmé, cela pourrait être lié aux types de proies chassées qui, à part la Gazelle, ne sont pas des proies grégaires, contrairement au Renne et au Bison abattus en masse dans le Sud-Ouest de la France notamment.

Enfin, d'importantes évolutions ont été constatées dans les niveaux les plus récents du Paléolithique moyen à Kébara (Speth et Tchernov, 2001, 2008). La continuation de l'étude que nous avons entreprise permettra d'apporter des éléments discriminant sur l'évolution sur place des comportements de prédation des Néandertaliens, nous permettant ainsi d'en préciser la variabilité.

## Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier la Fondation Fyssen. Je remercie très sincèrement John Speth qui m'a apporté énormément et auprès duquel je continue d'apprendre. Que l'ensemble des membres du Museum of Anthropology trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance, sans leur aide, ce travail se serait avoué vain. Merci ainsi à Dan Fisher pour la mise à disposition de son matériel et de son temps. Merci à Sandrine

Costamagno, Olivier Le Gall, Laurence Bourguignon, Cédric Beauval, Anne Delagnes et Liliane Megnen pour leur aide dans mes réflexions récentes. Toute ma reconnaissance va à O. Bar Yosef pour m'avoir autorisé à étudier le matériel de Kébara. Merci également à R. Rabinovitch, E. Hovers ainsi qu'à l'ensemble des personnels de l'Hebrew University de Jerusalem pour leur accueil, leur aide et leur soutien.

## Bibliographie

- Albert R. M., Berna B., Goldberg P. (2010). Insights on Neanderthal fire use at Kebara Cave (Israel) through high resolution study of prehistoric combustion features: Evidence from phytoliths and thin sections. *Quaternary International*, Article in Press, doi :10.1016/j.quaint.2010.10.016.
- Amante C., Eakins B. M. (2009), ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24 March 2009, 19 p.
- Apollonio A., Di Vittorio I. (2004). Feeding and reproductive behaviour in fallow bucks (*Dama dama*). *Naturwissenschaften*, 91, 579-584.
- Auguste P. (1993). Acquisition et exploitation du gibier au Paléolithique moyen dans le nord de la France. Perspectives paléo-écologiques et paléthnographiques. In « Exploitation des animaux sauvages à travers le temps, XIII<sup>e</sup> Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes, IV<sup>e</sup> Colloque international de l'Homme et de l'Animal, 15-16-17 octobre 2002 » (APDCA, éd.), pp. 48-62, Juan-les-Pins. 48-62.
- Bar-Yosef O. (1991). The history of excavations at Kebara Cave. In « *Le Squelette Moustérien de Kébara 2* » (Bar-Yosef O. ; Vandermeersch B., eds). Cahiers de Paléoanthropologie. Paris : Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique : 17-27.
- Bar-Yosef O. et Vandermeersch B. (1991). « Le Squelette Moustérien de Kébara 2. » CNRS, Paris 197.
- Binford L. R. (1980). Willow smoke and dog's tails: Hunter-gatherer settlement systems and archaeological site formation. *American Antiquity* 45, 4-20.
- Binford L. R. (1981). "Bones: Ancient Men and Modern Myths". Academic Press, New-York 321.
- Binford L. R. (1982). The archaeology of place. *Journal of Anthropological Anthropology* 1, 5-31.
- Binford L. R. (1984). "Faunal Remains from Klasies River Mouth". Academic Press, Orlando 283.
- Binford L. R. (1988). Étude taphonomique des restes fauniques de la grotte Vaufrey, Couche VIII. In « La grotte Vaufrey : Paléoenvironnement - Chronologie - Activités humaines » (J.-P. Rigaud, éd.), pp. 535-563. Mémoires de la Société Préhistorique Française. 535-563.
- Binford L. R. (1989). Isolating the transition to cultural adaptations: An organizational approach. In "The Emergence of Modern Humans. Biocultural Adaptations in the Later Pleistocene" (E. Trinkaus, éd.), pp. 18-41. Cambridge University Press, Cambridge. 18-41.
- Brugal J.-P. (1999). Étude de populations de grands bovidés européens : Intérêt pour la connaissance des comportements humains au Paléolithique. In « Le Bison : Gibier et Moyen de Subsistance des Hommes du Paléolithique aux Paléoindiens des Grandes Plaines » (J.-P. Brugal, F. David, J. G. Enloe and J. Jaubert, eds), pp. 85-103. ADPCA, Antibes. 85-103.
- Brugal J.-P. (1999). Middle paleolithic subsistence on large bovids: La Borde and Coudou-lous I (Lot, France). In "The role of early humans in the accumulation of european lower and middle palaeolithic bone assemblages" (F. f. V. u. F. Römisch-Germanisches Zentralmuseum, éd.), pp. 263-266. Monographien des Römisch-Germanisches Zentralmuseums, Mainz. 263-266.
- Brugal J.-P. et David F. (1993). Usure dentaire, courbe de mortalité et « saisonnalité » : les gisements du Paléolithique moyen à grands bovidés. In « Exploitation des animaux sauvages à travers le temps, XIII<sup>e</sup> Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes, IV<sup>e</sup> Colloque international de l'Homme et de l'Animal, 15-16-17 octobre 2002 » (APDCA, éd.), pp. 63-77, Juan-les-Pins. 63-77.
- Burke A. et Castanet J. (1995). Histological observations of cementum growth in horse teeth and their application to archaeology. *Journal of Archaeological Science* 22, 479-493.

- Burke A. et Castanet J. (1995). Histological observations of cementum growth in horse teeth and their application to archaeology. *Journal of Archaeological Science* **22**, 479-493.
- Chase P. G. (1985). On the use of Binford's utility indices in the analysis of archaeological sites. *PACT* **11**, 287-302.
- Costamagno S., Meignen L., Beauval C., Vandermeersch B. et Maureille B. (2006). Les Pradelles (Marillac-le-Franc, France) : A mousterian reindeer hunting camp? *Journal of Anthropological Archaeology* **25**, 466-484.
- Daujeard C., Moncel M.-H. (2010). On Neanderthal subsistence strategies and land use: A regional focus on the Rhone Valley area in southeastern France. *Journal of Anthropological Archaeology*, **29**, 368-391.
- Delagnes A. (2010). Systèmes techniques, subsistance et mobilité au Paléolithique moyen : interactions et implications diachroniques. Habilitation à diriger des Recherches, Université Bordeaux 1, Talence.
- Delagnes A., Rendu W., submitted. Shifts in Neandertals Mobility: Mousterian Technological and Subsistence Strategies in Western France. *Journal of Anthropological Archaeology*.
- Farizy C., David F. et Jaubert J. (1994). « Hommes et Bisons du Paléolithique Moyen à Mauran (Haute-Garonne). » CNRS 253.
- Gaudzinski S. (1995). Wallertheim revisited: A reanalysis of the fauna from the Middle Paleolithic site of the Wallertheim (Rheinessen, Germany). *Journal of Archaeological Science* **22**, 51-66.
- Gaudzinski S. (1999). A contribution to the knowledge of the Early Weichselian open-air site of Wallertheim (Rheinessen/Germany). In « Le Bison : Gibier et Moyen de Subsistance des Hommes du Paléolithique aux Paléoindiens des Grandes Plaines » (J.-P. Brugal, F. David, J. G. Enloe and J. Jaubert, eds), pp. 281-300. ADPCA, Antibes. 281-300.
- Gaudzinski S. (2000). On the variability of middle palaeolithic procurement tactics: the case of Salzgitter Lebenstedt, Northern Germany. *International Journal of Osteoarchaeology* **10**, 396-406.
- Geneste J.-M. (1985). « Analyse lithique d'industries moustériennes du Périgord : une approche technologique du comportement des groupes humains au Paléolithique moyen ». Unpublished de doctorat thesis, Bordeaux I.
- Grayson D. K. et Delpéch F. (1994). The evidence for Middle Palaeolithic scavenging from Couche VIII, Grotte Vaufréy (Dordogne, France). *Journal of Archaeological Science* **21**, 359-375.
- Jaubert J., Lorblanchet M., Laville H., Slott-Moller R., Turq A. et Brugal J.-P. (1990). « Les Chasseurs d'Aurochs de La Borde. Un Site du Paléolithique Moyen (Livernon, Lot). » 157.
- Klein R. G. (1989). Why does Skeletal Part Representation Differ Between Smaller and Larger Bovids at Klasies River Mouth and Other Archaeological Sites? *Journal of Archaeological Science* **6**, 363-381.
- Klevezal' G. A. (1996). "Recording Structures of Mammals: Determination of Age and Reconstruction of Life History." A. Balkema, Rotterdam 448.
- Klevezal' G. A. et Kleinenberg S. E. (1969). "Age determination of mammals from annual layers in teeth and bones." Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem 128.
- Klevezal' G. A. et Pucek Z. (1987). Growth layers in tooth cement and dentine of european bison and its hybrids with domestic cattle. *Acta Theriologica* **32**, 115-128.
- Kuhn S. L. (1995). "Mousterian Lithic Technology. An Ecological Perspective." Princeton University Press, Princeton.
- Lev E., Kislev M. E., Bar-Yosef O. (2005). Mousterian vegetal food in Kebara cave, Mt Carmel, *Journal of Archaeological Science*, **32** ; 475-484.
- Lieberman D. E. (1993). The rise and fall of seasonal mobility among hunter-gatherers: the case of the Southern Levant. *Current Anthropology* **34**, 569-598.
- Lieberman D. E., Deacon T. W. et Meadow R. H. (1990). Computer image enhancement and analysis of cementum increments as applied to teeth of *Gazella gazella*. *Journal of Archaeological Science*, 519-533.
- Lieberman D. E. et Meadow R. H. (1992). The biology of cementum increments (with an archaeological application). *Mammal Review* **22**, 57-77.
- Mann A. (1995). Modern Human Origins: Evidence from the Near East *Paléorient* **21**, 35-46.

- Martin H. (1994). « Nouveaux milieux, nouveaux chasseurs. Une approche des comportements au post-glaciaire à travers l'étude des saisons de capture du gibier. » Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Université Toulouse-Le Mirail. 384. Meignen *et al.*, 2006.
- Meignen L. Bar-Yosef O. (1991). Les outillages lithiques moustériens de Kébara (fouille 1982-1985) : premiers résultats. In « Le Squelette Moustérien de Kébara 2 » (Bar-Yosef O. et Vandermeersch B., eds) CNRS, Paris, 49-75.
- Meignen L. Bar-Yosef O. (1992). Middle Palaeolithic variability in Kebara Cave (Mount Carmel, Israel). In *"The evolution and dispersal of Modern Humans in Asia"* (Akazawa T., Aoki K., Kimura T., eds), Tokyo, Hokusen-Sha, 129-148
- Meignen L., Beyries S., Speth J. et Bar-Yosef O. (1998). Acquisition, traitement des matières animales et fonction du site au Paléolithique moyen dans la grotte de Kebara (Israël) : une approche interdisciplinaire In « Économie Préhistorique : Les Comportements de Subsistance au Paléolithique » (J.-P. Brugal, L. Meignen and M. Patou-Mathis, eds), pp. 227-241. APCDA-CNRS, Sophia Antipolis. 227-241.
- Meignen L., Goldberg P., Bar-Yosef O. (2006). The hearths at Kebara cave and their role in site formation processes. In *"Kebara cave Mt. Carmel, Israel. The Middle to Upper Paleolithic Archaeology, Part 1"* (Bar-Yosef O., Meignen L.). Peabody university press, Harvard, University, American School of Prehistoric Research, 49, 91-122.
- Mellars P. A. (1973). The character of the Middle-Upper Palaeolithic transition in south-west France. In *"The Explanation of Culture Change"* (C. Renfrew, éd.), pp. 255-276. Duckworth, London. 255-276.
- Mellars P. A. (1989). Technological changes at the Middle/Upper Palaeolithic transition: Technological, social, and cognitive perspectives. In *"The Human Revolution. Behavioural and Biological Perspectives on the Origins of Modern Humans"* (P. Mellars and C. Stringer, eds). Edinburgh University Press, Edinburgh.
- Mellars P. A. (1996). "The Neanderthal Legacy: An Archaeological Perspective From Western Europe." Princeton University Press, Princeton ?
- Mellars P. A. (2004a). Reindeer specialization in the early Upper Palaeolithic: the evidence from south west France. *Journal of Archaeological Science* **31**, 613-617.
- Mellars P. A. (2004b). Neanderthals and the modern human colonization of Europe. *Nature* **432**, 461-465.
- Patou-Mathis M. (2003). Kabazi II (Crimée, Ukraine) : un site d'abattage et de boucherie du Paléolithique moyen. *L'Anthropologie* **107**, 223-253.
- Pike-Tay A. (1991). "Red Deer Hunting in the Upper Paleolithic of South-West France: A Study in Seasonality." BAR international series, Oxford.
- Pike-Tay A. (1995). Variability and synchrony of seasonal indicators in dental cementum microstructure of the Kaminuriak *Rangifer* population. *Archaeofauna* **4**, 273-284.
- Porraz G. (2005). En marge du milieu alpin – Dynamiques de formation des ensembles lithiques et modes d'occupation des territoires au Paléolithique moyen. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille.
- Rendu W. (2006). Saisonnalité et prédation au Pech-de-l'Azé I. Apport de la cémento-chronologie. In « Notions de territoire et de mobilité. Exemples de l'Europe et des premières nations en Amérique du Nord avant le contact européen. Actes de sessions présentées au X<sup>e</sup> congrès annuel de l'Association Européenne des Archéologues (Lyon, 8-11 septembre 2004) » (C. Bressy, A. Burke, P. Chalard and H. Martin, eds), pp. 23-28. ERAUL Liège. 23-28.
- Rendu W., 2007. Planification des activités de subsistance au sein du territoire des derniers moustériens. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, Bordeaux. available online at <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00444154/fr/>
- Rendu W., 2010. Hunting behavior and Neanderthal adaptability in the Late Pleistocene site of Pech-de-l'Azé I. *Journal of Archaeological Science*, **37**, 8, 1798-1810.
- Rendu W., Costamagno S., Meignen L., Soullier M.C. (in press). Monospecific faunal spectra in Mousterian contexts: implications for social behavior, Quaternary international.
- Rendu W. et Armand D. (2009). Saisonnalité de prédation du Bison du gisement moustérien de La Quina (Gardes-le-Pontaroux,



Charente), niveau 6c. Apport à la compréhension des comportements de subsistance. *Bulletin de la Société Préhistorique de France* **106**, 679-690.

- Speth J. D. (2006). Housekeeping, Neanderthal-Style: Hearth Placement and Midden Formation in Kebara Cave (Israel). In "Transitions Before the Transition Evolution and Stability in the Middle Paleolithic and Middle Stone Age (2005)" (Hovers E. ; Kuhn S) Springer, 171-188.

- Speth J. D., Tchernov E. (1998). The role of hunting and scavenging in neanderthal procurement strategies. New evidence from Kebara Cave (Israel). In "Neanderthals and Modern Humans in Western Asia." (T. e. a. Akazawa, éd.), pp. 223-238. Plenum Press, New York. 223-238.

- Speth J. D., Tchernov E. (2001). Neanderthal hunting and meat-processing in the Near East: Evidence from Kebara cave (Israel). In "Meat-Eating and Human Evolution" (C. B. Stanford and H. T. Bunn, eds), pp. 52-72. Oxford University Press, Oxford. 52-72.

- Speth J. D., Tchernov E. (2008). The Middle Paleolithic occupations at Kebara Cave: a faunal Perspective. In "Kebara cave Mt. Carmel, Israel. The Middle to Upper Paleolithic Archaeology, Part 1" (Bar-Yosef O., Meignen L.). Peabody university press, Harvard, University, American School of Prehistoric Research, 49, 165-260.

- Speth J. D., Clark J. M. (2006). Hunting and overhunting in the Levantine Late Middle Palaeolithic. *Before Farming* 2006/3 :1.

- Straus L. G. (1983). From Mousterian to Magdalenian: cultural evolution viewed from Vasco-Cantabrian Spain and Pyrenean France. In "The Mousterian Legacy" (E. Trinkaus, éd.), pp. 73-111. International Series BAR New-York. 73-111.

- Straus L. G. (1997). Late glacial reindeer hunters along the french Pyrenees. In "Caribou and Reindeer Hunters of the Northern Hemisphere" (L. J. Jackson and P. T. Thacker, eds), pp. 165-184. Avebury Press, Aldershot. 165-184.

- Stutz A. J. (2002a). "Pursuing past seasons: a re-evaluation of cementum increment analysis in paleolithic archaeology." Unpublished Ph D. thesis, Michigan. 280.

- Stutz A. J. (2002b). Polarizing microscopy identification of chemical diagenesis in archaeological cementum. *Journal of Archaeological Science* **29**, 1327-1347.

- Stutz A. J., Lieberaman D. E. (2008) Cementum increment analysis of ungulate teeth from Kebara Cave faunal assemblage. Discriminating seasonal signals from their diagenetic mimics. In "Kebara cave Mt. Carmel, Israel. The Middle to Upper Paleolithic Archaeology, Part 1" (Bar-Yosef O., Meignen L.). Peabody university press, Harvard, University, American School of Prehistoric Research, 49, 261-278.

- Valladas H., Mercier N., Joron J. L., Reyss J. L. (1998). GIF laboratory dates for Middle Palaeolithic Levant. In "Neanderthals and Modern Human in Western Asia" (Akazawa T., Aoki K., Bar-Yosef O., eds), New York, Plenum Press, 69-76.

- Vandermeersch B. (1995). Le Rôle du Levant dans l'évolution de l'humanité au Pléistocène supérieur *Paléorient* **21**, 25-34.

In the 80's, the first studies which concerned Neanderthal subsistence strategies viewed them as mediocre hunters, unable to hunt large Herbivores (Binford, 1984, 1988, 1989; Klein, 1989). Their subsistence is described as based on scavenging and low-energy-return resources. However, this hypothesis was based more on preconceived opinions than on archaeological facts (Speth, 2004) and founded on scientific data that we know now to have been obtained by inadequate analytical methods and/or biased material (Grayson and Delpech, 1994; Marean, 1998; Marean and Assefa, 1999; Bartram and Marean, 1999).

Since then, a growing amount of zooarchaeological study has proved that Neanderthals subsisted primarily by hunting large Herbivores coming from a variety of environments (e.g.: Jaubert *et al.*, 1990; Brugal and David, 1993; Brugal, 1999a, 1999b; Grayson and Delpech, 1994; Auguste, 1995; Gaudzinski, 1995, 1999, 2000; Speth and Tchernov, 1998, 2001, Costamagno *et al.*, 2006).

Although the hypothesis which suggests that the human populations prior to AMH were unable to hunt large Mammals is now mostly rejected, the existence of specialized hunting strategies (following the definition of F. David and J. D. Enloe, 1993) among Neanderthals is still debated by numerous authors (Mellars, 1973, 1989, 1996, 2004; Strauss 1983). "The concept of specialized hunting in Upper Paleolithic context refers to the communal hunting of large numbers of

animals and the processing of meat for storage (David and Enloe, 1993). The existence of this type of strategy, which requires a considerable degree of collaboration between hunters and the anticipation of prey movement, is still far from being accepted for the Neanderthals (Binford, 1989; Morin, 2004; Strauss, 1992, 1997; Mellars, 1996)” (Costamagno *et al.*, 2006). In this context, scholars have put forth the hypothesis that Neanderthals were unable to undertake organized and collective hunts with the goal of producing a surplus for storage. This low degree of resource scheduling and planning would also imply the absence of specialized activities (and therefore sites) in the territory they exploited.

Neanderthal use of their environment is thus seen by these authors (both considering predation and lithic raw material use) as being opportunistic, excluding all possibility of longer-term planning. Compared to their successors, these differences serve as the evidence for their cognitive inferiority.

The spatial organization of activities in the Neanderthal’s territory has often been examined through the study of stone tool production and by the economy of raw material acquisition and use (Geneste, 1985; Kuhn, 1995). However, Neanderthal spatial organization has not been well studied with regard to their hunting behavior (Chase, 1986; Farizy *et al.*, 1994; Meignen *et al.*, 1998; Costamagno *et al.*, 2006). These rare studies have, however, called into question the validity of the hypothesis of lack of planning depth and have proposed the existence during the Mousterian of complex landuse strategies. Those were characterized, notably, by the use of communal hunting strategies and reliance on food storage in anticipation of future needs. Moreover, the organization of these activities was clearly structured in both time and space.

Given this background, the seasonality of hunting is obviously a key factor for identifying and understanding both the spatial and temporal organization of the subsistence economy. To consider hunting and management of food resources, without first taking into account the seasonality of their procurement, severely handicaps any attempt to study the subsistence economy of hunters-gatherers. Yet, for the Neanderthals, this issue has been rarely addressed (Lieberman, 1993, 1994; Armand *et al.*, 2001; Wall, 2005).

The Levant is at the interface between the ecosystems of the Neanderthals and the Anatomically Modern Humans, who seem to have occupied alternately that same region. Moreover, it constitutes a migratory corridor and a necessary and established route for the populations that came out of the African continent. The Neanderthals from the Near East have often been described both biologically and culturally as different from their western homologues (*e.g.*: Bar-Yosef et Vandermeersch, 1991; Vandermeersch 1995; Mann, 1995). For these reasons, the study of the Near East is critical to have the best understanding of the processes that led to *cultural modernity*.

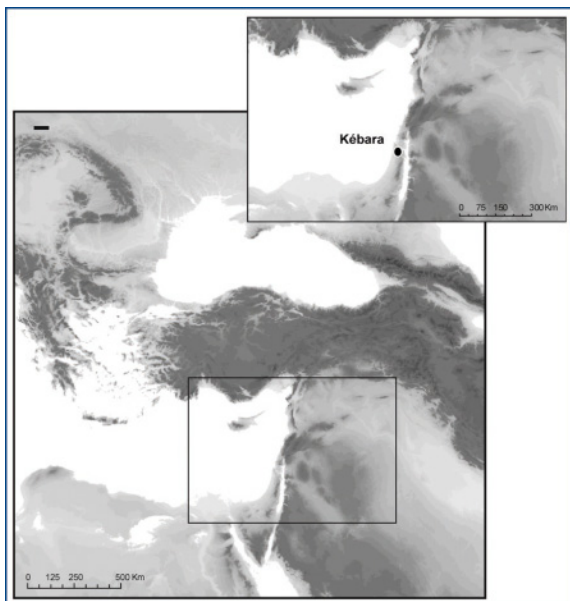
Through the study of the seasonal hunts from Kebara (Israël), this work proposes to bring new insights to the scheduling capacities of the Levantine Neanderthal societies.

### Kebara cave

Located on the west side of the Carmel mount, Kebara cave is a large cavity which was the subject of numerous excavations (Bar-Yosef, 1991; Bar-Yosef et al 1992). Those field campaigns yielded numerous archaeological levels including several Middle Paleolithic units related to the MIS 3 (Valladas, 1987). Thousands of lithic and faunal elements were discovered within these deposits, which also delivered some fireplaces (*e.g.*: Meignen *et al.*, 2008; Albert *et al.*, 2010) and some vegetal remains (Lev *et al.*, 2005). The site is also famous for the discovery of a Neanderthal burial with a secondary intervention, suggesting the existence of some complex symbolic behaviors within the concerned populations (Bar-Yosef et Vandermeersch, 1991).

The zooarchaeological analysis has highlighted a faunal spectrum largely dominated by the gazelle and the fallow deer, associated with wild pig, red deer and aurochs (Speth et Tchernov, 2001, 2008; Speth et Clark, 2006). The mousterian hunters had developed some original hunting strategies by applying a differential selection between gazelle and deer. While they had focused on the gazelle females, they seemed to hunt equally the two deer genders and the mortality profile follows a catastrophic pattern confirming the low selection for this specie (Speth and Tchernov, 2008; Speth and Clark, 2006). The small bovids would have been hunted during the rainy season (Speth et Tchernov, 2008; Speth and Clark, 2006; Lieberman, 1993; Lieberman and

Stutz, 2008), when they were gathered and easy to localize, while fallow deers were dispersed within the environments. Thus, Speth and Clarks (2006) have suggested that the differential exploitation might be the consequence of two different seasonal behaviors.



**Figure 1:** Kebara localisation. Map modified from Amante et Eakins, 2009.

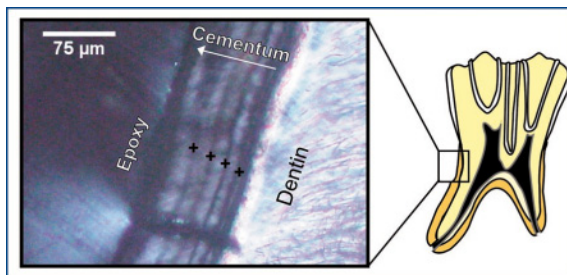
The present study has for objectives to test this hypothesis by a seasonal analysis focused on the deer remains. Twenty-two inferior left third premolars (representing 24% of the MNI made by Speth and Clark, 2008) were selected for a skeletochronological analysis.

**Skeletochronology**

Cementum is a mineralized dental tissue, connecting the tooth root to the alveolar bone (Burke and Castannet, 1995; Diekwisch, 2001; Lieberman et Meadow, 1992). In many mammalian populations, its growth follows predictable seasonal cycles (Fig. 2) with an alternation of a fast-growth deposit during the warm season and a slow-growth deposit during the poor season (Klevezal’ et Kleinenberg, 1969; Klevezal’ and Pucek, 1987; Klevezal’, 1996; Lieberman et Meadow, 1992, Burke et Castannet, 1995). The outermost increment, forming at the time of death, is expected to give precise estimation of the season of death.

The techniques used in the dental seasonal increment analysis of the ungulates teeth employ

polarized light microscopy and follow the protocol generally used (Pike-Tay et al., 2008; Wall, 2005). At least two standard ground thin sections per sample taken at the mesiodistal midline of the tooth are prepared.

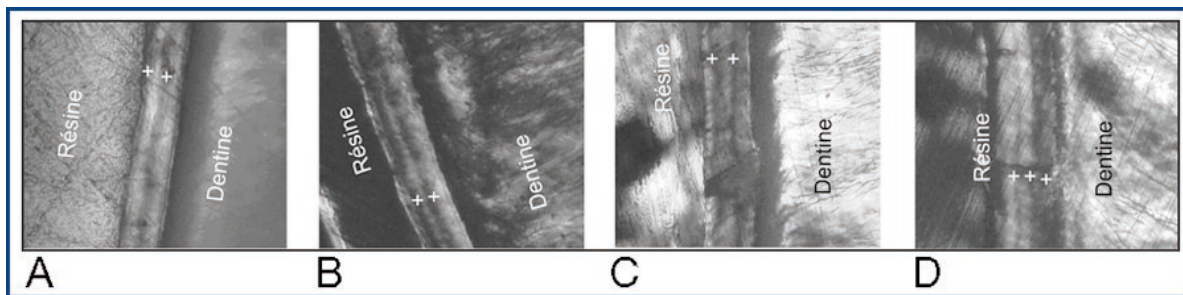


**Figure 2:** Ungulate teeth drawing. In grey: cémentum. Picture of cementum increments observed under a polarized microscope. The «+» localized the *annuli*.

The observations are conducted under polarized transmitted light microscopy (common magnification included x40, x100 and x200). Weathering alteration and diagenesis modifications are systematically looked for with the use of lambda plate according to the specifications of Stutz (2002a, 2002b) in order to assess the integrity of the outermost cementum increment and discard the altered teeth from the analysis. The estimation of the season of death follows the classical method developed by previous researchers (Pike-Tay, 1991; Martin, 1994; Rendu, 2006, 2007, 2010) based on the identification of the nature of the last deposit and, when it is a fast growth increment, its relative width compared to the previous identical increment (Tabl. 1, Fig. 3).

**Table 1: seasonal terminology used for the analysis (after Rendu and Armand, 2009)**

Nature of the last increment	Stade of growth	« <i>interpretative season</i> »
<i>Zone</i>	Beginning of croissance	Beginning of the <b>warm season (DBS)</b>
	Middle of croissance	Middle of the <b>warm season (MBS)</b>
	End of croissance	End of the <b>warm season (FBS)</b>
<i>Annulus</i>		Cold season ( <b>MS</b> )



**Figure 3:** Picture of cementum increments observed under a polarized microscope at 4 different stage of growing. The «+» localized the *annuli*. A) Cold season; B) Beginning of the warm season; C) Middle of the warm season; D) End of the warm season.

## Results

More than forty thin sections have been realized and analyzed under a polarized microscope at the Museum of Anthropology from the University of Michigan (Ann Arbor, USA) and at the Toulouse University (Toulouse, France).

More than 50% of the thin sections exhibit some diagenesis modifications. In most of the cases, they consist on some transversal cracks of the cementum deposits with a limited impact on the observation of the material. However, several post mortem modifications of the seasonal record such as recrystallization can be seen. This type of alteration have already been recognized on the gazelle teeth from the same layers (Stutz, 2002a, 2002b, Lieberman and Stutz, 2008).

The preliminary results underlined that for most of the teeth (NMI=16) the last increment is a fast growth deposit. In three others cases, it wasn't possible to completely exclude that a fast growth deposit was beginning to appear before the death of the individuals.

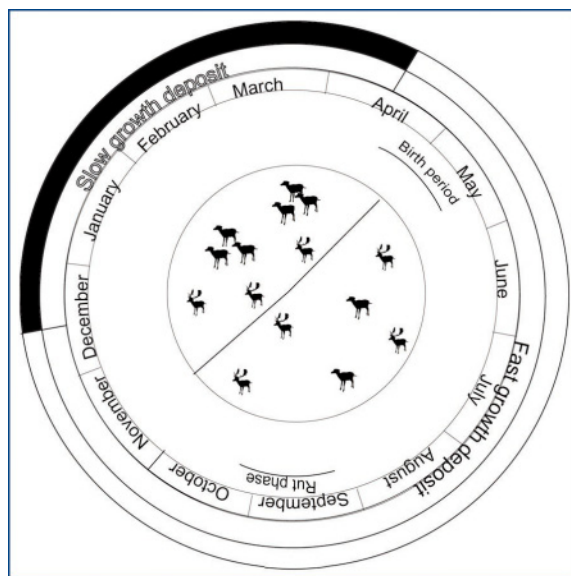
The low numbers of analyzed teeth cannot allow to treat the stratigraphic unit independently. However by taking into account the lack of variation of the seasonal results through the stratigraphy, a global interpretation can be advanced.

To which part of the year cycle does this phase of metabolism slowness corresponds? For a particular environment, the seasonal growing rhythm is generally the same within a particular taxa (Klevezal' and Kleinenberg, 1969; Klevezal', 1996; Grue and Johnson, 1976; Pike-Tay, 1991) suggesting that the period of beginning and end of an annulus is the same. Thus, for most of the deer in the northern hemisphere (e.g.: Pike Tay,

1991, 1995; Martin, 1994), the fast growth deposit is formed from the end of autumn to the beginning of spring. Consequently, the fallow deer hunting had occurred during the rainy season.

## The fallow deer hunt

The confrontation of the skeletochronological results with the ethological data helps for the understanding of the hunting strategies developed by the Neanderthal population (Fig. 4). The hunting season corresponds to a phase during which fallow deers are submitted to some major ethological and biological stresses.



**Figure 4:** results of the skeletochronological analysis (in black) compared to the seasonal cycle of the fallow deer. The fallow deer figurines represent the period when the animals are gathered or dispersed in their environment.

Indeed, the females, usually solitary, begin to gather themselves in small herds. These groups exhibit a high mobility pattern since they stop to feed their calves which begin to be more autonomous. On the opposite males still preserved their solitary life.

At the end of the dry season, numerous biological transformations happened within the deer populations. They induced major changes in the raw materials (skin, meat, marrow and grease) exploited by the hunter-gatherers. The males are weakened by the rut and their meat weight is at its lowest level (*e.g.*: Asher *et al.*, 2005; Appolinio and Di Vittorio, 2004). Progressively, during the rainy season, their weight increases significantly to be at its maximum at the end of the winter (Apollonio et Di Vittorio, 2004).

On the opposite, the females have eaten during the warm season and regained the weight lost during the parturition period (at the beginning of the warm season). Their weight continues to raise to reach its optimum at the end of the rainy season (Appolinio et Di Vittorio, 2004). In the same time, the juveniles have in their first year constituted their grease stocks.

The deer hunting season, identified by the skeletochronological analysis, corresponds to the period of the year during which the whole population presents its optimal physical condition, confirming the previous results (Speth and Tchernov, 2008).

This result suggests that the Kebara inhabitants might have decided to hunt this particular prey for economical reasons (quality of the meat) but also for strategic ones by using the fact that the animals were gathered in small herd, optimizing their exploitation (Speth et Clark, 2006).

### A specialized hunter

The fallow deer wasn't the only prey of these group and to understand its exploitation, we have to consider the present results in their zooarchaeological context. Indeed, the major prey of the Mousterian hunter was the gazelle. Speth and Clarks (2006) highlighted a hunting focused on the female adults. All the seasonal studies proposed for this taxon a slaughter principally centered during the winter and the spring (Speth et Tchernov, 2008; Lieberman, 1993; Stutz, 2008; Stutz and Lieberman, 2008), when they were at their physical optimum.

Consequently, it seems that a selective hunt was developed at Kebara and the prey quality (in term of meat quality and quantity) was the key factor (Speth and Tchernov, 2001, 2008; Speth and Clark, 2006). It can be seen as an evidence of the excellent hunting capacity of the Kebara Neanderthals. This observation finds an interesting echo in the hunt of the large ungulates (red deer and aurochs). The hunter seems to have been sufficiently efficient to have had practiced an overhunting of these games in the same area (Speth et Clark, 2006). However, although they were able to hunt them, they would not have been suitably careful to avoid their disappearance in the local environment.

The adaptation of the selection towards the seasonal constraints have already been proposed as a characteristic of the hunting behaviors for the European Neanderthal at the end of the Middle Palaeolithic.

In the Pech-de-l'Azé I site, in relationship with the hunting seasons, Neanderthals have differentially exploited red deer males and females (Rendu, 2010). Nonetheless, whereas at Kebara they selected the prey in the best physical condition, at Pech-de-l'Azé I, only the weaker mammals were slaughtered. Thus in this second case, it seems that the easiness of the hunting was the key factor in the prey selection (Rendu, 2007, 2010).

### Site occupation

By taking into account the archaeological context of the site, the seasonal data help for sustaining the site use hypothesis already proposed (Meignen *et al.*, 2006). The lithic analysis attests that the whole "*chaîne opératoire*" was realized in the site. The lack of exogenous material (Meignen et Bar-Yosef, 1991, 1992), the high density of the archaeological artefacts and the spatial organization of the activities (see for example Speth, 2006), suggest that the site was used as a base camp (Meignen *et al.*, 2006). Considering the gazelle and the deer hunting seasons (Speth et Tchenrov, 2001 et Lieberman, 1993), the exploitation of the cave during the winter can be advanced.

The peculiar position of the site, at the junction of the Carmel hills and the coastal plains offered to the Kebara inhabitants the possibility to exploit different biotopes for the capture of the

gazelle and the deer in their wintering area during the rainy season.

The recurrent use of the cave, each winter, for the hunt of games in their best physical conditions underlined the high need anticipation of the hunters. Moreover, these results confirm the year round organization of the hunting activities in the aim to optimize the food stock management.

By taking into account the lack of evolution in the artefact production, (Meignen and Bar-Yosef, 1991, 1992; Meignen *et al.*, 2006) and the continual use through the whole occupation time of some task specific areas within the site (hearth, butchery area), a certain sustainability of the activity appears plausible (Meignen *et al.*, 2006).

### Conclusion

This analysis based on the Middle Palaeolithic deposits from Kebara cave bring new insights on the fallow deer hunting strategies and help to understand the modalities of prey selection. Here we proposed a hunt during the winter in the aim to capture the deers in their best physical conditions to constitute some food stocks. By this seasonal selection of the prey, it appears that the Levantine Neanderthal shared some subsistence trends with their occidental cousins. This subsistence was characterized by a high degree of scheduling of the hunting activities associated with marked need anticipations.

However, differences between these two populations can be evidenced. In Western Europe,

communal hunts seem to have played a major role for some different Neanderthal groups, as it is attested by the numerous task specific locations devoted to the kill or the prey butchery (for a detailed review see Delagnes and Rendu, 2011). On the opposite, it seems that this strategy was less used by the Levantine populations.

Excepted for the gazelle, the Levantine ungulates seem to have been mostly solitary, while the European ones, such as the reindeer and the bison slaughtered in great number of individuals in Western Europe, were gregarious. This difference in the ethological behavior might explain some differences in the hunts which would be more the consequence of some environmental factor that the result of some cultural choices.

### Acknowledgements

My sincere gratitude to the Fyssen Foundation for its supports as well as to the Museum of Anthropology for its help in my reasearch. This work would not have been possible without the numerous and valuable discussions I had with John Speth. Thank you to Dan Fisher for his support. I wish to thank Sandrine Costamagno, Olivier Le Gall, Laurence Bourguignon, Cédric Beauval, Anne Delagnes and Liliane Meignen for their help. I am sincerely gratefull to Pr O. Bar Yosef for having allowed me to access to the collection. Thank you to R. Rabinovitch, E. Hovers and to the Hebrew University members for their precious assistance.

## BIBLIOTHÈQUE

Nous remercions vivement les généreux donateurs avec lesquels nous échangeons nos Annales :

Académie Royale de Médecine de Belgique	Bulletins et mémoires : Vol. 165/2010 N° 10-11-12 Vol. 166/Annuaire 2011 Vol 166/2011 N°1 à 4
ANRS/Agence Nationale de Recherches sur le Sida et les Hépatites Virales	Rapport d'activité 2010
IIAS/International Institute for Asian Studies	Newsletter N°57 – Summer 2011 Newsletter N°59 – Spring 2012
John Benjamins Publishing Company	Cognitive Science 2012 New Titles : Fall 2011, Spring 2012 Journals 2012
Max Planck Research	Science Magazine N° 2 à 4/2011
MNHA/Musée national d'histoire et d'art Luxembourg	Patrimoine historique et culturel en forêts luxembourgeoises, Das frükaiserzeitliche Mausoleum von Bartringen (Luxembourg) 2009, Productions lamellaires attribuées à l'Aurignacien A1 - 2005, Burins préhistoriques : formes, fonctionnements, fonctions A2 - 2006, Archaeologia Mosellana - 7/2007, Unter unseren Füßen - Sous nos pieds - 2011, Préhistoire et Protohistoire au Luxembourg - 1 - 2005, Feulen - Dossiers d'Archéologie IX - 2006, Le Rubané au Luxembourg - Dossiers d'Archéologie X - 2006, Fibeln vom Titelberg - Dossiers d'archéologie XI - 2007, Goebloge - Nospelt - Dossiers d'archéologie XIII - 2009.
Préhistoires méditerranéennes	<i>"Préhméd."</i> 2010
Société des Neurosciences	La lettre des Neurosciences N°41 - Automne/Hiver 2011
Tel Aviv University Review	2012 Issue
The International Institute of Humankind Studies	Fascicule "L'Uomo fra passato e futuro"
University of Florence	Ludus Vitalis Vol. XVIII, num. 34, 2010

## BIBLIOTHÈQUE

Universidad de Granada

Cuadernos de Prehistoria y arqueología  
Nº20 - 2010,  
La investigación experimental aplicada a la arqueología -  
Octubre 2011,  
Florentia Iiberritana 2011.

Universidad de Magallanes

Magallania, Vol. 39/2011, Nº 1 et 2

Nous remercions pour leur collaboration les auteurs soutenus dans leurs travaux de recherche par la Fondation Fyssen, nos lecteurs pour leur fidélité, et tous nos correspondants et bibliothèques qui permettent la libre consultation de notre revue.

We thank for their collaboration the authors supported in their research works by the Fyssen Foundation, our readers for their fidelity, and all our correspondents and libraries which allow the free consultation of our review.



Achévé d'imprimer en septembre 2012  
sur les presses offset de l'Imprimerie Maury S.A.S.  
Z.I. des Ondes - 12100 Millau  
Dépôt légal : septembre 2012  
N° d'impression : I12/35460A

*Imprimé en France*

