Directeur de la publication : Daniel LALLIER

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

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

Copyright : Les Annales de la Fondation Fyssen 2014
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.

Activités de la FONDATION FYSSEN

La FONDATION FYSSEN a pour objectif de promouvoir la recherche et l'étude scientifique des mécanismes logiques du comportement chez les êtres vivants et leur développement ontogénétique et phylogénétique. Elle s'intéresse plus particulièrement aux processus cognitifs chez l'homme et chez les animaux, ainsi qu'aux fondements biologiques et culturels de ces processus.

Cette Fondation soutient toutes les recherches qui permettront de rendre rigoureux et précis ce domaine fondamental qui fait appel à des disciplines telles que l'éthologie, la paléontologie, l'archéologie, l'anthropologie, la psychologie, la logique et les sciences du système nerveux.

La Fondation Fyssen a été reconnue d'utilité publique par décret du 20 mars 1979 et porte le nom de son Fondateur, Monsieur Fyssen, intéressé depuis toujours par la compréhension scientifique de ces questions.

En 1982, Madame A.H. Fyssen lui a succédé à la Présidence de la Fondation. Elle est décédée en 2003.

La Fondation Fyssen a mis au point un dispositif original pour soutenir les sciences cognitives dans les domaines définis plus haut. Il comprend :

– des **ALLOCATIONS POST-DOCTORALES**, qui permettent la formation de jeunes chercheurs français ou étrangers, titulaires d'un doctorat étranger, qui souhaitent réaliser leur projet dans des laboratoires en France ou à des chercheurs, français ou étrangers et titulaires d'un doctorat français, qui souhaitent réaliser leur projet dans un laboratoire étranger ;

– des **SUBVENTIONS DE RECHERCHE**, destinées à des chercheurs français ou étrangers, pour réaliser un projet scientifique collectif au sein d'un laboratoire d'accueil en France dont l'activité entre dans les objectifs de la Fondation ;

Toutes les modalités de ces deux programmes sont disponibles sur le site internet de la Fondation.

– des **COLLOQUES**, des **SÉMINAIRES**, des **PUBLICATIONS** sur des thèmes jugés importants pour atteindre les buts de la Fondation ;

– la parution annuelle des « **ANNALES FYSSEN** » qui comportent des articles originaux dans les domaines soutenus par la Fondation ;

– un **PRIX SCIENTIFIQUE INTERNATIONAL** destiné à couronner une découverte, ou l'ensemble d'une œuvre scientifique, ayant contribué d'une manière décisive aux progrès de la connaissance dans les domaines de recherche soutenus par la Fondation. Ce Prix est attribué chaque année à un chercheur de réputation internationale.

L'ensemble de ce dispositif doit permettre à la Fondation Fyssen d'agir efficacement pour contribuer au développement de la recherche scientifique. Pour sa mise en œuvre, la Fondation dispose d'un Conseil d'Administration qui inclut scientifiques, juristes, financiers et hauts fonctionnaires, et d'un Conseil Scientifique.

Le Conseil Scientifique est chargé de lancer des appels d'offres pour remplir les buts de la Fondation, d'évaluer la qualité des projets qui lui sont soumis, de suivre le déroulement des travaux qui bénéficient du soutien de la Fondation et enfin de désigner le lauréat du Prix International de la Fondation Fyssen.

CONSEIL D'ADMINISTRATION AU 01/11/2015

Monsieur Daniel LALLIER, Président,

Inspecteur Général des Finances Honoraire désigné par le Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie

Monsieur Bernard ZALC, Vice-Président,

Directeur de Recherche Emérite à l'Institut du Cerveau et de la Moelle épinière

Madame Jeanne-Marie PARLY, Trésorière,

Ancien Conseiller d'État en service extraordinaire

Monsieur Stanislas de NANTEUIL, Secrétaire,

Administrateur de biens désigné par l'Union des Syndicats de l'Immobilier

Madame Catherine BRUN LORENZI,

Avocat à la Cour, désignée par l'Ordre des Avocats du Barreau de Paris

Madame Sylvie CENDRE, Représentante du Ministère de l'Intérieur,

Direction des libertés publiques et des Affaires juridiques

Monsieur Jean-Claude HASSAN, Conseiller d'État,

Membre du Collège de l'Autorité des Marchés Financiers

CONSEIL SCIENTIFIQUE AU 01/11/2015

Monsieur Daniel LALLIER,

Président

Monsieur Carlo SEVERI (Anthropologie), Vice-Président,

Directeur d'Etudes à l'E.H.E.S.S., Paris, France

Monsieur Josep CALL (Primatologie),

Professeur de psychologie à l'Université de St Andrews, Écosse,
Directeur du Centre de Recherche Wolfgang Köhler Primate
au Max Planck Institut, Leipzig, Allemagne

Madame Patrizia D'ETTORRE (Ethologie),

Professeur à l'Université Paris 13, France

Monsieur Vittorio GALLESE (Neurophysiologie),

Professeur à l'Université de Parme, Italie

Madame Sonia GAREL (Neurobiologie),

Directeur de Recherche à l'Institut de Biologie,
Ecole Normale Supérieure, Paris, France

Monsieur Jonathan GRAINGER (Psychologie cognitive),

Directeur de Recherche CNRS, Laboratoire de Psychologie Cognitive
Aix-Marseille Université, Marseille, France

Monsieur Patrick HAGGARD (Neuropsychologie cognitive),

Professeur à l'University College de Londres, Grande-Bretagne

Monsieur Carl KNAPPETT (Technologie et Histoire des Techniques),

Professeur à l'Université de Toronto, Canada

Monsieur Heonik KWON (Anthropologie Sociale),

Professeur au Trinity College, Cambridge, Grande-Bretagne

Monsieur Jay STOCK (Archéologie-Évolution humaine et développement),

Maître de conférences à l'Université de Cambridge, Grande-Bretagne

Madame Nathalie ROUACH (Neurobiologie),

Directeur de Recherche 2, Inserm, Collège de France, Paris, France

COMITÉ DE LECTURE

Professeur Laurent COHEN,

Professeur de Neurologie, Hôpital de la Salpêtrière, ICM, Paris

Professeur Martin GIURFA,

Directeur du Centre de Recherches sur la Cognition Animale
CNRS – Université Paul Sabatier Toulouse

Docteur Julie GREZES,

Directeur de Recherche INSERM,
Laboratoire de Neurosciences Cognitives INSERM U960,
Institut des Sciences Cognitives, École Normale Supérieure, Paris

Docteur Hélène ROCHE,

Directeur de Recherches Emérite,
UMR 7055, CNRS Université Paris Ouest Nanterre

Professeur Carlo SEVERI,

Directeur de recherches CNRS,
Directeur d'études, EHESS, et membre du LAS (Collège de France) Paris

ANTHROPOLOGIE / ETHNOLOGIE – ANTHROPLOGY / ETHNOLOGY

OTAEGUI Alfonso :

Le tamis triste des chants
Sur les traductions altérées des évènements chez les Ayoreo du Chaco paraguayen 9

The Sad Sieve of Songs
On Distorted Translations of Events among the Ayoreo from the Paraguayan Chaco 18

YVINEC Cédric :

Les variations des représentations du monde surnaturel dans les discours religieux en Amazonie indigène 26

Variations in the representations of the supernatural world in religious discourses in indigenous Amazonia 37

ETHOLOGIE / PSYCHOLOGIE - ETHOLOGY / PSYCHOLOGY

GANDON Enora :

Dans quelle mesure les habiletés motrices traditionnelles reflètent-elles un modèle culturel ? Expérimentations de terrain auprès de potiers experts français et indiens 47

To what extent do traditional motor skills reveal a cultural model ? Fields experiments with expert French and Indian potters 59

GLADY Yannick :

Le raisonnement par analogie chez l'Humain (*Homo sapiens*), le Chimpanzé (*Pan troglodytes*) et le Capucin Brun (*Cebus apella*) 69

Analogical reasoning in Humans (*Homo sapiens*), Chimpanzees (*Pan troglodytes*) and Brown Capuchins (*Cebus apella*) 78

HARTCHER O'BRIEN Jessica :

L'invariance comme une mesure objective de l'attribution distale en perception tactile ? 86

Invariance as an objective measure for distal attribution in touch? 94

NEUROBIOLOGIE - NEUROBIOLOGY

MEYE Frank Julius :

Rôle de l'habenula latérale dans les symptômes d'abstinence à la cocaïne 100

The role of the lateral habenula in cocaine withdrawal symptoms 108

PERRENOUD Quentin :

Dynamiques intracellulaires sous-tendant l'émergence des oscillations gamma au niveau des interneurones corticaux exprimant la parvalbumine 115

Intracellular dynamics underlying the emergence of gamma oscillations in parvalbumin expressing cortical interneurons 121

PALÉONTOLOGIE / ARCHÉOLOGIE – PALEONTOLOGY/ ARCHAEOLOGY

COQUERELLE Michael :

L'origine du menton des hommes modernes revisitée via la comparaison des changements ontogénétiques entre primates humains et non-humains 127

The origin of the human chin revisited through comparison of ontogenetic changes between human and non-human primates 136

GOMART Louise :

Quels facteurs d'émergence du premier Néolithique d'Europe tempérée ?
Apports de l'approche anthropologique d'assemblages céramiques du Néolithique ancien et moyen de Hongrie 143

What factors of emergence of the first Neolithic in temperate Europe ?
Contribution of the anthropological approach of ceramic assemblages from the early and middle Neolithic in Hungary 153

QUINTANA MORALES Eréndira :

Pêche sur la côte d'Azanie : Exploration des premières adaptations côtières d'Afrique orientale par l'étude des restes de poissons de sites du premier millénaire de notre ère 161

Fishing on the Azanian coast: Exploring early eastern African coastal adaptations through the study of fish remains from first millennium CE sites 170

BIBLIOTHÈQUE 177

Le tamis triste des chants
Sur les traductions altérées des événements chez les Ayoreo du Chaco paraguayen

Alfonso OTAEGUI

Chercheur postdoctoral à l'Institut de Sciences Anthropologiques, Université de Buenos Aires, Argentine

Résumé

Cette communication fait partie de notre recherche actuelle sur les rapports sociaux et les chants profanes des Ayoreo du Chaco boréal paraguayen. Nous avons montré que l'organisation sociale chez les Ayoreo n'est pas fondée sur des règles et des structures sociales rigides, mais sur l'évaluation morale des interactions domestiques quotidiennes, où le discours structuré joue un rôle central. Dans le présent travail, nous décrivons un chant biographique d'amour *irade* comme version altérée d'une dispute *pojnaquei* et nous expliquons pourquoi cette « altération contrôlée » se rapporte à l'éthique ayoreo de la convivialité, dans laquelle le concept de *jnusietigai* (« nostalgie ») est fondamental. Nous suggérons que le chant est une « traduction intralinguistique » de l'évènement rapporté, vu que la composition poétique reformule, contient et paraphrase l'interaction originelle.

Mots-clés

Ayoreo, chant, traduction, *relatedness*, nostalgie

The Sad Sieve of Songs
On Distorted Translations of Events among the Ayoreo from the Paraguayan Chaco

Abstract

This paper stems from my current research on social relations and profane songs among the Ayoreo from the Northern Paraguayan Chaco. I have shown that social organization among the Ayoreo is not based on rules and rigid social structures, but on the moral evaluation of everyday domestic interactions, where patterned speech plays a central role. In this opportunity I address a biographical love song '*irade*' as an intentionally distorted account of a dispute '*pojnaquei*', and explain why this 'controlled distortion' is related to the Ayoreo ethics of conviviality, where the concept of *jnusietigai* ('nostalgia') is fundamental. I suggest that the song is an 'intralingual translation' of the reported event, given the fact that the poetic composition reformulates, contains and paraphrases the original interaction.

Keywords

Ayoreo, song, translation, relatedness, nostalgia

1. Les Ayoreo, leur vie et leurs chants

Les Ayoreo sont d'anciens chasseurs-cueilleurs du Chaco boréal, dont la plupart travaille comme ouvriers agricoles dans les fermes autour de leurs communautés. Actuellement, la population des Ayoreo compte environ 5 000 individus, dont la moitié se trouve en Bolivie et l'autre moitié au Paraguay. Les Ayoreo ont eu des contacts avec des missionnaires et des mennonites dans les années 1950 et dès lors, ils sont

progressivement devenus sédentaires. Malgré le contact intensif avec l'homme blanc, les Ayoreo parlent encore leur propre langue, *Ayoreode uruode* (famille linguistique Zamuco). Nous avons mené notre enquête ethnographique au sein de la communauté de Jesudi, située sur le chemin de terre qui marque la limite entre les départements de Boquerón et d'Alto Paraguay, à 75 kilomètres au nord de la colonie mennonite de Filadelfia (Paraguay), de 2008 à 2011.

Dans cette petite communauté, composée de sept unités résidentielles, presque tout se passe à la vue de tous. La vie quotidienne se déroule généralement à l'extérieur des maisons qui restent vides toute la journée. Devant la maison et autour du feu, les femmes tissent leurs sacs de fibre de *caraguatá*, les enfants jouent et les hommes s'assoient – quand ils ne travaillent pas. Ils restent là, boivent du *tereré*, parlent et chantent. Les nouvelles – travail, santé et commérages – circulent à l'intérieur des unités résidentielles, entre elles et aussi entre des communautés éloignées par le biais de la radio UHF, de messages enregistrés sur des cassettes et, dans les dernières années, à travers l'utilisation des téléphones portables.

Des tensions sociales et politiques émergent fréquemment à l'intérieur de la communauté à propos de l'administration des ressources, telles que le travail pour les mennonites, la vente du bois et des produits artisanaux ainsi que la « chasse » aux projets des ONG (von Bremen 1994). Les Ayoreo – comme beaucoup d'autres groupes des basses terres sud-américaines – ont une tendance à la fission et à la migration comme stratégies principales pour faire face à la tension sociale interne (Alexiades 2013). Jesudi, par exemple, a été fondée en 1989. Ensuite, dûes à des fissions internes successives de Jesudi et de nouvelles fondations, trois nouvelles communautés ont été formées : Ogasui (1992), « 2 de enero » (2009) et « 15 de septiembre » (2010).

Le concept de *jnusietigai* (« nostalgie ») est très pertinent dans la vie sociale des Ayoreo. En fait, « manquer à quelqu'un » peut être décrit comme un processus social, car ce n'est pas tout

Photo 1 : Archivo Centro Cultural del Lago (CCDL, Areguá, Paraguay)

simplement qu'un individu ressente la perte ou l'absence de quelqu'un d'autre. Des pratiques sociales spécifiques produisent des absences – par exemple, la migration après une dispute – et des genres spécifiques de la parole sont consacrés à l'expression de cet état interne – comme les chants *irade*. En dehors des migrations à la suite de conflits internes, les gens quittent la communauté pour travailler dans des fermes éloignées pendant plusieurs semaines ou plusieurs mois. Cette mobilité donne lieu à des situations d'absence et, par conséquent, de nostalgie. Les Ayoreo aiment souligner qu'« aux blancs, personne ne manque », ce qui indique que selon eux ressentir une absence – et l'exprimer à haute voix – est propre aux Ayoreo. Certaines pratiques ont pour but d'éviter les circonstances qui mènent à la nostalgie, alors que d'autres semblent renforcer ce sentiment. Il y a même une formule magique qui fait revenir quelqu'un qui est loin et dont on ressent le manque. Les vieilles femmes de Jesudi ont chanté cette formule pour inspirer chez leurs filles vivant ailleurs le désir de revenir à la communauté : la formule fait que celui dont on ressent l'absence ne se sent plus à l'aise là où il est. La dynamique de la nostalgie fait partie de l'éthique sociale ayoreo.

Toutes ces informations sur les tensions sociales et sur ceux dont on ressent l'absence trouvent leur expression dans les chants. Chanter est un aspect constitutif de la vie sociale ayoreo à Jesudi. Les Ayoreo composent une grande diversité de chants inspirés d'événements et d'émotions réels. Ils classifient les chants selon au moins sept genres, suivant le thème de la composition et l'état interne du sujet énonciateur. Tout fait social remarquable dans la vie ayoreo peut être transformé en un chant, depuis la déclaration de courage d'un guerrier victorieux jusqu'à l'expression ouverte de tristesse pour le décès d'un parent. Les hommes et les femmes chantent généralement pendant des heures le soir autour du feu, ou bien avant le lever du soleil. Quiconque peut interpréter n'importe quelle composition qui lui a plu, contribuant de cette façon à la diffusion de l'histoire racontée dans le chant. Ces chants circulent à travers les unités résidentielles et passent d'une génération à l'autre.

Photo 2 : Nostalgie – Jnusietigai (crédit : Alfonso Otaegui)

Ces compositions sont envoyées comme cadeaux sur des cassettes et interprétées lors de visites occasionnelles à d'autres communautés. Cette transmission et perpétuation des chants est intentionnelle : « écoutez attentivement et imitez mes chants » est l'introduction habituelle des messages enregistrés sur cassettes.

Nous nous focaliserons sur les chants d'amour nostalgiques *irade* parce que ce sont les chants le plus souvent composés et, par conséquent, ils constituent la base pour la mémoire sociale ayoreo. Ces compositions racontent généralement des histoires d'amour tristes : un homme est abandonné par sa femme, une mère conseille à sa jeune fille d'épouser un vieil homme pour qui elle n'a pas de sentiment, des conjoints se quittent alors qu'ils se souviennent du temps où ils s'aimaient, etc. Comme ces chants ne produisent pas d'effets dangereux – contrairement aux formules de guérison puissantes – ils peuvent être interprétés dans n'importe quelle circonstance, ce qui contribue à leur ample diffusion entre unités résidentielles et entre communautés.

2. Du fait au chant

Dans le but de comprendre le rapport entre un événement et le chant qui le raconte, nous présenterons un cas dont nous connaissions l'histoire avant qu'elle ne devienne un chant. Nous allons voir comment est présentée une séparation dans un chant *irade*, comment elle est construite, et quels événements postérieurs y sont associés. Le but de cette section est de montrer que ce qui pourrait être considéré tout simplement comme une affaire entre deux personnes a des conséquences sur le reste du tissu social de Jesudi.

Les personnages de cette histoire sont Tamocoi[1] – le fils du chef –, son épouse Lucía, sa nouvelle épouse – qui n'est pas nommée dans le chant – et la mère de Tamocoi, Jnumi. Tamocoi est un homme très actif à Jesudi : il s'entend bien avec les patrons mennonites et sait trouver des opportunités de travail. Tamocoi propose aussi des projets collectifs tels que la vente du bois, l'élevage du bétail ou l'installation d'une antenne pour regarder les matchs de foot internationaux. Sa mère, Jnumi, n'est pas moins importante dans la communauté : elle est l'architecte cachée de la structure sociale de Jesudi. Elle fait beaucoup pour la stabilité sociale de Jesudi à travers l'administration des couples : elle forme des couples, elle met en garde les filles contre la prostitution, elle atténue les disputes des couples mais parfois elle encourage aussi un couple à se séparer. Comme elle était la femme du chef, elle était responsable de la distribution équitable des dons reçus de l'État ou des ONG.

Quand je suis arrivé pour la première fois à Jesudi en 2008, Tamocoi avait 30 ans et il était marié avec Lucía. Ils avaient trois filles – Ijnamia, Apala et Tu – et un fils – Fibai. Des disputes particulièrement intenses entre ces conjoints semblaient avoir commencé vers 2009. Tout au long de cette année, Tamocoi fut infidèle à Lucía à plusieurs reprises, mais ces situations n'ont pas abouti à leur séparation. D'après ce que Tamocoi racontait à la fin de 2009, il n'avait jamais eu de problèmes avec son épouse. Avant, tout allait bien. Il avait dit cela après une série de disputes conjugales dont tout le monde avait été témoin. Cette construction d'un passé heureux en opposition au présent triste est un trait typique des chants d'amour *irade* et des chants de deuil *uñacai*. Selon Jnumi, la mère de Tamocoi, les disputes et la séparation de ce couple étaient la faute de quelqu'un d'autre. En effet, un Ayoreo avait raconté une histoire ancienne à la radio : le mythe du renard, *erapujnangue adode*, dont la simple énonciation est censée produire des effets. La narration de ce mythe en particulier provoque des infidélités et des séparations chez les Ayoreo (Otaegui 2014). À cette époque-là, la sœur de Tamocoi, Quenejna, a commencé à tromper son mari avec un autre homme marié.

En octobre 2009, les épisodes d'infidélités de Tamocoi devinrent plus évidents et se produisirent même avec des filles de Jesudi. Tamocoi et Lucía se séparaient mais, quelques semaines plus tard, reprenaient leur relation conjugale. L'instabilité du couple affecta le reste de la communauté, en particulier dû aux déménagements intermittents de Lucía entre l'unité résidentielle de son père et celle de son mari. Parfois des disputes nocturnes réveillaient toute la communauté : Lucía criait, Tamocoi partait dans la forêt tout seul, Tu – leur fille âgée de sept ans – pleurait

[1] Tous les noms des Ayoreo ont été remplacés par des pseudonymes – même dans les paroles des chants – pour protéger leur intimité.

et essayait de suivre son père ; ou bien Lucía se rendait sur le chemin avec ses plus jeunes filles Apala et Tu, afin de trouver sur le bord de la route le camion qui pourrait les conduire dans une autre communauté. Dans toutes ces occasions, Jnumi intervenait contre Tamocoi. Elle réprimandait son fils, ce qui le rendait furieux. La séparation définitive eut lieu en 2010. Lucía quitta Tamocoi et s'installa dans une communauté voisine. Quand Lucia visitait Jesudi et y restait quelques jours, elle se logeait à l'unité résidentielle de son père. Tamocoi commença à fréquenter une femme d'une autre communauté.

Fin 2010, la situation était enfin stable. Tamocoi avait une nouvelle femme et Lucía de son côté cherchait un autre homme. Tamocoi voulait s'établir à Jesudi avec sa nouvelle épouse mais Jnumi les a chassés. Jnumi a alors composé une chanson à ce sujet entre juin et novembre 2010. « *Pojna ñu dirica* » (« il s'est fâché avec moi hier »), nous a dit Jnumi avant d'enregistrer son chant sur notre magnétophone, en novembre 2010. Dans ce chant, Tamocoi se fâche avec sa mère Jnumi parce qu'elle n'accepte pas sa nouvelle épouse. À l'exception de trois phrases prononcées par Jnumi, le sujet énonciateur de cette composition de Jnumi (le « je » du chant) est Tamocoi. C'est toujours lui qui parle de ses désirs et de ses frustrations à la première personne. Tamocoi est présenté comme quelqu'un qui ne peut pas prendre de décision définitive : il veut aller avec sa nouvelle femme, mais la mère de ses enfants lui manque. Il cherche l'approbation de Jnumi, qui rejette cette autre femme et refuse la nourriture que son fils lui offre. Tout cela déclenche, bien sûr, la colère de Tamocoi, colère intense et profonde tristesse à la fois.

***Tamocoi pojna Jnumi* (« Tamocoi s'est fâché avec Jnumi »)**

***irade* par Jnumi Posijñoro (sujet énonciateur : Tamocoi)**

1 *Ñijnecaosiabide gajine ga yedosuabu ñajinga datei udo gajine uengate que yiraja yisocaique ga yacai ñujnusietigai ajeique*

Je chante ici et je raconte avec nostalgie ma grande colère et je ne sais pas quoi faire et la tristesse reste dedans

2 *ga uengate que yiraja yisocai ome dicore, dicore tuaque deipise ñajenique mu yayipieraque que jno jni disidacabode ore date case*

et fortement je ne sais pas quoi faire avec dicore, dicore est à l'intérieur de moi mais je pense à la mère des enfants dans le passé [Lucía]

3 *ga uengate yayipieraque jejogatipise uñaque dei degüi quenejnaique*

et fortement je pense à celle qui est dans une autre communauté [Lucía]

4 *ga uengate que yiraja ñajeningo jeti ñijnina dicore uñaque aja yoquidai tude uajate jeti ñijnina dicore,*

et fortement je ne connais pas mes désirs, si [je veux] être avec dicore à notre communauté fortement, si je suis avec dicore

5 *« mama, bajeo ? Dicore uñaque chi chata cuchapisagode ua to »*

[Tamocoi à Jnumi] « maman, tu es d'accord ? Dicore a dit qu'elle t'aidera à travailler »

6 *mu ñojninga : « que mayúo ga ñimo gotoraque » ga mama uaqué tagupusu ñajenique uje chetaque dicore.*

mais [Jnumi à Tamocoi] j'ai dit « je ne veux pas la voir » et [Tamocoi] « maman m'a mis beaucoup en colère quand elle a rejeté dicore »

7 *« Ijnamiane, ma ca moto uje ñijnora tu Ijnamianate ? Ga gusu pitoningaique jeti jno uyu di ga uate chicai yoquidai, que gapupe porojo dei yajeique »*

[Jnumi] : « Ijnamiane [« père d'Ijnamia »], tu ne vois pas qu'Ijnamianate [« mère d'Ijnamia »] est mon amie ? Et seulement si je meurs celle-là [dicore] viendra dans notre communauté, je ne veux pas que celle-là travaille à côté de moi »

8 *a yositome ga « yudute uje chi Lucía suaque dei siñeque que ñimoji dejatique utigo ga yijique ga yibagüi Nena iñoquijnai*

j'ai fait comme ça et [Tamocoi] « j'ai entendu dire que Lucía est ailleurs [communauté de 15 de Septiembre] et je ne dors pas la nuit et je suis allé chez le beau-père de Nena [Ijnamia]

9 *ga ñaeque 'Nena, angosia mayoquijnai ga yisi bacatabia suaque uje yudute to uje Nené suque chingoñu dipotac chocabode sui 15 urasabode'*

et j'ai dit [Tamocoi à Ijnamia] « Nena, demande la moto à ton beau-père que je rejoigne ta petite mère, comme je l'ai entendu dire, Nené m'a dit, qu'il y a des jeunes qui cherchent des femmes parmi les compatriotes de 15 [de Septiembre] »

10 *e ñirique mu uengate que disiode dacatabiate pojnasia yu*

je suis arrivé mais fortement la mère des enfants s'est fâchée avec moi

11 *ga yayipieraque dói yujoaque dicore, dicore uaque ñango ome ñu*

et je pense à celle-là, dicore, dicore, celle-là m'a dit [qu'elle voulait vraiment être avec moi]

12 *ga dicore uaqueñaque deipise ñajenique utigo*

et dicore, celle-là est vraiment à l'intérieur de moi dans tout mon corps

13 *ga yii ga que yayipieraque dói poi disiode ore date tuaque gajine ome jê yayipieraque que jno jni mama uaque uje ujnai dei gate ome Lucía, mama uaqué chopise jetiga uro Lucía*

et je ne pense pas à nouveau à la mère des enfants mais je pense beaucoup à maman qui a l'*ujnai* [la tension artérielle] élevée à cause de Lucía, maman celle-là, il semble que Lucía est sa fille

14 *ga e ñiringo i Piradesia uengate ga mama pusi yu i gate »*

et je vais à Filadelfia fortement et maman m'a mis en colère

15 *ga « que yagu baboade, asiome dicore ga tagu baboteque. Ijnamiane, macamo uje que bé baodie uguchade mu babe ayoré quénejna uguchade ? Ijnamiane, macamo ore imatañone ? Ijnamiane, boto ga ajnina dicore, date, ore, gajine ga ñisiome babode ome Lucía uaqueñaque gajine ga ore chajni daquide i Pai Idai gajine. »*

et [Jnumi] « je ne mange pas ta nourriture, donne ça à dicore, qu'elle mange ta nourriture. Ijnamiane, tu ne vois pas que tu ne donnes pas de choses à tes filles mais que tu donnes des choses à des femmes inconnues ? Ijnamiane, tu ne vois pas qu'ils n'ont pas de vêtements ? Ijnamiane, va-t'en, va avec dicore, sa mère, eux, et je donnerai tes enfants à Lucía, et ils retourneront chez leur grand-père à María Auxiliadora ».

Photo 3 : Nostalgie – Jnusietigai (crédit : Alfonso Otaegui)

Il y a trois aspects de ce chant sur lesquels nous voulons attirer l'attention : la mise en évidence de la migration, la caractérisation des deux femmes de Tamocoi et la nourriture comme moyen d'établir des liens et de les couper. Dans ce chant, la migration est présentée comme une conséquence attendue, une possibilité réelle – quelque chose qui arrivera tôt ou tard – et aussi comme la cause d'une forte tristesse. La migration est présentée comme le résultat final et inévitable d'une longue histoire de disputes et c'est justement cette certitude que ce genre de chants contribue à instaurer. D'après cette composition, la conséquence du rapport entre Tamocoi et une autre femme provoque une double migration. D'un côté, Jnumi dit à son fils Tamocoi de partir, de quitter Jesudi. De l'autre côté, Jnumi donnera alors ses petits-enfants à sa belle-fille et ils partiront à María Auxiliadora, chez le père adoptif de Lucía. À cette époque-là, Jnumi était très préoccupée par cette possible migration. Elle était très triste à l'idée de l'éloignement de ses petits-enfants – de Tu en particulier. Jnumi reproche à Tamocoi l'état déplorable dans lequel se trouvent ses enfants, sans nourriture et sans vêtements. La famille de Tamocoi est présentée comme abandonnée par celui qui doit subvenir à ses besoins. Le rôle de l'homme est illustré par son absence.

Les deux femmes sont représentées très différemment dans le chant. Lucía est très appréciée par Jnumi – clairement exprimé à la ligne 7 –, alors que la nouvelle femme de Tamocoi, par contre, est appelée « *dicore* ». *Dicore*, au sens propre du terme, est une sorte de démon nocturne. Par extension, on appelle ainsi pour plaisanter ceux qui sortent la nuit, généralement les personnes infidèles, car « ils marchent silencieusement la nuit » quand ils entrent furtivement dans les maisons de leurs amants ou quand ils quittent leurs propres maisons en essayant de ne pas réveiller leurs conjoints. À la ligne 13, Tamocoi dit que l'*ujnai* de Jnumi s'élève pour Lucía. *Ujnai* est un concept complexe. Il se rapporte à l'essence des esprits qui agissent dans les formules de guérison (cf. Lind 1974) et il est associé à la respiration – le souffle vital, la respiration agitée après l'exercice physique – et à l'air – la pression de l'air dans les pneus et la pompe à air pour gonfler les ballons de foot. Jnumi disait que cette phrase – une expression des temps anciens, quand ils vivaient encore dans la forêt – indiquait deux choses : que sa tension artérielle s'élevait pour Lucía et aussi qu'elle tenait beaucoup à sa belle-fille.

Le partage de la nourriture est une marque de socialité : c'est une manière d'établir un lien social entre deux individus. Les membres d'une unité résidentielle établissent et soutiennent leur lien communal par le biais de la co-résidence et le partage de la nourriture (Bórmida et Califano 1978 : 93). Jnumi, d'un geste très fort et symbolique, rejette la nourriture offerte par Tamocoi et lui demande de quitter l'unité résidentielle. Elle coupe ainsi avec Tamocoi les deux types de liens sociaux principaux. De plus, Jnumi refuse d'établir un lien avec sa nouvelle belle-fille : Jnumi ne veut pas que cette femme travaille pour elle ou même à côté d'elle.

3. Sur les traductions altérées

Ces chants semblent avoir pour les Ayoreo un degré élevé de « vérité » (ou une sorte d'« objectivité »), comme s'ils étaient des copies fidèles et authentiques de l'expérience rapportée. Ce degré de vérité attribué aux chants est essentiel pour leur emploi postérieur comme points de référence du comportement accepté et non-accepté. Le répertoire de chants contient – sous la forme d'anecdotes – les manières d'être des Ayoreo (« *ayoreo isocade* »). C'est le réservoir de leur identité qui n'est pas fixée dans le passé, mais qui est en adaptation constante. Dans ces histoires biographiques chantées, les Ayoreo mentionnent les mennonites, la migration due au travail ou à l'infidélité, le chasseur habile et l'ouvrier bien payé, les commérages des belles mères, l'emploi de l'argent et des téléphones portables, sur une note dominante de *relatedness* (Carsten 1995), commensalité et réciprocité.

Ce degré de vérité s'appuie en partie sur la méthode de composition. Le chant devient une copie fidèle de l'événement à travers la mise en relief des mots énoncés. À partir d'un événement tel que la dispute d'un couple, seuls les échanges verbaux sont extraits pour le chant. Un *irade* est conçu comme la répétition mot à mot des énoncés originaux. Il n'y a aucune description de la situation générale dans le chant, tout est raconté à travers les mots de Tamocoi et de Jnumi. Ce dialogue est censé être répété par le compositeur – Jnumi – exactement comme il a été énoncé la première fois.

Comme nous étions au courant des événements avant qu'ils ne soient racontés dans un

chant, certains traits et les conséquences possibles de la séparation nous ont paru exagérés dans l'*irade*. Premièrement, il semble que la séparation d'un couple est inévitablement suivie du départ de tous les membres de la famille. Deuxièmement, les enfants sont décrits comme abandonnés (en fait, un autre chant à propos de cet événement les présente comme des orphelins affamés). Troisièmement, la totalité de l'événement semble plus grave que ce qu'il n'a été. Il est vrai que les gens étaient préoccupés par ce couple et que leurs disputes étaient sources de commérages, mais il n'est pas inhabituel pour les couples chez les Ayoreo de se séparer – et même, quelques années plus tard, de se remettre ensemble – et de continuer à vivre dans la même communauté. De plus, les deux unités résidentielles – celle du père de Lucía et celle du père de Tamocoi – sont les deux unités les plus importantes à Jesudi, en ce qui concerne les ressources qu'elles peuvent obtenir et gérer. Au cas où les deux parents auraient quitté la communauté, les enfants auraient été accueillis et nourris dans l'une ou l'autre unité – voire même dans les deux. Le chant exagère clairement la gravité des conséquences possibles d'une séparation.

Le chant est soi-disant la reproduction du dialogue entre Jnumi et Tamocoi. Ce dialogue – défini par Jnumi comme une *pojnaquei* « dispute » – raconte d'une manière synthétique l'histoire de la séparation entre Tamocoi et sa première femme Lucía. L'événement social le plus pertinent pour la communauté est la séparation, ce qui est le thème du chant. Le dialogue *pojnaquei* est une manière de rendre cette situation complexe en quelques lignes. La mise en relief poétique sur les conséquences tristes et la qualité synthétique de l'*irade* nous amènent à la question du rapport spécifique entre l'événement original et le chant.

Le rapport entre le chant et l'événement peut être mieux compris si nous prenons le premier comme la « traduction intralinguistique » du deuxième, au sens de Hanks (2014). Les réflexions de Hanks sur la traduction intralinguistique sont particulièrement pertinentes pour notre recherche, centrée sur le discours non sacré et les interactions domestiques. En fait, comme Hanks le dit clairement, le phénomène de la traduction intralinguistique arrive tout le temps : "any time a speaker reports the speech of another, paraphrases, glosses, overtly imitates, or renders in 'prose' register a text in poetic register (verse or vice versa), translation is in play. Once we introduce the sociolinguistic truism that all languages have multiple registers, it becomes clear that intralingual translation is not only a fact of social life, but is, in effect, a design feature of language" (2014 : 21). Cette puissante réflexion nous permet de comprendre la manière dont les chants font partie de la vie sociale chez les Ayoreo. Voyons le développement de Hanks plus en détail.

Hanks s'appuie notamment sur l'article célèbre de Jakobson, "On linguistics aspects of translation" (1971 [1959]). Dans cet article, Jakobson définit la traduction intralinguistique comme « une interprétation de signes verbaux au moyen d'autres signes de la même langue »[2] (1971 : 261). Comme le dit Hanks, en reformulant Jakobson, "the intralingual translation of an expression quite simply *is its meaning*" (Hanks 2014 : 21, italiques dans l'original). De cette façon, Jakobson met en rapport la traduction intralinguistique avec la génération de sens par le biais du développement d'interprétants (au sens de Peirce). La traduction se trouve alors au cœur même de la compréhension, de l'attribution de sens. Or, l'interprétance – en tant que phénomène sémiotique – est trop générale pour être conçue comme équivalente à la traduction. Hanks propose alors deux contraintes nécessaires – suivant Goodman (1978) – avant d'établir qu'une représentation est la traduction d'une autre : la contrainte de la référence et la contrainte de la paraphrase : "The reference constraint captures the fact that the translation stands for the source (...) The paraphrase constraint captures the fact that there must be some relation of similarity, analogy, or partial equivalence between source and target." (2014 : 23). La reformulation de Hanks nous permet d'aborder le chant *irade* comme la traduction intralinguistique de l'événement original.

Le chant est une traduction intralinguistique du dialogue : l'*irade* reformule, se réfère à et paraphrase le *pojnaquei* originel. Premièrement, le chant est une reformulation de la séparation dans un registre poétique. Plus spécifiquement, il

[2] "an interpretation of verbal signs by means of other signs of the same language" (1971:261, notre traduction).

est la transformation de certains énoncés en un chant. Deuxièmement, le chant est pris comme une version fidèle du dialogue entre Tamocoi et sa mère Jnumi (ce qui accomplit la « contrainte de la référence » : l'*irade* représente cette interaction-là). Troisièmement, à l'exception des formules d'introduction, le dialogue est contenu textuellement dans le chant. Une équivalence partielle peut être trouvée entre la source – le dialogue – et la cible – le chant.

Même si le chant peut être décrit comme la traduction du dialogue, nous pensons qu'il y a une altération entre l'événement originel – la séparation – et les représentations qui en résultent. Premièrement, nous avons signalé que les conséquences tristes de la migration et l'abandon des enfants – bien qu'elles ne soient pas complètement impossibles – sont très peu probables. Deuxièmement, quelques détails du chant nous ont amenés à douter de sa précision, tel que celui de Tamocoi nommant sa nouvelle femme « *dicore* », un terme méprisant employé plutôt par la mère de Tamocoi. Troisièmement, nous doutons que le dialogue originel ait existé – ou du moins dans la manière décrite. En fait, dans les cas où nous connaissions l'histoire avant qu'elle ne devienne un chant, nous n'avons jamais entendu les dialogues originels. Or, les dialogues – la matière première des chants – ont effectivement eu lieu entre Tamocoi, sa première femme et sa mère. De plus, tous les habitants de Jesudi ont fait des commentaires – ils ont produit des énoncés – sur cette affaire. Cependant, il est possible que ce dialogue originel – cette version concise et synthétique – puisse ne pas avoir existé. Dans cette traduction intralinguistique particulière, la source est en fait projetée par la cible. La traduction – le chant – crée son propre original.

Cette altération n'est pas accidentelle ou aléatoire, et n'est pas due non plus aux subtilités de la mémoire orale. L'altération est systématique et en accord avec l'éthique ayoreo de la convivialité. Nous ne faisons pas une équivalence entre « altération » et « fausseté ». Nous croyons que cette altération est un processus poétique nécessaire destiné au renforcement d'une interprétation spécifique des événements. Les conséquences formulées dans le chant – migration, etc. – sont des pratiques actuelles des Ayoreo, qui peuvent mener, dans des cas extrêmes, à la dissolution d'une communauté. Tamocoi est critiqué parce qu'il n'a pas fourni de vêtements à ses filles alors qu'il a donné des choses à « des femmes inconnues » (ce qui veut dire : des gens qui ne sont ni des co-résidents, ni des parents). La nouvelle femme n'est même pas nommée, on fait allusion à elle d'une manière méprisante. Une mère refuse la nourriture de son propre fils. Toutes ces situations « antisociales » sont décrites sur un ton de nostalgie – *jnusietigai*. Ce trait poétique typique des chants de nostalgie d'amour *irade* est fondamental dans la dynamique de la vie sociale ayoreo. Les régularités du genre de chants guident l'interprétation de l'événement social.

Nous avons suivi une histoire depuis son début jusqu'à sa transformation en chant. Nous avons observé, d'un côté, que certains aspects et conséquences possibles de l'événement décrit étaient exagérés et, de l'autre côté, que le chant constituait une version très synthétique d'une longue histoire. Cette inconsistance apparente nous a amenés à l'analyse du rapport entre l'événement et le chant. Le rapport entre le chant et l'événement est mieux décrit comme une traduction intralinguistique – au sens de Hanks (2014). Un chant est une reformulation de l'événement, il le représente et en contient les énoncés mêmes, mais tout cela est en fait altéré. L'extension de l'altération est en fait l'espace de l'interprétance ayoreo (au sens de Peirce). C'est dans cet espace, dans cette altération systématique, que les régularités poétiques peuvent être insérées : des thèmes récurrents, des tropes récurrents sur la nostalgie contribuent à l'attribution de sens aux faits et à l'établissement d'une éthique sociale de la convivialité enracinée profondément dans les interactions quotidiennes et l'affectivité.

Remerciements

Je remercie chaleureusement la Fondation Fyssen qui m'a permis de réaliser cette recherche au sein d'un environnement aussi chaleureux que stimulant, le Département d'Anthropologie de l'Université de Californie à Berkeley. J'aimerais remercier en particulier Monsieur le Professeur William F. Hanks pour ses échanges motivants et son encouragement tout au long de l'année.

Bibliographie

• Alexiades, M. (Ed.). 2013. *Mobility And Migration In Indigenous Amazonia: Contemporary Ethnoecological Perspectives*. London : Berghahn Books.

• Bórmida, M. and Califano, M. 1978. *Los indios Ayoreo del Chaco Boreal: información básica acerca de su cultura*. Buenos Aires : FECYC.

• Bremen, V. von. 1994. « La significación del derecho a la tenencia de la tierra para los pueblos tradicionalmente no-sedentarios del chaco paraguayo », *Suplemento Antropológico*, 29 (1-2) : 143 – 162.

• Carsten, J. 1995. "The Substance of Kinship and the Heat of the Hearth: Feeding, Personhood, and Relatedness among Malays in Pulau Langkawi", *American Ethnologist*, 22, 2 : 223 – 241.

• Goodman, N. 1978. *Ways of worldmaking*. Indianapolis, Hackett.

• Hanks, W. 2014. "The space of translation", *HAU : Journal of Ethnographic Theory* 4 (2) : 17 – 39

• Jakobson, R. 1971 [1959]. "On linguistic aspects of translation", dans *Roman Jakobson. Selected Writings II*, pp. 260 – 266. The Hague, Paris, Mouton.

• Lind, U. 1974. *Die Medizin der Ayoré-Indianer im Gran Chaco*. Hamburg : Arbeits-gemeinschaft Ethnomedizin/ Renner.

• Otaegui, A. 2014. *Les chants de nostalgie et de tristesse des Ayoreo du Chaco Boréal Paraguayen. (Une ethnographie des liens coupés)*. Thèse de doctorat en anthropologie sociale et ethnologie, Paris/Buenos Aires : EHESS/UBA.

1. The Ayoreo, their life and their songs

The Ayoreo are former hunter-gatherers from northern Chaco, who mostly work as farmhand in ranches surrounding their communities. The population of the Ayoreo is around five thousand people, half of them living in Bolivia and half of them in Paraguay. The Ayoreo had contact with missionaries and Mennonites in the 1950's, and since then they have progressively become sedentary. In spite of their intensive contact with white people, they still speak their own language, *Ayoreode uruode* (Zamuco linguistic family). I did my fieldwork in the community of Jesudi, situated on the dirt road dividing the departments of Boquerón and Alto Paraguay, 75 Km. north from the Mennonite colony of Filadelfia (Paraguay) between 2008 and 2011.

Photo 1: Archivo Centro Cultural del Lago (CCDL, Areguá, Paraguay)

In this small community, composed of seven households, almost every act happens in plain sight. Everyday life takes place outside the houses, which remain empty almost all day long. Women make their crafts –mostly *caraguatá* bags–, children play and men sit –while not working– in front of the house or around the fire. They stay there, drink the *tereré* infusion, talk and sing. News –about work, health and gossip– circulate within and between households and also between distant communities through UHF radio, tape-recorded messages and, in the last years, through the use of cellphones.

Social and political tensions frequently arise inside the community concerning the administration of resources, such as working for the Mennonites, selling timber and crafts and 'hunting' NGO projects (von Bremen 1994). The Ayoreo, as many other groups from Lowland South America, have a tendency to use fission and migration as their main strategies to deal with internal social tension (Alexiades 2013). Jesudi, for example, was established in 1989. Eventually, due to successive internal fissions and new settlements, three new communities were formed out of it: Ogasui (1992), '2 de enero' (2009) and '15 de septiembre' (2010).

The concept of *jnusietigai* ('nostalgia') is highly pertinent in Ayoreo social life. In fact, 'to miss someone' can be described as a social process, it is not merely the fact of an individual feeling the loss or absence of someone else. Specific social practices – such as migration following a dispute – provoke an absence, and specific speech genres –such as *irade*– are dedicated to the expression of this inner state. Besides migrating because of internal conflicts, people also leave the community to work in distant farms for weeks or months. This mobility provides the basis for situations of absence and, therefore, nostalgia. Ayoreo like to point out that 'white men do not miss anybody', implying that feeling the absence of someone –and expressing it out loud–is something typically done by the Ayoreo. Certain practices are aimed at avoiding the

Photo 2: Nostalgia – Jnusietigai (credit: Alfonso Otaegui)

circumstances leading to nostalgia, while other practices seem to enhance this feeling. There is even a spell to make someone who is far away –and missed– come back. Old women in Jesudi have sung this spell to motivate their daughters living elsewhere to return to the community (the spell makes the missed one not feel at ease anymore where he or she is). The dynamics of nostalgia is part of Ayoreo social ethics.

All this information about social tensions and people missing other people finds its expression in songs. Singing is a constituent aspect of the Ayoreo's social life in Jesudi. Inspired by actual events and emotions, the Ayoreo compose a considerable variety of songs. The Ayoreo classify the songs into at least seven genres, according to the theme and the alleged internal state of the subject. Any remarkable social fact in Ayoreo life can be turned into a song, from the declaration of courage of a victorious warrior to the overt expression of sadness for a deceased relative. Women and men usually sing for hours at night around the fire, or just before dawn. Any Ayoreo can perform any composition he or she has heard and liked, contributing in this way to the diffusion of the story narrated in the song. These songs circulate through households and communities and are passed on from one generation to the next. These compositions are sent as gifts in cassettes and performed during occasional visits to other communities. This transmission and perpetuation of the pieces is intended: "listen carefully and imitate my songs" is the usual introduction in tape-recorded messages.

I will focus on the nostalgic love songs *irade* because they are the most frequently composed songs and therefore, they constitute the basis of Ayoreo social memory. These compositions usually tell sad love stories: a man is abandoned by his wife, a young girl is advised by her mother to marry an old man she does not love, spouses split up while remembering the time when they loved each other, and the like. As these songs do not produce dangerous effects –unlike the healing spells– they can be performed in any circumstance, which leads to their wide diffusion across households and communities.

2. From the fact to the song

In order to understand the relation between an event and the song narrating that event, I will present a case in which I knew the story before it became a song. I will show how a separation is depicted in an *irade* song and which following events are associated to it. We will see that an event that could be described simply as a two people's business has consequences in the rest of the social fabric of Jesudi.

The characters of this story are Tamocoi[3] –son of the chief–, his wife Lucía, his new wife –not named in the song– and his mother Jnumi. Tamocoi is a very active man in Jesudi: he knows how to deal with Mennonite farm owners and to find temporary work opportunities. He also proposes projects like selling timber, raising cattle or buying a satellite dish to watch soccer games. His mother Jnumi is no less important in the community: she is the hidden architect of the social structure of Jesudi. She does a lot for Jesudi social stability by managing the couples: she arranges couples, she advises girls against prostitution, she eases couples' fights but sometimes she also encourages a couple to split up. As she was the chief's wife, she was in charge of the even distribution of donations received from the government or NGO's.

When I arrived at Jesudi in 2008, Tamocoi was 30 years old and was married to Lucía. They had three daughters –Ijnamia, Apala and Tu– and one son –Fibai. They started to have serious arguments in 2009. Throughout that year, Tamocoi was unfaithful to Lucía on several occasions, but these situations never led them to split up. According to Tamocoi in 2009, he had never had problems with his wife before (he said this after a very public and strong dispute with Lucía): everything had always been fine. This depiction of a happier past in opposition to the sad present is typical of *irade* love songs and *uñacai* laments. According to Jnumi, Tamocoi's mother, this couple's problem was someone else's fault. An Ayoreo had told an old story on the radio: the myth of the fox (*erapujnangue adode*). The simple narration of this myth was believed to provoke infidelities and separations among the Ayoreo (Otaegui 2014). In those weeks, Tamocoi's sister, Quenejna, started to cheat on her husband with another married man.

[3] All the names of the Ayoreo have been replaced by pseudonyms in order to protect their privacy.

In October 2009, Tamocoi's affairs happened more often and even with girls from Jesudi. Tamocoi and Lucía would split up now and then, only to get together again some weeks later. The couple's instability affected the whole community, especially with the intermittent moving of Lucía between her father's household and her husband's. On occasions their arguments woke everybody up: Lucía yelled at Tamocoi, Tamocoi went off into the forest alone while his little daughter tried to follow him; or rather Lucía went to the side of the road with her younger daughters Apala and Tu and waited for a ride to go to some other community. In all of these situations, Jnumi intervened against Tamocoi. Jnumi reprimanded her son, which made him mad. Tamocoi and Lucía separated for good in 2010. Lucía left Tamocoi and moved to a neighboring community. Tamocoi started a stable relation with a woman from another distant community.

At the end of 2010, the situation was finally stable. Tamocoi had a new woman and Lucía was looking for a man. Tamocoi wanted to settle in Jesudi with his new wife but Jnumi rejected them. Jnumi composed a song about this situation in the middle of 2010. '*Pojna ñu dirica*' ('he got angry at me'), said Jnumi to me before singing for my recorder, in November 2010. In this song, Tamocoi is mad at his mother Jnumi because she does not accept his new wife. With the exception of three phrases uttered by Jnumi, the enunciative subject (the 'I' of the song) is Tamocoi. It is him who speaks about his desires and frustrations in the first person. Tamocoi is depicted in the *irade* as someone incapable of making a choice: he wants to be with his new wife but he misses the mother of his children. He seeks for Jnumi's approval, but she rejects her new daughter in law working by her side and even rejects the food offered by Tamocoi. This triggers Tamocoi's anger, which is as intense as his sadness.

***Tamocoi pojna Jnumi* ("Tamocoi got angry at Jnumi")**

***irade* by Jnumi Posijñoro (speaker: Tamocoi)**

1 *Ñijnecaosiabide gajine ga yedosuabu ñajinga datei udo gajine uengate que yiraja yisocaique ga yacai ñujnusietigai ajeique*

I sing here and I narrate with nostalgia my great anger, I don't know what to do and the sadness remains inside

2 *ga uengate que yiraja yisocai ome dicore, dicore tuaque deipise ñajenique mu yayipieraque que jno jni disidacabode ore date case*

And strongly, I don't know what to do with the *dicore*, *dicore* is inside me intensively but I think of the children's mother [Lucía]

3 *ga uengate yayipieraque jejogatipise uñaque dei degüi quenejnaique*

And strongly, I think of her who is in another community

4 *ga uengate que yiraja ñajeningo jeti ñijnina dicore uñaque aja yoquidai tude uajate jeti ñijnina dicore,*

And strongly, I don't know my desires, if I (want to) go with *dicore* in our community strongly, if I go with *dicore*

5 *«mama, bajeo? Dicore uñaque chi chata cuchapisagode ua to»*

[Tamocoi says to her mother Jnumi] 'Mom, do you agree? *Dicore* said that she will help you with your work'

6 *mu ñojninga: «que mayúo ga ñimo gotoraque» ga mama uaqué tagupusu ñajenique uje chetaque dicore.*

but I said [Jnumi answers to Tamocoi:] 'I don't want to see her' and [Tamocoi's words:] mama made me very angry when she rejected *dicore*

7 *«Ijnamiane, ma ca moto uje ñijnora tu Ijnamianate? Ga gusu pitoningaique jeti jno uyu di ga uate chicai yoquidai, que gapupe porojo dei yajeique»*

[Jnumi says:] "Ijnamiane ['father of Ijnamia'], don't you see that Ijnamianate ['mother of Ijnamia'] is my friend? And only if death takes me away, only then that one [*dicore*] will come to our community, I don't want her to work by my side"

8 *a yositome ga «yudute uje chi Lucía suaque dei siñeque que ñimoji dejatique utigo ga yijique ga yibagüi Nena iñoquijnai*

I did it like this and [Tamocoi's words:] "I heard Lucía is elsewhere [the community of '15 de septiembre'] and I don't sleep at night and I visit Nena's father-in-law"

9 *ga ñaeque 'Nena, angosia mayoquijnai ga yisi bacatabia suaque uje yudute to uje Nené suque chingoñu dipotac chocabode sui 15 urasabode'*

And I said [Tamocoi says to his daughter Ijnamia, also known as Nena]: 'Nena, ask your father-in-law [for the motorbike] and I reach you little mother, as I heard, Nené told me, there are young men looking for women among the countrymen from 15 [de septiembre]

10 *e ñirique mu uengate que disiode dacatabiate pojnasia yu*

I arrived but strongly the little mother of the children got angry at me

11 *ga yayipieraque dói yujoaque dicore, dicore uaque ñango ome ñu*

And my *ayipie* brings [I think of] her, *dicore, dicore*, she told me [that she really wanted to be with me]

12 *ga dicore uaqueñaque deipise ñajenique utigo*

And *dicore*, she is really inside me

13 *ga yii ga que yayipieraque dói poi disiode ore date tuaque gajine ome jê yayipieraque que jno jni mama uaque uje ujnai dei gate ome Lucía, mama uaqué chopise jetiga uro Lucía*

And I don't think about the children's mother anymore but I think a lot about my mother, whose *ujnai* [blood pressure] is high for Lucía, it really seems that Lucía is her daughter

14 *ga e ñiringo i Piradesia uengate ga mama pusi yu i gate»*

And I go to Filadelfia strongly and mom really made me angry

15 *ga «que yagu baboade, asiome dicore ga tagu baboteque. Ijnamiane, macamo uje que bé baodie uguchade mu babe ayoré quénejna uguchade? Ijnamiane, macamo ore imatañone? Ijnamiane, boto ga ajnina dicore, date, ore, gajine ga ñisiome babode ome Lucía uaqueñaque gajine ga ore chajni daquide i Pai Idai gajine.»*

And [Jnumi's words]: I don't eat your food, give it to *dicore*, so she eats your food. Ijnamiane, don't you see that you don't give things to your daughters, but you give things to unknown women? Ijnamiane, don't you see that they don't have clothes? Ijnamiane, go away and be with *dicore*, her mother, them, and I will give your children to Lucía, and they will go back to their grandfather in María Auxiliadora'

Photo 3: Nostalgia – Jnusietigai (credit: Alfonso Otaegui)

I want to highlight three ideas of this song: the link between separation and migration, the depiction of the two wives of Tamocoi, and food sharing as a marker of sociality. Migration is presented as the expected consequence of a separation –something that will happen sooner or later– and also as the cause of a strong sadness. These songs reinforce the notion that migration is the inevitable outcome of any long sequence of disputes. According to this song, Tamocoi's dating another woman provokes two migrations. On the one hand, Jnumi asks her own son to leave Jesudi. On the other hand, Lucía and her children will have to move to the distant community of María Auxiliadora. Jnumi was really worried about this second migration, as she was very fond of her grandchildren –especially the little Tu. Jnumi reproaches Tamocoi for the poor state of his daughters, who are in need of food and clothes. Tamocoi's family is presented as abandoned by their provider. The role of the man is illustrated negatively by its absence.

The two wives are depicted very differently in the song. While Lucía is beloved by Jnumi –clearly expressed in line 7–, Tamocoi's new wife is called '*dicore*'. *Dicore* is literally a night demon. The Ayoreo use the term figuratively to refer jokingly to those who are unfaithful, because 'they walk silently in the dark' when they sneak into their lovers' houses, or when they leave their own trying not to wake their spouses up. On line 13, Tamocoi says that Jnumi's *ujnai* is high for Lucía. *Ujnai* is a complex concept. It is related to the spirits' essence acting in a healing spell (cf. Lind 1974) and is associated with breath –the vital breath, the agitated breathing after physical exercise– and air –air pressure in tires and the air pump to inflate the soccer ball. Jnumi said that this line –which was an expression from the old times when they lived in the forest– meant that her blood pressure was high for Lucía and also that she cared a lot for her daughter in law.

Food sharing is a marker of sociality: it is a way to establish a social link between two individuals. The members of the Ayoreo residential unit establish and maintain their communal bond by two means: commensality and common residence (Bórmida and Califano 1978: 93). Jnumi, in a deeply symbolic move, rejects her son's food and asks him to leave the household. In doing so, she severs the two basic social links with Tamocoi. Furthermore, Jnumi refuses to build up a relationship with her new daughter in law, as she does not want this strange woman to work by her side.

3. On distorted translations

These songs seem to have for the Ayoreo a high degree of "truth" (or some sort of 'objectivity'), as if they were true and faithful copies of the reported experience. This degree of truth attributed to the songs is essential to their later use as points of reference for accepted and non-accepted behavior. The repertory of songs encloses –in anecdotes– the ways of being of the Ayoreo ('*ayoreo isocade*'). It is the depository of their identity, which is not fixed in the past, but is in constant adaptation. In these sung biographical stories, the Ayoreo mention the Mennonites, the migration due to work or infidelity, the skilled hunter and the well paid worker, gossip and mothers-in-law, the use of money and cell phones, on a background of relatedness (Carsten 1995), commensality and reciprocity.

This degree of truth is based partially on the method of composition. The song becomes a faithful copy of the event by means of focusing on the uttered words. Out of an event such as couple's dispute, only the verbal exchanges are extracted for the song. An *irade* is conceived as the verbatim repetition of the original utterances. There is no description of the general situation in the song, everything is told through the words of Tamocoi and Jnumi. This dialogue is supposed to be repeated by the composer –Jnumi– exactly as it was uttered the first time.

As I was familiar with the story before it was referred to in a song, certain traits and possible consequences of the split up struck me as overstated in the *irade*. First, it seems that a couple's separation is inevitably followed by the departure of all the members of the family. Second, the children are depicted as abandoned (in fact, another song about this event portrays them as starving orphans). Third, the whole event looks much more serious than it actually was. It is true that people were concerned about this couple, and their disputes were the subject of gossip, but it is not unusual for couples among the Ayoreo to split up –and even, some years later, to come back together– and continue to live in the same community. Besides, the two residential units

–Lucía's father's and Tamocoi's father's– are the two most important of Jesudi, in terms of the resources they can obtain and manage. In the event that both parents had left the community, the children would have been taken care of in any –or both– of these households. The song clearly overstates the gravity of the separation's possible consequences.

The song is allegedly the reproduction of the dialogue between Jnumi and Tamocoi. This dialogue in turn –defined by Jnumi as a *pojnaquei*, 'dispute'– tells in a synthetic fashion the story of the split up between Tamocoi and his first wife Lucía. The social event that is most relevant for the community is the separation, and that is the theme of the song. The dialogue *pojnaquei* is a way of rendering this complex situation into some few lines. The poetic emphasis on sad consequences and the synthetic quality of the *irade* lead us to the question of the specific relation between the original event and the song.

The relation between the song and the event is better understood if we describe the first as an 'intralingual translation' of the second, in the sense of Hanks (2014). Hanks's remarks on intralingual translation are especially relevant for my research, which focus on non-sacred speech and domestic interactions. In fact, as Hanks clearly puts it, intralingual translation takes place every day: 'any time a speaker reports the speech of another, paraphrases, glosses, overtly imitates, or renders in "prose" register a text in poetic register (verse or vice versa), translation is in play. Once we introduce the sociolinguistic truism that all languages have multiple registers, it becomes clear that intralingual translation is not only a fact of social life, but is, in effect, a design feature of language.' (2014: 21). This statement is quite powerful to understand how songs are part of social life among the Ayoreo. Let us see Hanks's development more in detail.

Hanks starts from Jakobson's classic article 'On linguistic aspects of translation' (1971 [1959]). In that paper, Jakobson defined intralingual translation as 'an interpretation of verbal signs by means of other signs of the same language' (1971: 261). As Hanks says, rephrasing Jakobson, 'the intralingual translation of an expression quite simply *is its meaning* (Hanks 2014: 21, italics in original). In this way Jakobson relates intralingual translation to the generation of meaning by means of the development of interpretants (in the Peircean sense). Translation is, then, at the very heart of understanding, of the attribution of meaning. Interpretance as a semiotic phenomenon however, is far too general to be equated with translation. Hanks then proposes two constraints –following Goodman (1978)– to establish that one representation is a translation of another: the reference constraint and the paraphrase constraint. 'The reference constraint captures the fact that the translation stands for the source (...) The paraphrase constraint captures the fact that there must be some relation of similarity, analogy, or partial equivalence between source and target.' (2014: 23). Hanks reformulation allows us to address the song *irade* as an intralingual translation of the original event.

The song is an intralingual translation of the dialogue: the *irade* reformulates, refers to and paraphrases the original *pojnaquei*. First, the song is a reformulation of the separation in a poetic register. More specifically, it is the transformation of certain utterances into a song. Second, the song is taken as a faithful account of the dialogue between Tamocoi and his mother Jnumi (which fulfills the 'reference constraint': the *irade* stands for that interaction). Third, with the exception of the introductory formulae, the dialogue is contained verbatim within the song. Partial equivalence can be found then between the source –the dialogue– and the target –the song.

Even though the song can be described as a translation of the dialogue, I believe there is a distortion between the original event –the separation– and the resulting representations. First, I pointed out that the sad consequences of migration and abandonment of the children are –although not impossible– highly unlikely. Second, some details of the song lead me to doubt of its accuracy, such as Tamocoi's naming his new wife *dicore*, a diminishing term rather used by Tamocoi's mother. Third, I doubt that the original dialogue existed at all or at least in the way it is depicted. In fact, in the cases I knew the story before it was turned into a song, I actually never heard the original dialogues. Dialogues –the raw matter of songs– took place between Tamocoi, his former wife and his mother, without any

doubt. Furthermore, all the people of Jesudi made comments –produced utterances– about this affair. However, it is possible that the original dialogue –this concise and synthetic version– may have not existed. In this particular intralingual translation, the source is actually projected by the target. The translation –the song– creates its own original.

The distortion is not accidental or random, nor is due to the subtleties of oral memory. The distortion is systematic and it goes in tune with Ayoreo ethics of conviviality. I am not equating 'distortion' with 'falsehood'. I believe this alteration is a necessary poetic process aimed at reinforcing a specific interpretation of the events. The consequences stated in the song –migration– are current Ayoreo practices, which may lead, if carried out too far, to the dissolution of a community. Tamocoi is criticized for not providing his daughters with clothes and for giving stuff to 'strange women' (meaning: people who are neither co-residents nor relatives). The new wife is not even named, just alluded to in an insulting manner. A mother rejects her own son's food. All these 'antisocial' situations are described on the key of nostalgia –*jnusietigai*. This typical poetic feature of the nostalgic love songs *irade* is fundamental in the dynamics of Ayoreo social life. The regularities of the song genre guide the interpretation of the social event.

I have followed a story from its beginning to its transformation into a song. I observed on the one hand that certain aspects and possible consequences of the event described were overemphasized and on the other hand that the song constituted a very synthetic version of a long story. This apparent inconsistence led me to analyze the relation between the event and the song. The relation between the song and the event is better described as an intralingual translation –in the sense of Hanks (2014). A song is a reformulation of the event, it stands for it and contains its very utterances, but all this is in fact distorted. The extent of the distortion is in fact the space of Ayoreo interpretance. It is in this space, in this systematic distortion, that poetic regularities can be inserted: recurring themes, recurring tropes on nostalgia help to attribute meaning to the facts and to establish a social ethics of conviviality deeply rooted in everyday interactions and affectivity.

Acknowledgements

I warmly thank the Fyssen Foundation which allowed me to carry out this research in a welcoming and stimulating environment, the Department of Anthropology at the University of California, Berkeley. I would like to thank specially Professor William F. Hanks for his inspiring exchanges and encouragement all year long.

Les variations des représentations du monde surnaturel dans les discours religieux en Amazonie indigène

Cédric YVINEC

Pensionnaire de la Fondation Thiers, Laboratoire d'Anthropologie Sociale

Résumé

Cet article examine les références à des lieux et objets physiques dans les discours évoquant des mondes surnaturels pour en étudier l'impact sur les représentations que peuvent s'en faire les auditeurs, à partir d'un corpus de discours rituels et non-rituels d'un chamane amazonien et d'un non-chamane.

Mots-clés

Amazonie, Suruí (Indiens), chamanisme, références spatiales, types de savoir

Variations in the representations of the supernatural world in religious discourses in indigenous Amazonia

Abstract

This article examines references to places and physical objects in discourses that refer to supernatural worlds, in order to evaluate their effects on the representations of these worlds by the audience. It is based on a corpus of ritual and non-ritual discourses by an Amazonian shaman and by a non-shaman.

Keywords

Amazonia, Suruí (Indians), shamanism, place references, kinds of knowledge

Introduction

Les discours de spécialistes rituels portant sur des mondes « imaginaires » ou « surnaturels », au sens de contextes d'interaction qui ne sont pas accessibles aux gens ordinaires qui composent leur auditoire, sont des types de discours qui sont confrontés de manière particulièrement aiguë au problème de la construction d'un terrain commun au locuteur et aux auditeurs (Hanks 2006). En effet, puisqu'ils attendent divers bénéfices de la parole des spécialistes rituels (guérison de maladies, fortunes diverses), les auditeurs doivent être persuadés de la réalité de ces êtres et de ces lieux auxquels ils n'ont pas accès et avec lesquels les spécialistes sont supposés interagir personnellement, et ce souvent en présence même des auditeurs. Il est donc particulièrement important pour le locuteur de susciter chez ses auditeurs une représentation de ce monde qui soit suffisamment cohérente pour être recevable, tout en maintenant un certain écart avec le monde ordinaire, pour expliquer que les gens ordinaires ne puissent le contempler. Dans ces discours, les expressions et gestes se référant directement ou indirectement aux propriétés physiques, morphologiques et spatiales des objets et des mondes auxquels seuls les spécialistes ont accès ont donc un rôle capital, puisque c'est sur la base de ces éléments que les auditeurs peuvent se former des représentations de ces mondes[1], et reconnaître la légitimité des spécialistes à en parler.

[1] Évoquer un lieu « réel » inconnu de son auditeur survient fréquemment dans la conversation ordinaire. Le problème n'est cependant pas de même nature que lorsqu'il s'agit d'un monde surnaturel, puisque les propriétés physiques des objets y sont supposés identiques et que l'auditeur pourrait en théorie s'y rendre.

Cet article examine donc l'effet que peuvent avoir les références verbales ou gestuelles à des lieux ou à des objets physiques du monde surnaturel sur les représentations que s'en fait l'auditoire, en s'appuyant sur un cas ethnographique, les Suruí, un groupe indigène d'Amazonie, aire culturelle dans laquelle ce genre de représentations cosmologiques est particulièrement riche et où ce type d'interactions communicationnelles est courant. En combinant méthodes ethnographiques et analyses conversationnalistes, on procèdera en comparant différents types de discours sur ce même objet, énoncés par un spécialiste – un chamane – et par un non-spécialiste, dans divers contextes, rituels et non-rituels. Ces références ne peuvent certes pas être réduites à cette fonction communicationnelle – certaines ont notamment une fonction cognitive et mnémonique pour le locuteur ; mais leur étude systématique, quantifiée et comparative dans des discours réels, peut permettre de mettre en lumière certains mécanismes de la formation et de la transmission des représentations « religieuses » sans en rester à des hypothèses cognitivistes générales et imprécises, fondées sur leurs seules propriétés sémantiques (Sperber 1996).

Contexte ethnographique

Les Suruí du Rondônia sont une population d'Amazonie brésilienne, appartenant à la famille linguistique tupi-mondé, vivant dans les États du Rondônia et du Mato Grosso. Ils comptent aujourd'hui environ 1 200 individus. Entrés en contact pacifique avec la société occidentale pour la première fois en 1969, ils vivaient jusqu'alors de la chasse et de l'horticulture sur brûlis. Depuis lors, leur mode de vie a été profondément bouleversé. Confrontés à un grand nombre de difficultés économiques et sociales, sous la pression de missionnaires évangéliques, l'immense majorité de la population s'est convertie au protestantisme.

En partie pour cette raison, il n'y a plus aujourd'hui que deux chamanes parmi eux. Toutefois, les chamanes n'étaient déjà guère nombreux traditionnellement. Les décomptes généalogiques montrent que, dans le demi-siècle précédant le contact, il n'y a jamais eu plus d'une douzaine de chamanes simultanément en activité, pour une population masculine adulte qui était alors de l'ordre d'une centaine d'individus – seuls les hommes peuvent en effet être chamanes. Cependant, une part conséquente de la population masculine possède un certain degré de connaissance et d'expérience personnelle du chamanisme, et cette part est croissante avec l'âge : à quarante ans, c'est le cas d'un bon tiers des hommes, mais cela concerne la quasi-totalité des gens âgés de soixante-dix ans et plus. Ces gens ont connu un début de révélation chamanique, mais, volontairement ou non, ils n'ont pas continué dans cette voie – il leur est parfois reconnu certains pouvoirs thérapeutiques.

La principale activité des chamanes, en tant que chamanes, consiste en effet dans l'énonciation de chants thérapeutiques, soit dans le cadre de cures individuelles, soit dans le cadre de rites collectifs, à visée préventive. L'un des traits les plus marquants du chamanisme suruí, qui le distingue à la fois d'autres types de discours et de pratiques suruí et d'autres traditions chamaniques amazoniennes, réside dans son refus explicite de tout apprentissage. Les chants chamaniques sont considérés comme l'œuvre et la propriété des esprits, les chamanes n'étant que les interprètes de ces chants. Dans la mesure où apprendre à chanter supposerait, comme tout processus d'apprentissage, de procéder par essais, erreurs et corrections, les Suruí craignent que ces erreurs dans l'énonciation des chants ne déclenchent la colère des esprits, qui se vengeraient sur le novice. En conséquence, la compétence chamanique ne peut être acquise que subitement et entièrement, au travers d'une révélation par les esprits, en général durant un rêve. Par ce rêve, le novice reçoit d'un seul coup la maîtrise d'un répertoire immuable et total de chants, qu'il partage avec tous les autres chamanes et qu'il devra chanter toujours à l'identique. Tous les chamanes sont donc supposés connaître exactement les mêmes chants et être également compétents, voire également efficaces. Ce mode d'acquisition est peu réaliste psychologiquement – il est probable que les novices s'entraînent en secret et qu'ils apprennent en écoutant silencieusement des chamanes confirmés. Il s'agit avant tout d'une description idéale et normative, qui revient à prohiber la transmission interindividuelle, et empêche donc l'établissement d'une relation de type initiatique entre un novice et un initiateur, de telle sorte que la compétence et la légitimité d'un chamane ne dépend jamais d'aucun autre chamane en particulier.

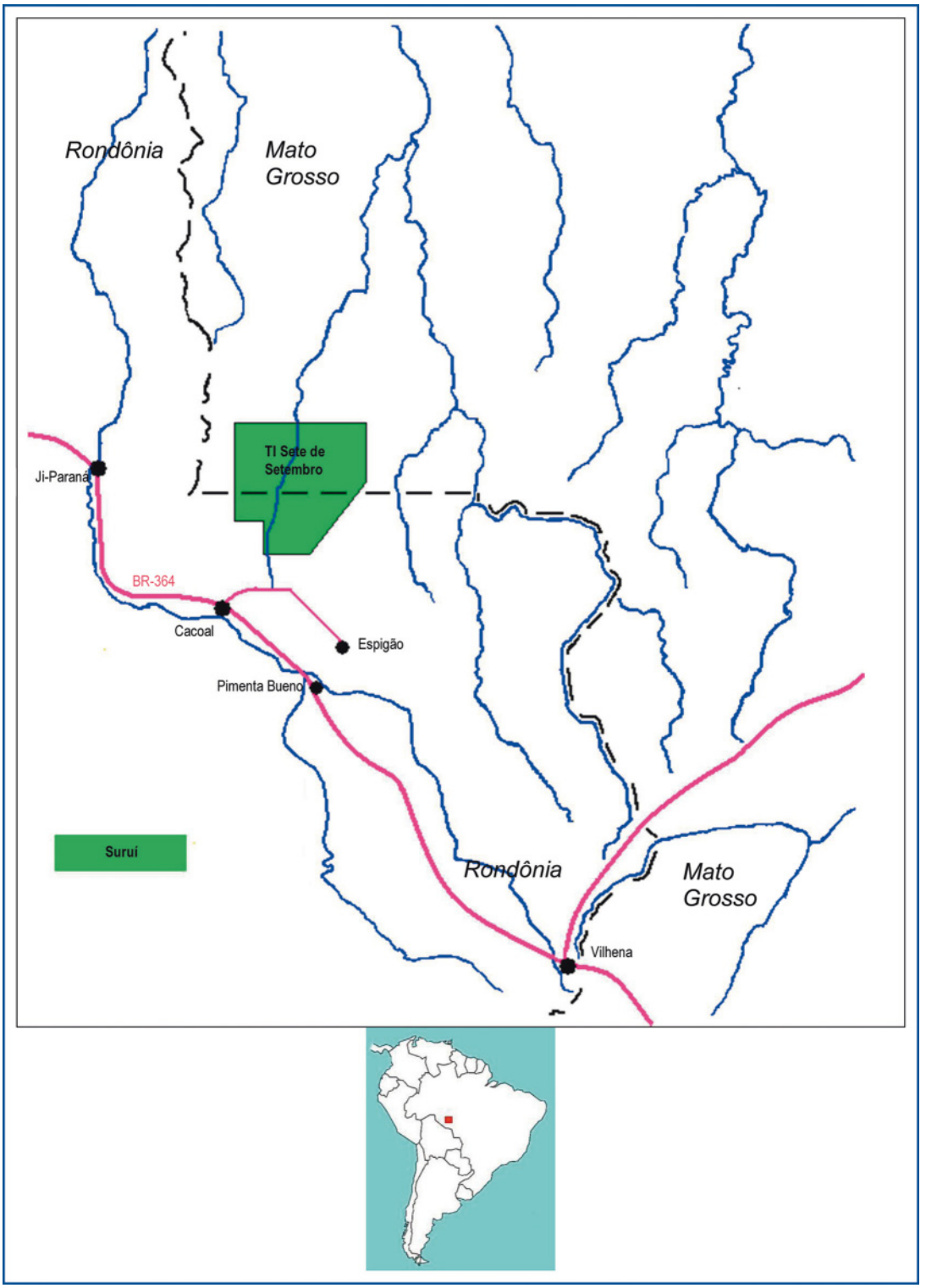


Figure 1 : Situation géographique des Suruí

Figure 2 : Habitation suruí traditionnelle

Libéré de la dépendance interpersonnelle, chaque chamane se retrouve donc confronté au groupe des chamanes dans son ensemble. En effet, ceux-ci se doivent d'avoir un avis à peu près unanime sur la compétence de chacun, car tout désaccord public jetterait le soupçon sur la compétence de certains d'entre eux, ce qui équivaudrait donc à reconnaître que certains sont menacés par la colère des esprits.

Or les chamanes ne sont pas supposés simplement répéter des chants qu'ils auraient appris par cœur. En théorie, chaque fois qu'ils chantent et fument des cigares[2], les chamanes sont présumés voir et interagir avec les esprits. Ceux-ci sont supposés être physiquement présents sur le lieu même où opère le chamane, en compagnie de son auditoire. Durant la cure ou le rite collectif, on considère que le chamane interagit directement avec eux, tout en interagissant verbalement et physiquement en même temps avec les autres humains, lesquels n'observent aucun indice matériel – visuel ou sonore – de la présence des esprits[3]. Dans ces conditions, les expressions verbales et gestes se référant à des propriétés physiques, morphologiques et spatiales des esprits et des objets qui les entourent présentent donc une importance cruciale pour les chamanes dans leurs rapports avec les Suruí ordinaires, car ce sont ces références qui, dans la parole des chamanes, font de leurs partenaires spirituels des habitants d'un monde potentiellement réel, sensible, visuel et tactile, mais qui reste entièrement ou partiellement inaccessibles aux gens ordinaires.

[2] Comme la plupart des groupes indigènes d'Amazonie orientale et méridionale, les Suruí n'utilisent aucune plante psychoactive autre que le tabac.

[3] Pour des informations ethnographiques et linguistiques plus détaillées sur le chamanisme suruí, notamment le corpus de chants utilisés, voir Yvinec (2011a; 2011b; 2012). On trouvera quelques exemples de discours de chamanes dans Mindlin (1995), mais uniquement en traduction et selon des méthodes d'éditions très discutables.

Figure 3 : Village suruí

Corpus et méthodes d'analyse

Afin d'étudier les propriétés communicationnelles de ces références aux propriétés physiques, morphologiques et spatiales du monde spirituel, on s'appuiera ici sur un corpus de discours de plusieurs types[4]. Parmi ces références aux propriétés physiques du monde spirituel, on comptera non seulement les descriptions explicites de ces objets (« les maisons des esprits ont de hautes parois de palmes »), mais aussi les expressions permettant implicitement d'inférer leurs propriétés physiques (« les esprits s'assoient là-dessus »). Ces allusions indirectes sont en effet au moins aussi importantes, dans la mesure où elles forment un arrière-plan aux assertions et sont donc moins susceptibles d'être discutées. Les discours utilisés relèvent de trois grands types. Le premier équivaut aux discours chantés d'un chamane suruí. Les chants chamaniques suruí sont une parole qui ne peut survenir que dans des contextes très ritualisés et dont le contenu est globalement fixe. Les chants chamaniques suruí sont composés dans une langue ésotérique qui n'est en théorie pleinement comprise que des seuls chamanes. En réalité, nombre d'auditeurs, notamment ceux qui ont eu une certaine expérience du chamanisme, en comprennent une large part, même s'ils ne se sentent pas assez compétents et légitimes pour en offrir des gloses. Notre corpus en compte une cinquantaine. Le second type rassemble tous les autres discours tenus par ce même chamane et ayant trait au monde des esprits. Leurs formes concrètes peuvent être très variables, tout comme leur longueur : certains sont narratifs, comme le récit de l'élection du chamane par les esprits ; d'autres sont des exposés descriptifs et didactiques, présentant les diverses espèces d'esprits connues du

[4] Les données ethnographiques ont été recueillies lors de plusieurs séjours chez les Suruí, entre 2005 et 2013 ; les chants chamaniques ont été enregistrés pour l'essentiel en 2006, les conversations et autres discours non-rituels utilisés ici ont été enregistrés et/ou filmés en 2007 et 2013.

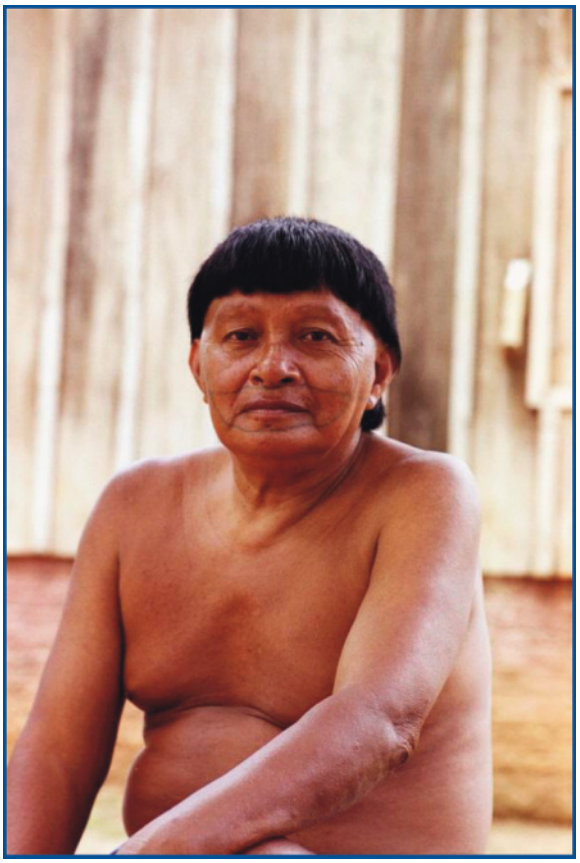


Figure 4 : Simão Perpera Suruí, le chamane

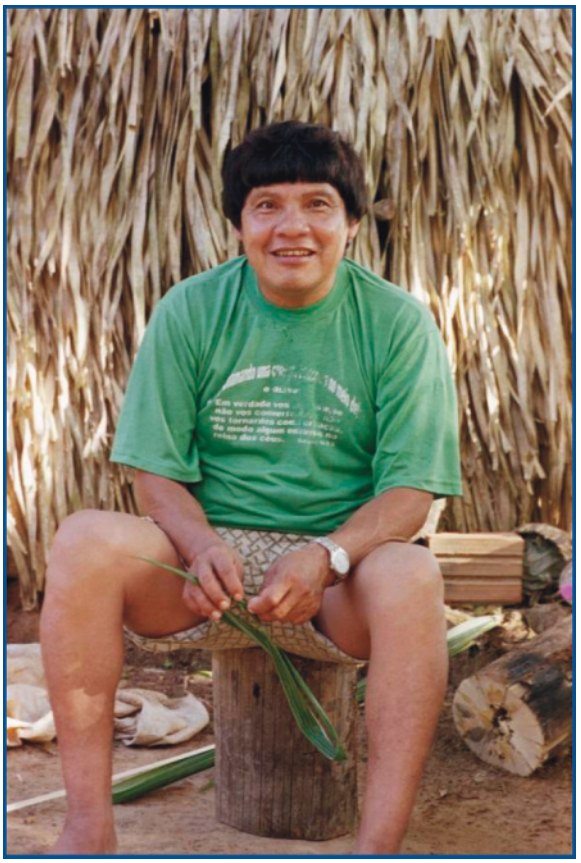


Figure 5 : Agamenon Ğamasakaka Suruí, le non-chamane

chamane ; enfin, certains sont des conversations dialogiques avec des gens ordinaires posant des questions au sujet des activités et des connaissances du chamane. Dans tous ces cas, l'auditoire incluait deux ou trois hommes suruí, ainsi que l'ethnologue. Parmi ces auditeurs, il y avait toujours quelqu'un à qui on reconnaissait quelques connaissances en matière de chamanisme. Enfin le dernier type correspond à des discours tenus par un non-chamane mais évoquant des sujets qui sont du ressort des chamanes : des rencontres – inabouties – avec des esprits chamaniques et une description didactique du lieu où partent les âmes des morts – description purement spéculative, car bien que ce soit en théorie possible pour les malades, aucun Suruí n'a personnellement visité ce lieu, et nul n'est capable de citer une connaissance qui aurait eu cette expérience. Outre de l'ethnologue, l'auditoire de ces discours était composé d'un ou deux fils adultes ou adolescents du locuteur, et ne comptait aucun chamane.

Pour estimer les effets communicationnels des références aux propriétés physiques morphologiques et spatiales du monde spirituel, nous avons défini trois critères permettant d'inférer la richesse sémantique des représentations qu'elles sont susceptibles d'induire chez les auditeurs. Tout d'abord, nous avons classé ces références en deux grands types, en fonction de leur potentiel d'inférences, fort ou faible. Nous avons considéré qu'une référence recèle un fort potentiel d'inférence, lorsque, sans nécessairement présenter une description d'un objet ou d'un lieu, elle permet à l'auditeur d'en déduire implicitement un certain nombre de caractères ; au contraire nous avons classé comme des références à faible potentiel d'inférence toutes celles qui ne permettent aucunement de telles déductions. Ainsi, des déictiques (*ãkoy*, « ici », *boriğõb*, « depuis loin ») on ne peut rien inférer sur la morphologie de ces lieux ; même lorsqu'un esprit est situé comme étant « près de » (*-pabi*) tel objet, on ne peut rien

conclure sur la forme ou la localisation de ces lieux. En revanche, lorsqu'un chamane dit qu'un esprit « se lève et sort » (*asaradnẽ*) d'un lieu, on peut au minimum en conclure que ce lieu constitue un volume creux et relativement clos, à l'instar d'une habitation, d'un hamac, d'une pirogue, etc. De même lorsqu'un objet est situé « au pied de » (*-sagaî*) de tel autre, on peut en conclure que ce dernier est relativement élevé et vertical. Cette distinction peut paraître triviale, lorsque les termes désignant les lieux sont des mots du langage commun utilisés dans leur sens ordinaire bien connu de l'auditeur. En revanche, elle devient plus intéressante dès lors que ces substantifs ne sont plus des termes connus, comme c'est le cas dans une large part de la langue ésotérique des chants chamaniques suruí, ou que ces substantifs sont utilisés de manière peu usuelle (*asaradnẽ abohra-pi*, « il se lève et sort du kapokier » ou *ğannih-sagaî*, « au pied du ciel »).

Nous avons ensuite classé les références relevées d'après leurs effets cognitifs présumés sur l'auditoire, sur une échelle comportant cinq degrés de contre-intuitivité. Le premier degré correspond aux références qui ne sont nullement contre-intuitives (*soey-yamáh-î*, « chez les esprits »). Le second degré correspond aux références qui ne sont pas en elles-mêmes contre-intuitives, mais renvoient à des faits bizarrement invisibles pour l'auditoire (*so dena aatẽ o-î-ka*, « l'esprit s'est couché ici dans mon hamac »). Le troisième degré renvoie à des lieux et objets surprenants ou bizarres (Boyer 2001), par exemple du fait de leur échelle, mais qui ne sont pas contre-intuitifs (*wapetih amawawa* « des énormes épines qui se balancent en travers du chemin »). Le quatrième degré correspond à des faits véritablement contre-intuitifs, violant notamment les attentes en matière de physique intuitive, comme le fait de passer au travers d'objets pleins et solides (*ixaa-pi asaradnẽ* « il se lève et sort d'une pierre »). Enfin le dernier correspond à des expressions qui paraissent purement absurdes, associant en particulier des verbes à des substantifs inappropriés, comme sujets (*ğattih bõbõbõ*, « le ciel claque ») ou comme objets (*-pe-perepi*, « écouter un chemin »).

Enfin, nous avons classé les expressions et gestes se référant aux propriétés physiques et spatiales des objets du monde spirituel en fonction du cadre de références auquel elles ont recours, en s'inspirant des analyses de S. Levinson (Levinson 2003 ; Levinson et Wilkins 2006). Ces travaux visent à distinguer des domaines (type de cadre de référence) permettant des comparaisons de la structure des références spatiales entre différentes langues. Toutefois, comme il ne s'agissait pas ici de comparer différentes langues dans leur usage ordinaire (c'est-à-dire, en général, les manières dont elles permettent de répondre à la question « Où est X ? »), mais de comparer différents usages non-ordinaires d'une même langue, nous avons redéfini ces domaines ou cadres de référence, en nous appuyant sur les spécificités de la langue et du contexte suruí. Outre les expressions qui ne mobilisent aucun cadre de référence (comme les déictiques notamment), nous avons distingué trois cadres de référence, d'après des questions d'échelle. Le premier rassemble les objets et lieux qui sont à peu près à l'échelle du corps humain ou plus petits[5], qui peuvent être situés ou déterminés par rapport à lui, ou être embrassés du regard (*apotota itxar*, « il s'assoit dessus » ; *-alaptẽ*, « ils se mettent en file », gestes mimant des mouvements corporels ou désignant des lieux proches). Les deux autres cadres, par opposition, concernent des objets qui dépassent cette échelle et qui ne peuvent plus être embrassés ensemble du regard, mais doivent être imaginés mentalement (Wierzbicka 1989). Le second cadre de référence correspond à une échelle en quelque sorte « géographique ». Il situe des objets les uns par rapport aux autres selon un rapport qui reste décrit à l'échelle d'un déplacement humain (*ta-pe-tar iwe-itxa*, « sur leur piste, après il y a... »). Au contraire le troisième cadre de référence est d'ordre « cosmologique ». Il situe les objets d'après des régions du monde que les gens ne parcourent pas ordinairement (*ğannih-pabi*, « au ciel », gestes pointant des grandes directions de manière abstraite). Cette distinction entre cadre géographique et cadre cosmologique correspond à deux cadres de référence utilisés pour situer des lieux dans l'espace géographique ordinaire. Le premier organise l'espace forestier de manière radiale autour du village. Chaque famille possède

[5] Dans la plupart des langues, les références à la situation spatiale d'objets de ce type nécessitent des structures morphosyntaxiques plus complexes (verbes, adverbes) que les dénotations locatives les plus courantes et les plus simples (Levinson et Wilkins 2006).

un « secteur » (*xabitor*) où elle développe ses activités d'horticulture, de chasse et de collecte : en partant du village, elle y installe d'abord ses essarts, puis des pistes (*me*) de chasse. Chaque piste a donc un possesseur, qui seul (en théorie) en connaît les lieux, ces différents lieux étant donc pensés comme distribués de manière linéaire sur ces pistes : on les repère d'abord d'après des obstacles – cours d'eau, marais, colline, type de végétation[6] –, puis d'après le temps de déplacement nécessaire pour les atteindre (« à une demi-journée de marche »). Le second cadre spatial de référence est un système cardinal, fondé sur deux axes à peu près perpendiculaires : l'axe est-ouest de la course du soleil et l'axe amont-aval, qui se trouve être orienté à peu près sud-nord dans la région où vivent les Suruí. Or ces axes ont une ampleur cosmologique qui articule le monde ordinaire et le monde des esprits. L'extrême aval est le règne des esprits aquatiques (*ğoaney*). L'axe solaire s'articule à un axe vertical : en poursuivant sa route très loin vers l'est, on rejoint la région des esprits orientaux (*ğoraey*) et on monte au ciel, à l'instar du soleil, où on rencontre les esprits célestes (*ğannihey*), et c'est dans ces régions qu'est situé l'accès au monde des morts (*pa-ixo-kah-be-pe*, « la piste par où partent nos âmes »). Précisons enfin qu'une même référence peut faire appel à plusieurs cadres que nous avons distingués – par exemple *o-yama-pe*, « le chemin de mon banc », qui mobilise à la fois un cadre géographique (« chemin ») et un cadre corporel (« banc »).

[6] Le lexique suruí se caractérise, comme beaucoup de langues amazoniennes probablement, par une nette pauvreté en termes géomorphologiques (« colline », « rivière », etc.). La plupart des références à des parties du paysage ont recours à la végétation, en particulier à la concentration (*-kat*) relative de telle ou telle espèce (*pasap-kat*, « zone où les palmiers *babaçu* prolifèrent », *napo-kat*, « zone où les lianes prolifèrent », etc.). À l'exception de directions assez vagues (« vers chez les ennemis X »), de quelques noms de rivières, et des termes portugais utilisés depuis le contact, tous les toponymes sont intégralement transparents, historiques, relatifs et instables. Un lieu dans la forêt est dénoté par une expression du type « la zone où l'espèce X prolifère et où l'événement Y a eu lieu », Y n'étant généralement un événement connu que d'un cercle de parents assez étroit, de telle sorte que le toponyme est incompréhensible pour les autres (*mam-ğat peyxo-pug-aka-wa*, « la noiseraie où un petit esprit *peyxo* fut tué » n'est identifié que par une dizaine de familles). Les autres se référeront éventuellement à ce même lieu par l'espèce X et l'événement Z.

Le tableau suivant présente le décompte des occurrences de références présentant les caractères déterminés dans chacun des types de discours définis ci-dessus, sans compter les doubles occurrences – c'est-à-dire les occurrences de la même expression se référant au même lieu « réel ». Cela revient à présumer que l'auditeur saisit toutes les implications d'une expression dès sa première occurrence, ce qui n'est sans doute pas tout à fait exact, mais permet une comparaison quantifiée plus aisée. Enfin, il va de soi qu'étant donné la taille relativement restreinte du corpus et la dimension d'appréciation subjective dans le classement de certaines expressions dans une catégorie ou une autre, il est évident que seules les différences nettement marquées doivent être retenues comme vraiment signifiantes pour l'analyse.

			Chants chamaniques	Discours non-ritualisé d'un chamane	Discours non-ritualisé d'un non-chamane
Total			64	124	51
Riches			46	49	35
Degré de contre-intuitivité		Cohérent	16	61	32
		Invisible	4	35	4
		Surprenant	22	15	15
		Irreprésentable	5	13	0
		Insensé	17	0	0
Cadre	Sans		13	48	8
	Avec	Corporel	19	40	31
		Géographique	23	25	10
		Cosmologique	15	14	6

Les références au monde des esprits dans les chants chamaniques

Le nombre total de références distinctes dans notre corpus de chants est relativement bas, comparé à la taille du corpus (plusieurs heures de chant). Cela s'explique en partie par la structure

des chants chamaniques suruí, faits d'un refrain identique tout au long d'un chant et toujours différent d'un chant à l'autre, et de couplets qui varient au cours d'un chant mais peuvent souvent réapparaître partiellement d'un chant à un autre. Les diverses références aux propriétés physiques et spatiales du monde des esprits peuvent en conséquence avoir des fréquences très inégales dans le corpus, selon qu'elles se trouvent dans une partie récurrente d'un couplet ou dans un refrain, ou au contraire dans une partie non-récurrente d'un couplet. En outre, ces références sont exclusivement verbales : lorsqu'il chante, le chamane ne fait aucun geste qui se réfèrerait à une quelconque action des esprits ou à un objet de leur monde.

Les chants chamaniques comportent en apparence beaucoup d'expressions potentiellement riches en inférences au sujet des propriétés physiques du monde des esprits : c'est le cas d'une large majorité d'entre elles (70 %), une proportion en tout cas largement supérieure à celle qu'on rencontre dans les discours non-ritualisés du chamane. Toutefois cette apparente richesse en inférences potentielles doit être nuancée. En effet, cette forte proportion naît en grande partie de l'absence et de la faible variété des expressions à faible potentiel d'inférence : il y a peu de déictiques dans les chants et le nombre des termes de mouvement est assez réduit. Ces expressions apparaissent ensuite fortement contre-intuitives : plus du tiers (35 %) – et presque la moitié de celles riches en inférences – peuvent être classées comme « irreprésentables » et surtout « insensées » : on y rencontre fréquemment des expressions comme *o-yama-mayxoh*, « éteindre mon banc », *ixaey-pe-kũy-pob*, « le chemin brillant des pierres marche lourdement ». Seul un quart (25 %) de ces expressions peut être qualifié de référence « cohérente », une proportion très nettement inférieure à celle des autres types de discours (entre 50 % et 60 %). Enfin, du point de vue du cadre de références, la part des expressions n'en mobilisant aucun est relativement limitée (20 %) et au sein des cadres mobilisés, le cadre cosmologique apparaît relativement important, par comparaison avec les autres types de discours (25 % des expressions contre environ 10 % ailleurs). Cette importance naît du fait que le chant de tout esprit inclut toujours au moins une expression faisant allusion à l'espèce d'esprits à laquelle il appartient – aquatiques, orientaux, célestes – au moyen d'une référence à la région du cosmos qui abrite cette espèce.

De ces différents traits, il ressort que la représentation du monde spirituel que les chants chamaniques sont susceptibles d'induire chez l'auditeur est paradoxale. Elle est en effet à la fois puissamment nourrie par des expressions verbales sémantiquement riches et, en même temps, cette richesse sémantique ne permet guère de construire une représentation cohérente de ce monde.

Les références au monde des esprits dans les discours ordinaires du chamane

Sous cet aspect, les discours ordinaires du chamane contrastent fortement avec les chants chamaniques. Le nombre de références distinctes est bien supérieur, surtout rapporté à la moindre taille du corpus (moins d'une heure au total). La part des références potentiellement riches en inférences sur la structure physique du monde des esprits est particulièrement faible, puisque celles-ci ne représentent que 40 % du total, soit nettement moins que dans les chants, mais aussi que dans les discours du non-chamane (70 % dans les deux cas). Cette moindre proportion est en fait l'effet de la fréquence très élevée des déictiques dans ces discours, ainsi que des gestes souvent vagues ou abstraits. Ces déictiques et ces gestes se réfèrent souvent à ces discours à l'espace immédiat de l'énonciation, pris comme un contexte générique d'interaction avec les esprits, même pour décrire des interactions qui n'y ont pas eu lieu (*akoy narayip deor, oboatẽ denene*, « l'esprit Plumeau est venu ici même, il s'est couché avec moi dans ce hamac », pour décrire une interaction ayant eu lieu trente ans plus tôt dans un village très distant et depuis lors détruit).

Le degré de contre-intuitivité et les formes de ces expressions sont aussi très différents. En effet, ces expressions sont globalement moins contre-intuitives que dans les chants chamaniques : la proportion de références « cohérentes » est nettement supérieure (50 %) et il n'y a aucune référence qui apparaisse comme entièrement « insensée ». Deux degrés de contre-intuitivité sont particulièrement représentés : d'une part les références qui paraissent cohérentes mais se réfèrent à des objets invisibles et, d'autre part les références à des objets irreprésentables. Le développement des premières est corrélé à l'importance

des déictiques : il s'agit souvent d'allusions à des activités des esprits qui auraient lieu dans l'environnement immédiat, et qui sont pourtant invisibles aux non-chamanes, comme c'était le cas dans l'exemple précédent. En revanche l'importance des représentations spécifiquement « irreprésentables », sans être pour autant « insensées » apparaît comme une particularité intentionnelle de ce type de discours : le chamane multiplie les allusions à des actions simples mais physiquement impossibles : *wabe-wewãr*, « il réside dans la rive », *ixaa-pabe-ka ixaa-pika*, « à l'intérieur de la pierre, il casse la pierre », etc.

Enfin, les cadres de référence mobilisés dans ces discours contrastent avec ceux des chants chamaniques par une nette diminution de l'usage de cadres cosmologiques (10 %) et géographiques (20 %), moins remplacés par le cadre corporel, dont la part reste identique (30 %) que par des expressions ne faisant appel à aucun cadre de référence. Le faible recours au cadre cosmologique serait encore plus marqué, si l'on écartait les dialogues, dans lesquels le chamane rappelle à chaque évocation d'un nom d'esprit la région propre à son espèce. L'importance des expressions dépourvues de cadre de référence s'explique non seulement par la fréquence des déictiques, mais aussi par le grand nombre de références à la situation spatiale des esprits les uns par rapports aux autres : *a-itxa-ter-ewa-ĩ*, « il est toujours à l'écart des autres », *ta-ibeb-ğup-na*, « se trouvant à l'extrémité de leur file ».

Aussi le discours ordinaire des chamanes apparaît-il paradoxalement comme relativement plus pauvre en informations sur le monde des esprits que le discours rituel. C'est un discours souvent abstrait, visant à classer des entités et à expliciter leurs relations entre elles plutôt qu'à peindre le monde dans lequel elles évoluent, souvent assimilé aux formes génériques du monde humain – ces discours évoquent les esprits comme se trouvant tout naturellement *a-yamáh-ĩ*, « dans leur village » ou *a-sab-ibika*, « dans leur maison ». Lorsque le monde des esprits est décrit, il l'est de manière assez cohérente, tout en parsemant cette description assez plate de quelques allusions à des actions explicitement contre-intuitives. Ces discours n'aident donc guère les auditeurs à construire une représentation positive de ce monde – d'ailleurs, alors que les non-chamanes sont très désireux d'écouter des chants chamaniques, par simple plaisir esthétique, ils se lassent rapidement des explications du chamane au sujet de ses activités.

Les références au monde des esprits dans les discours d'un non-chamane

Peut-être en raison de ce désintérêt, de manière assez surprenante, les références aux propriétés physiques, morphologiques et spatiales du monde des esprits dans les discours du non-chamane paraissent présenter plus de traits communs avec celles des chants qu'avec celles des discours explicatifs du chamane. Tout d'abord, la part des références potentiellement riches en inférences y est aussi élevée (environ 70 %), et ce, pour une raison similaire : l'absence de déictiques. Cette absence reflète celle de toute assimilation ou comparaison entre le monde des esprits et le monde humain dans ces discours.

Certes, du point de vue de la contre-intuitivité, des différences majeures apparaissent : les discours du non-chamane ne contiennent aucune référence véritablement contre-intuitive, et corrélativement, les références apparaissant comme pleinement cohérentes ont une importance bien supérieure dans ce genre de discours (60 %). Cependant, une autre catégorie apparaît également peu fréquente dans ce type de discours, tout comme dans les chants : il y a peu de références cohérentes mais invisibles (10 %), ce qui traduit encore une fois la nette séparation entre le monde humain et le monde spirituel.

Enfin ces références aux aspects matériels du monde des esprits font fréquemment appel à un cadre de référence, celles dépourvues de tout cadre étant nettement plus rares (15 %) que dans les autres types de discours, et en particulier dans les discours explicatifs du chamane. Cette faible proportion reflète encore le peu de références déictiques, mais elle s'explique surtout par un très important recours à un cadre de référence corporel (60 %), qui contribue fortement à la richesse sémantique de ces références. En effet, ces références utilisant un cadre corporel, qui concernent souvent des monstres gardant le chemin des morts, combinent une expression verbale imagée, incluant souvent un idéophone, et un geste mimant une action ou un mode d'être (*xaya-xaya-xaya yabikãrtih sade*, « la flèche monstrueuse fend l'air, chhh-chhh-chhh », avec un battement de main).

Le discours du non-chamane, qui n'aborde que certains esprits – les quelques-uns qu'il a rencontrés en rêve, ceux gardant le chemin de morts – en donne ainsi une description beaucoup plus imagée, permettant à l'auditoire de s'en faire une représentation beaucoup plus expressive, spécifique et cohérente, en apparence au moins – en effet dès qu'on pose quelques questions au locuteur des contradictions majeures apparaissent, qu'il est souvent beaucoup moins habile à surmonter que le chamane.

Conclusion

Cette analyse des propriétés sémantiques des références aux aspects physiques, morphologiques et spatiaux du monde dans lequel un chamane dit interagir avec des entités invisibles montre que ces propriétés peuvent être très variables en fonction des genres de discours dans lesquels ces références apparaissent, genres de discours qui correspondent à des contextes d'énonciation bien déterminés mais néanmoins larges et stables (énonciateur spécialiste ou non, contexte rituel ou non). Des études portant sur différentes traditions chamaniques, notamment amazoniennes (Severi 1993 ; Déléage 2007) avaient déjà montré que des termes centraux dans les discours des spécialistes rituels, renvoyant à des concepts clefs des cosmologies imputées à ces populations, du type « âme », « esprit », etc., avaient des significations très diverses – et parfois très évanescentes – en fonction des contextes pragmatiques dans lesquels ils étaient utilisés. Notre analyse des discours suruí évoquant le monde des entités surnaturelles montre que cette variabilité n'affecte pas uniquement les concepts qui forment l'armature explicite de ces discours et qui sont donc les plus susceptibles d'être discutés, mais qu'elles concernent aussi l'arrière-plan implicite, les représentations physiques, morphologiques et spatiales du monde dans lequel les esprits sont supposés vivre, représentations qui, du point de vue de la construction du discours, sont beaucoup plus discrètes – puisqu'elles ne sont qu'inférées d'éléments épars – et sont donc beaucoup moins susceptibles de contestation et de discussion.

Or les relations entre les divers types de discours mobilisés sont complexes et non-univoques. En effet, les discours rituels – les chants – ont une plus grande stabilité mais, plus opaques, leur compréhension fait souvent appel à des interprétations s'appuyant sur des discours non-rituels. Les discours des non-chamanes prétendent se référer aux discours des chamanes, ou du moins ils n'osent pas les contredire explicitement. Cependant, les chamanes ne l'ayant pas toujours été, ils ont d'abord dû produire des discours du type de ceux des non-chamanes, ou du moins entendre d'abord ce type de discours, car les chamanes réservent leurs gloses à des gens relativement âgés. Il n'est donc pas possible d'identifier, l'un de ces discours comme source unique des autres, ni donc d'identifier des voies de propagation unidirectionnelle de ces représentations du monde surnaturel d'un type de discours à un autre. Aussi toute hypothèse de transmission « épidémiologique » de ces représentations d'un discours à un autre paraît-elle impossible à défendre, tant qu'on s'en tient à une analyse sémantique : avant de dépendre de propriétés sémantiques, la circulation de ces représentations implicites qui peuvent être inférées de l'arrière-plan des différents types de discours dépend des contextes pragmatiques dans lesquels ces discours sont énoncés et écoutés.

Remerciements

Je remercie la Fondation Fyssen qui m'a permis, grâce à une bourse post-doctorale, d'effectuer un séjour d'un an en 2012-2013 au Max Planck Institute for Psycholinguistics de Nimègue (Pays-Bas) dans l'équipe de Steve Levinson, ainsi qu'une recherche de terrain au Brésil. Cet article reprend une partie des analyses exposées dans une communication à l'atelier « Place reference and landscape » organisé à Nimègue en avril 2013.

Bibliographie

- Boyer, Pascal. 2001. *Et l'homme créa les dieux: comment expliquer la religion*. Paris, Robert Laffont.
- Déléage, Pierre. 2007. Trois points de vue sur les revenants sharanahua. *L'Homme* 183, p. 117-146.
- Hanks, William. 2006. Joint commitment and common ground in a ritual event. N. Enfield et S. Levinson (éd.), *Roots of human sociality: Culture, cognition and interaction*, p. 299-328. Oxford, Berg.
- Levinson, Stephen. 2003. *Space in Language and cognition: Explorations in cognitive diversity*. Cambridge, Cambridge University Press.

• Levinson, Stephen et David Wilkins (éd.). 2006. *Grammars of space: Explorations in cognitive diversity*. Cambridge, Cambridge University Press.

• Mindlin, Betty. 1995. *Unwritten stories of the Suruí Indians of Rondônia*. Austin, Institute of Latin American Studies, University of Texas.

• Severi, Carlo. 1993. Talking about souls: the pragmatic construction of meaning in Cuna ritual language. P. Boyer (éd.), *Cognitive aspects of religious symbolism*. Cambridge, Cambridge University Press.

• Sperber, Dan. 1996. *La contagion des idées*. Paris, Odile Jacob.

• Wierzbicka, Anna. 1989. Baudouin de Courtenay and the theory of linguistic relativity. J. Rieger, M. Szymczak, et S. Urbańczyk (éd.), *Jan Baudouin de Courtenay a lingwistyka światowa*, p. 51-57. Varsovie, Ossolineum.

• Yvinec, Cédric. 2011a. Les monuments lyriques des Suruí du Rondônia (Amazonie méridionale) : chants, événements et savoirs. Thèse, Paris, EHESS.

• –. 2011b. Invention et interprétation : chants de boisson et chants chamaniques chez les Suruí du Rondônia. *Journal de la Société des Américanistes* 97 (1), p. 151-177.

• –. 2012. Arousing and mastering feelings of alien inspiration in one's own speech: Pragmatics of the shamanic songs of the Suruí of Rondônia (Southern Amazonia). *Anthropological Linguistics* 54 (4), 371-401.

Introduction

The discourses of ritual specialists that evoke "imaginary" or "supernatural" worlds –that is, contexts of interaction in which ordinary people, like the audience, cannot participate– are a kind of speech that is particularly confronted with the problem of building a common ground between the speaker and the hearers (Hanks 2006). Indeed as the hearers expect various benefits from the ritual specialist's speech –curing diseases, good fortune, and so on– they need to be convinced that these places and beings are real, since the specialists claim that they interact with these invisible beings, in the presence of the hearers. The ritual speaker has to provide the hearers with a representation of the invisible world that is both coherent enough to be accepted and different from the ordinary world in order to explain that ordinary people cannot see it. Thus, verbal and gestural references to physical, morphological and spatial properties of the objects and worlds that only the specialists can see play a crucial role: on the basis of these references, the hearers can build representations of these worlds and assess the competence of the speaker to discuss these matters.[7]

In this article, I discuss the effect of verbal and gestural references to places or physical objects of the supernatural world on their representations by the audience. This article is based on an ethnographical case, that of the Suruí, a Native people of Amazonia; in this cultural area, such cosmological representations and communicational interactions are particularly common. Resorting to ethnographical methods and conversational analysis, I compare different kind of discourses on the same supernatural world, by a ritual specialist –a shaman– and by a non-specialist, in various contexts, both ritual and non-ritual. Of course, these references do not have a communicational function only: some of them have cognitive and mnemonic functions for the speaker. A systematic, quantified, and comparative study of these references in real discourses can shed light on some mechanisms of formation and transmission of "religious" representations, beyond usual hypotheses of cognitive anthropology, which are based on semantics only (Sperber 1996).

Ethnographic context

The Suruí of Rondônia live in the Brazilian Amazon, on the border between the states of Rondônia and Mato Grosso. Their language belongs to the Tupi-Mondé family. Today they number 1,200 individuals approximately. When they had their first peaceful contact with Western society in 1969, they lived on hunting and slash-and-burn horticulture. Since then, their lifestyle has changed drastically. As they were confronted with many social and economic problems, they converted themselves to evangelical Protestantism, under pressure of missionaries.

[7] In daily conversation, people often refer to "real" places unknown to the hearer. However, they assume that the objects of these places have the same physical properties, and the hearers may visit these places later. Thus the problem of common ground in speeches about supernatural worlds remains irreducible to the one of unknown real places.

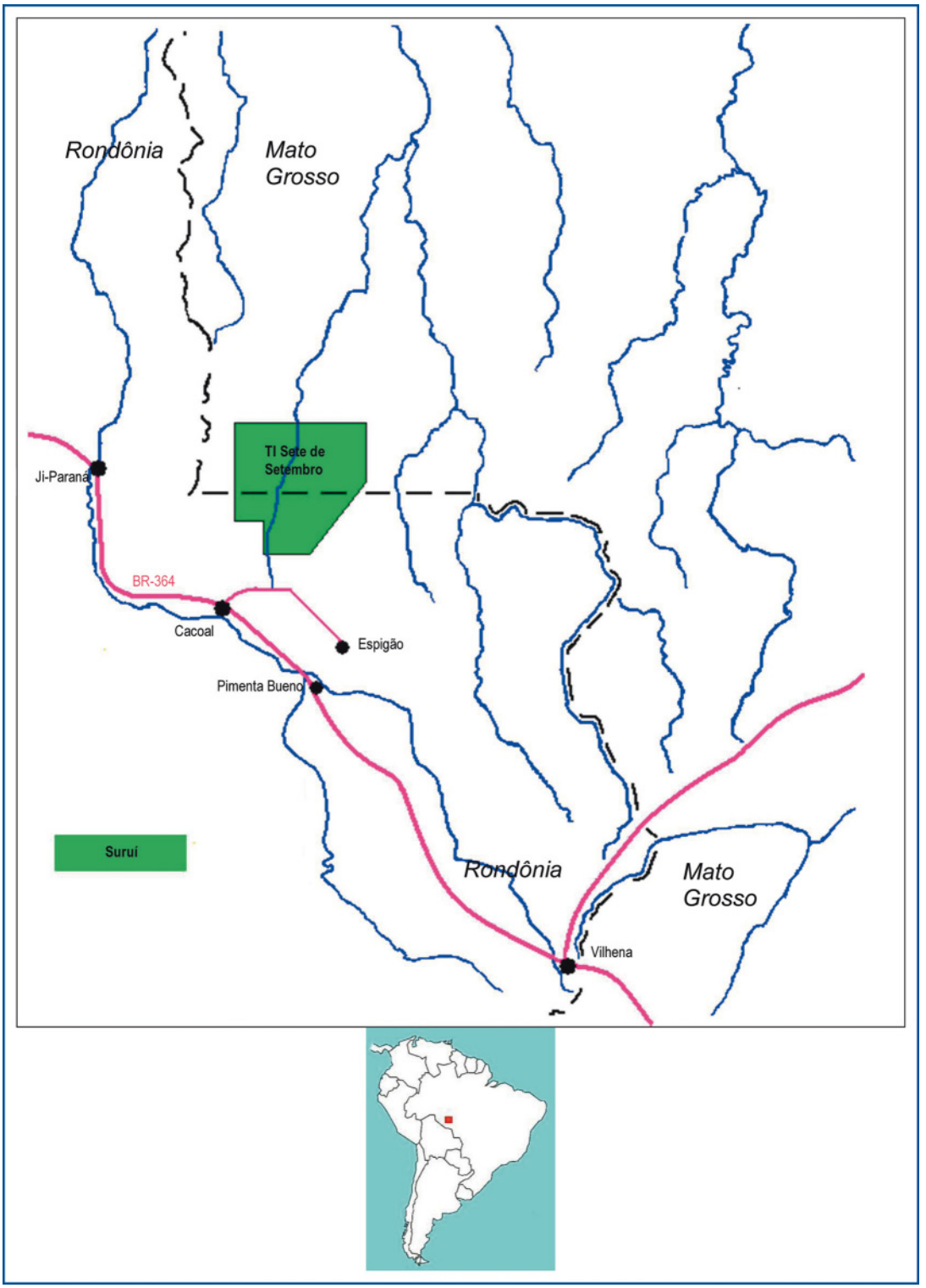


Figure 1 : Geographic situation of the Suruí

That explains, partly, why nowadays there are only two shamans left among them. However, even in their traditional way of life, shamans have always been few. Genealogical accounts show that in the last fifty years before the contact, there have never been more than twelve or so active shamans simultaneously, while there were about a hundred male adults –indeed only men may become shaman. Nevertheless, many adult male individuals have some knowledge and experience of shamanism, particularly as they grow older. About 30% of men over 40 and almost all those over 70 have experienced a shamanic revelation, but, voluntarily or not, they did not continue in this way –some of them claim to master some therapeutic powers.

Indeed, the main activity of shamans is to perform therapeutic songs, either in individual healings, or in collective rituals, as preventive measures. In comparison with other kinds of discourses and practices among the Suruí and with other shamanic traditions in Amazonia, the specific epistemic feature of Suruí shamanism lies in its explicit refusal of any learning. Indeed, shamanic songs are authored by spirits; shamans are only performers of these songs. Since, like any learning process, learning to sing would require attempts, errors, and corrections, the Suruí fear that errors in performing songs trigger the spirits' wrath on the novice. Consequently, shamanic competence can only be acquired all at once, through a revelation by the spirits, usually during a dream. By this dream, all of a sudden, the novice gets the command of a complete and stable corpus of songs. All shamans share the same corpus of songs, which they have to perform always identically. Therefore, all shamans are supposed to know exactly the same songs, to be equally competent, if not equally efficient. From a psychological point of view, it is unlikely that shamans really acquire their knowledge this way –novices probably practice singing secretly and learn by listening silently to recognized shamans. This is rather an ideal and normative description, which amounts to a prohibiting interindividual transmission of shamanic knowledge.

Figure 2 : Traditional Suruí house

Figure 3 : Suruí village

Thus, no initiation-like relationship can set up between the novice and any recognized shaman; the competence and legitimacy of a new shaman does not depend upon any other shaman in particular. Free from any interpersonal dependence, every shaman is confronted with the group of shamans as a whole. Indeed, those are expected to give a more or less unanimous opinion about every one's shamanic competence, because any public disagreement would give rise to suspicion about the competence of some of them –this would amounts to declare that some shamans are under threat of the spirit's wrath.

The shamans are not just supposed to repeat songs learnt by rote. Indeed, every time they sing and smoke cigars shamans are presumed to see the spirits and interact with them.[8] The spirits are said to be physically present in the very place in which the shaman is operating with the audience. In an individual healing or a collective ritual, the shaman interacts directly with the spirits, while he interacts verbally and physically with other human people; the human audience does not see or hear any sign of the presence of the spirits.[9] Under these conditions, the shamans' invisible partners appear as inhabitants of a potentially visible and palpable world, though still inaccessible to ordinary people, thanks to the verbal and gestural references of the shamans to the physical, morphological, and spatial properties of the spirits and their things. Consequently these references play a crucial role in the relationship between the shamans and the ordinary Suruí people.

[8] Like most indigenous people of Eastern and Southern Amazonia, the Suruí do not use any psychoactive plant, except tobacco.

[9] For detailed ethnographical and linguistic data on Suruí shamanism and the corpus of shamanic songs, see Yvinec (2011b; 2011a; 2012). Mindlin (1995) published a few shamans' speeches, but in translation only and with very questionable editing methods.

Corpus and analytical methods

In order to study the communicational properties of the references to physical, morphological, and spatial properties of the spirits' world, I will use a corpus of various kinds of discourses.[10] I will categorize not just explicit descriptions of objects ("the wall of the spirits' houses are made of palm leaves") as references to physical properties of the spirits, but also expressions that allow the hearer to infer such properties ("spirits sit on this"). Indeed, such indirect allusions are no less important, because they constitute a background to other assertions, so that they are less likely to be discussed. I will use three kinds of discourse. The discourses of the first kind are the sung speeches of a Suruí shaman. Suruí shamanic songs are a kind of speech that occurs only in highly ritualized contexts and its content is stable. The lyrics of these songs are composed in an esoteric language that only shamans are expected to understand; actually, many hearers, particularly those who have had some experience of shamanism, understand these songs partly, although they do not feel competent to gloss them. Our corpus numbers is about 50 songs. The discourses of the second kind are all the other speeches by this shaman that refer to the world of spirits. These discourses are very diverse: some are narrative –for example, the story of the election of the shaman by the spirits; some are descriptive and didactic accounts– for example, about the different kinds of spirits known to the shaman; and some are dialogs with ordinary people asking questions about the shaman's activities and knowledge. Among the hearers, besides me, there were always two or three adult Suruí men; one of them, at least, was recognized as having some understanding of shamanism. Finally, the discourses of the third kind are speeches by a non-shaman that deal with shamanism, such as narratives of encounters with spirits –which did not result in a shamanic revelation – and description of the world of the dead, a place that the sick are said to be able to visit– however, no Suruí has ever visited this place personally and no one can mention any acquaintance who would have. Besides me, the hearers of these speeches were one or two teenaged sons of the speaker, but no shaman.

In order to assess the communicational effects of references to morphological and spatial properties of the spirits' world, I specified three indices of the semantic richness of the representations to which they can give rise among the hearers. I first distinguished two broad kinds of references according to their inferential potential: low or high. I assess a reference's inferential potential as high if it allows hearers to infer some physical properties of its object, even though it does not give a thorough description of it; on the contrary I assess a reference's inferential potential as low if it does not allow such inferences. For instance, deictics (*ãkoy*, "here", *boriğob*, "from far away") do not enable the hearer infer any morphological properties of these places; even if a spirit is said to be "close to" (*-pabi*) an object, the hearer cannot infer anything about the shape or the location of these places. On the contrary,

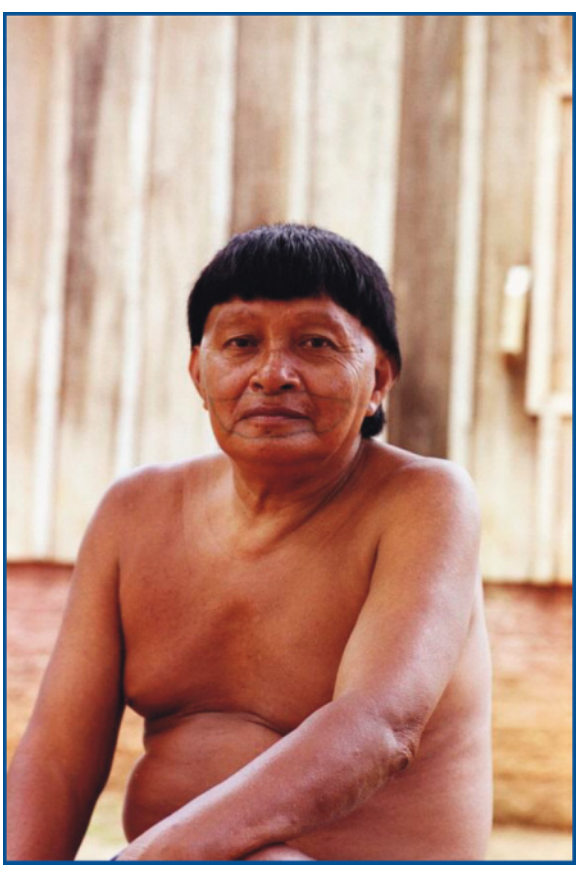


Figure 4 : Simão Perpera Suruí, the shaman

[10] Ethnographical data were collected during several stays among the Suruí, between 2005 and 2013; most shamanic songs were recorded in 2006, conversations and other non-ritual discourses were recorded in 2007 and 2013.

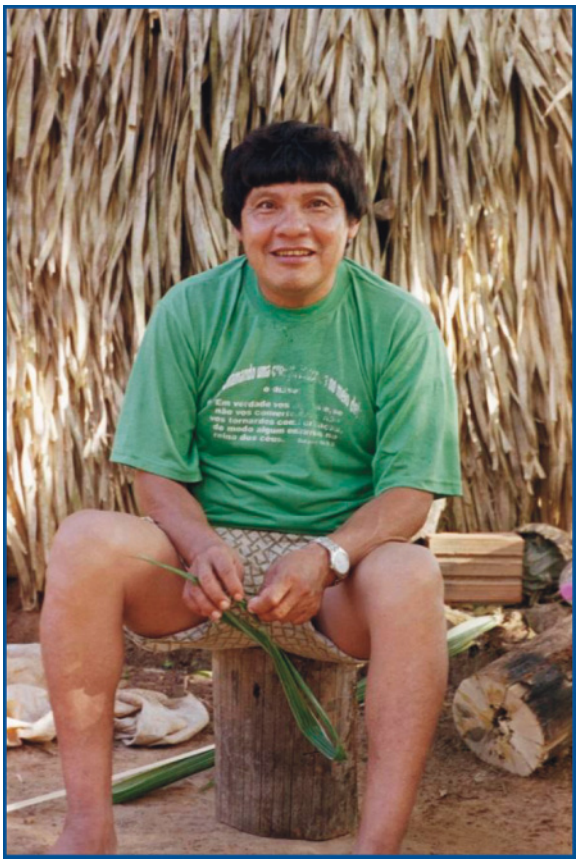


Figure 5 : Agamenon Ğamasakaka Suruí, the non-shaman

when the shaman says that a spirit "stands up and walks out" (*asaradnẽ*) a place, the hearer can infer that this place is a hollow or enclosed volume, such as a house, a hammock, a canoe, and so on. When an object is said to be "at the foot of" (*-sagaĩ*) another one, the hearer can infer that the latter stands relatively high and upright. Such distinction would be trivial if these discourses resorted to everyday words, in their everyday meaning. However, it becomes meaningful when some words are unknown to the hearer, which occurs frequently in the esoteric language of Suruí shamanic songs, or when words are used in an unusual way (for instance: *asaradnẽ abohra-pi*, "he stands up and walks out of the silk cotton tree"; or *ğannih-sagaĩ*, "at the foot of the sky").

Then I assess the cognitive effects of these references among the hearers, on a scale with five degrees of counter-intuitiveness. In the first degree, I classify the references that are not counterintuitive at all (for instance, *soey-yamáh-ĩ*, "at the spirits' place"). In the second degree, I classify references to ordinary objects and events that the hearers cannot see, although these references are not counterintuitive per se (for instance, *so dena aatẽ o-ĩ-ka*, "here the spirit lay down in my hammock"). In the third degree, I classify references to surprising or weird places and objects (Boyer 2001), for instance because of their size, although there are not counter-intuitive strictly speaking (for example, *wapetih amawawa*, "huge thorns swinging across the path"). In the fourth degree, I categorize really counterintuitive references, mainly those that violate folk physics, like going through solid and stiff objects (for instance, *ixaa-pi asaradnẽ*, "he stands up and walks out of a stone"). In the fifth degree, I classify nonsensical locutions, particularly those who attribute a meaningful noun as an inadequate subject or direct object to a meaningful verb (for instance, *ğattih bõbõbõ*, "the sky bangs", or *-pe-perepi*, "listening to a path").

Finally, I classified the locutions and gestures that refer to physical and spatial properties of the objects of the spirits' world according to their frame of reference, a criterion which I adapted from S. Levinson's works (Levinson 2003; Levinson and Wilkins 2006). Levinson distinguishes conceptual domains (kinds of frame of reference) that allow comparing the structure of spatial references in various languages. However, I do not intend to compare several languages in their everyday use –that is, the way people answer the question "Where is X?" in these languages– but to compare various unordinary uses of one language. Consequently, I redefined these conceptual domains and frames of reference, according to specific features of the Suruí language and context. Besides locutions that do not resort to any frame of reference –notably, deictics– I distinguished three frames of reference, according to scale. The first frame corresponds to objects and places that are on a human body scale or smaller; those can be situated in relation to a human body, or surveyed by sight (for instance *apotota itxar*, "he sits on it"; *-alaptẽ*, "they line up"; gestures mimicking body movements or referring to close places).[11] By contrast, the two other

[11] In most languages, references to the spatial locations of that kind of objects require morphosyntactical structures (verbs or adverbs) that are more complex than ordinary locative denotations (Levinson and Wilkins 2006).

frames of reference correspond to objects that exceed the former scale, that one cannot see from one place, and that, consequently, one needs to imagine mentally (Wierzbicka 1989). The second frame of reference corresponds to a "geographical" scale: objects are situated in relation one to another within walking distance for a human being (for instance, *ta-pe-tar iwe-itxa*, "on their path, farther, there lies..."). On the contrary the third frame of reference has a "cosmological" scale: objects are situated in relation to parts of the world that people usually do not travel to (*ğannih-pabi*, "in the sky"; abstract pointing). This distinction between a geographical and a cosmological frame of reference parallels two frames of reference that are used in everyday space. The first one structures the space of the forest in a radial way around the village. Each family has its own area (*xabitor*) where, from the village, first, they open their swiddens and farther they mark out their hunting paths (*me*). Each hunting path is owned by one individual who knows its places. Consequently all forest places are viewed as lining up on paths; they are pinpointed first by obstacles on these paths –river, swamp, hill, concentration of some vegetal species– then according to time of travel to reach them from the village ("a half-day walk away").[12] The second frame of reference is cardinal and structured by two roughly perpendicular axes: the East-West axis of the sun path, and the upstream-downstream axis, which is roughly South-North in the region where the Suruí live. These axes have a cosmological dimension which links the everyday world to the spirits' world. Far downstream lies the kingdom of the water spirits (*ğoaney*). The solar axis is connected with a vertical axis: if one goes far east, one will first reach the eastern spirits' (*ğoraey*) kingdom; then one will go up to the sky, just like the sun, and will meet the sky spirits (*ğannihey*). There is located the entrance to the path to the world of the dead (*pa-ixo-kah-be-pe*, "the path on which our souls leave away"). A reference may resort to several frames –for instance *o-yama-pe*, "the path of my bench" resorts to the geographical frame ("path") and to the body frame ("bench").

The following table shows the number of occurrences of references that display the above mentioned characteristics, not counting multiple occurrences of the same reference –that is the multiple occurrence of an identical locution that refers to the same "real" place; thus I assume that every hearer understands all implications of a locution at its first occurrence, which may not be right, but allows an easier quantified comparison. Because of the small size of the corpus and because the categorization of many locutions relies on a subjective assessment, one should be aware that only strongly marked differences should be considered as meaningful.

		Shamanic songs	Non-ritual speech by a shaman	Non-ritual speech by a non-shaman
Total		64	124	51
Rich		46	49	35
Degree of counter-intuitiveness	Coherent	16	61	32
	Invisible	4	35	4
	Surprising	22	15	15
	Impossible to imagine	5	13	0
	Nonsensical	17	0	0
Frame	None	13	48	8
	Body	19	40	31
	Geographical	23	25	10
	Cosmological	15	14	6

[12] Probably like many Amazonian languages, Suruí has few geomorphological terms ("hill", "river", etc.). Most references to parts of landscape refer to vegetation, particularly to relative concentration (*-kat*) of some species (*pasap-kat*, "area where *babaçu* palms proliferate", *napo-kat*, "area where vines proliferate", and so on). Except vague directions ("in the direction of enemies X"), a few river names, and Portuguese terms introduced after contact, all toponyms are fully transparent, historical, relative and instable. A place in the forest will be referred as "the area where species X proliferate and event Y occurred"; the event Y is usually known to close relatives of the speaker, so that the toponym is meaningless to others (for instance, *mam-ğat peyxo-pug-aka-wa*, "the Brazil nut grove where a young *peyxo* spirit was killed" is understood by ten families only). Others may refer to the same place by pointing out species X and event Z.

References to the spirits' world in shamanic songs

The total number of distinct references in my corpus of songs is relatively low, compared to the size of the corpus (several hours of singing). This comes from the structure of Suruí shamanic songs, made of a refrain that is repeated identically all along the song and always differs from all other songs' refrains, and of verses that vary along a song but often appear identically in several songs. References to physical and spatial properties of the spirits' world can display very different frequency, according to their location in a refrain, in a recurrent part of a verse, or in a once occurring part of a verse. In songs, these references are exclusively verbal: when he sings, the shaman does not gesture towards any objects of the world of the spirits.

Shamanic songs contain many locutions whose inferential potential about the physical aspect of the spirits' world is high: a large majority of these locutions (70%) allows such inferences; this proportion is quite higher in songs than in non-ritual speeches by the shaman. However this richness should not be overestimated. It is rather the low inferential potential locutions that are few: in songs, there are few deictics and movement terms. These locutions are highly counterintuitive. Among those, more than one out of three (35%) – and one out of two among those who have a high inferential potential – refer to object impossible to imagine or appear nonsensical, like, for instance, *o-yama-mayxoh*, "extinguishing my bench", or *ixaey-pe-kũy-pob*, "the sparkling path of the stones strides away". Only one out of four of these locutions appears as coherent; this proportion is quite higher in other kinds of speech (50 to 60%). There are relatively few locutions that do not resort to any frame of reference (20%). The cosmological frame of reference is relatively important (in 25% of locutions, against 10% in other kinds of discourse), because every song includes at least one locution that refers to the species of spirits to which its author belongs – water, sky or eastern spirits; and this locution always mentions the cosmological region in which this species lives.

Consequently, the representation of the spirits' world that the hearers of shamanic songs can form is quite paradoxical. On the one hand, this representation is stimulated by locutions that display a relative semantic richness. On the other hand, this richness does not allow building a coherent representation of the spirits' world.

References to the spirits' world in non-ritual speech by a shaman

Non-ritual speech by a shaman sharply contrasts with shamanic songs. The number of distinct references is quite higher, especially with regards to the smaller size of the corpus (less that one hour of speech). References with high inferential potential are quite less frequent, since they count for only 40% of the total number of references – against 70% in the two other kinds of discourse. Such a low proportion is due to the high number of deictics in these speeches and of vague or abstract gestures. Deictics and gestures refer to a space close to the speaker, which is taken as a generic context for interaction with spirits, even though the depicted interaction occurred in a different place (for instance: *akoy narayip deor, oboatẽ denene*, "the spirit Feather Rattle came here, it lay down in this hammock with me" in order to describe an interaction that occurred thirty years ago, in a distant village, since then destroyed).

The degree of counter-intuitiveness and its expression in non-ritual speech are different too. These references are less counterintuitive than they are in shamanic songs. The proportion of coherent references is higher (50%) and no nonsensical reference appears. Two degrees of counter-intuitiveness are particularly frequent: expressions that refer to invisible objects in a coherent way and expressions that refer to objects impossible to imagine. The formers are connected with deictics: they refer to actions by the spirits that take place in close surroundings, but remain invisible to non-shamans, like in the example above. On the contrary references to objects impossible to imagine appear as specifically intentional in this kind of speech: the speaker repeatedly refers to simple actions that are physically impossible: *wabe-wewãr*, "it lives inside the river bank", *ixaa-pabe-ka ixaa-pika*, "from inside the stone it breaks the stone", and so on.

Finally, frames of reference in these speech contrast with those that are used in shamanic songs. Cosmological and geographical frames are less frequent (10% and 20% respectively); the body frame remains identically frequent (30%);

and expressions without any frame are quite more frequent. The cosmological frame would be even less frequent, if I had not included dialogues with non-shamans, since, in these, every time a spirit is alluded to, the shaman mentions the cosmological region in which its species lives. The frequent absence of frame of reference is connected to the frequency of deictics and to the numerous references to the spatial position of a spirit in relation to another one: *a-itxa-ter-ewa-î*, "it stands apart from others", *ta-ibeb-ğup-na*, "it stands at the end of their queue".

Thus information about the spirits' world is paradoxically poorer in the non-ritual speech of shamans than it is in ritual speech. The non-ritual speech is often abstract, it classifies invisible entities and comments upon their relationships; it does not give a picture of the world in which they live. This world is by default reduced to the generic features of the ordinary human world: in these speeches, spirits are just to be *a-yamáh-î*, "in their village", or *a-sab-ibika*, "in their house". When the spirits' world is depicted, this is done in a relatively coherent way, but the shaman scatters this dull description with references to highly counter-intuitive actions. Therefore, such speeches do not really help the hearers to build a positive representation of the spirits' world. Whereas they are very anxious to listen to shamanic songs, just for aesthetic pleasure, non-shamans noticeably grow tired of listening to shamans' explanations about their activities.

References to the spirits' world in speech by a non-shaman

Perhaps because of the non-shamans' lack of interest for the non-ritual speech by shamans, references to physical, morphological, and spatial properties of the spirits' world in speeches by a non-shaman are more similar to those in shamanic songs than to those in didactic speeches of the shaman. The proportion of references that have a high inferential potential is equally important (about 70%), due to a similar reason: the absence of deictics. As there are almost no deictics, these speeches do not assimilate or compare the spirits' world with the human world in any way.

From the point of view of counter-intuitiveness, there are great differences: speeches by a non-shaman do not include any really counter-intuitive reference, and the proportion of fully coherent references is much higher (60%). However, another degree of counter-intuitiveness is as infrequent in these speeches as it is in songs: the proportion of references to invisible objects is equally low (10%). Again, this mirrors the separation between the spirits' world and the human world.

Finally, expressions that refer to physical aspects of the spirits' world frequently resort to a frame of reference. The proportion of those that do not use any frame is lower (15%) than it is in other kinds of discourse, particularly in didactic speeches by a shaman. Such a low proportion is again connected to the low number of deictics; but it is also explained by the frequent use of a body frame of reference (60%), which contributes to the semantic richness of these references. Indeed, the expressions that use a body frame often refer to monstrous entities that stand on the path of the dead. These usually combine a colourful verbal locution, including ideophonic words, and a gesture mimicking an action or a way of being – for instance *xaya-xaya-xaya yabikãrtih sade*, "the monstruous arrow cleaves through the air, shhh-shhh-shhh", with a huge wave of the speaker's hand.

The non-shaman's speech refers to a few spirits only: the ones he met in dreams, those that stand on the path of dead. However, it gives a quite more colourful picture of these entities and enables the hearer to build a representation that can be quite more expressive, specific, and coherent, at first sight at least. Indeed as soon as someone asks the non-shaman a few questions, major contradictions rise and he is often less skilled to deal with those than the shaman is.

Conclusion

This analysis of the semantic properties of references to physical, morphological, and spatial aspects of the world in which a shaman is supposed to interact with invisible entities shows that these properties vary greatly from a discursive genre to another, that is, from a pragmatic context to another – when defining these contexts in a broad and stable way: specialist speaker or non-specialist speaker, ritual or non-ritual context. Previous studies of shamanic traditions, notably in the Amazonian cultural area (Severi 1993; Déléage 2007) had already shown that crucial terms in the specialists' speech, which refer to key concept of these populations'

so-called cosmologies, like "soul", "spirit", and so on, may have very different meanings –sometimes very vague– according to the various pragmatic contexts in which they are used. The present analysis of Suruí discourses about the world of supernatural entities shows that variability does not concern only explicit key notions of these discourses –which are more prone to discussion–, but it also affects their implicit background, that is, the physical, morphological, and spatial representations of the world in which the spirits are said to live. As such representations are quite less topicalized by this speech –because they can only be inferred from scattered elements– they are less prone to discussion and contestation.

The relations between the different kinds of discourse are complex and non-unambiguous. Indeed ritual speech –that is, songs– are more stable, but also more opaque; to understand them, the hearers often need to base their interpretations on non-ritual speeches. Speech by non-shamans claims to be based on shamans' speech or, at least, not to contradict the latter. However, since all shamans used to be non-shamans, they used to speak non-specialist discourse, and to hear non-specialist speech –because shaman usually keep their didactic speech for relatively old people. Therefore it is impossible to identify a kind of discourse as the source of other kinds; and it is impossible to identify unidirectional ways of propagation for the representation of the supernatural world from a kind of discourse to another. Consequently any hypothesis of "epidemiological" transmission would be very flimsy, as long as it remains based on semantics. Indeed the circulation of such implicit representations that can be inferred from the background of these discourses relies more on pragmatic context of speaking and hearing, than on semantic properties.

Acknowledgments

I would like to thank the Fyssen Foundation for the postdoctoral fellowship that gave me the possibility of a one year stay in 2012-2013 at the Max Planck Institute for Psycholinguistics in Nijmegen (Netherlands), under the supervision of Steve Levinson, and a fieldwork trip to Brazil as well. The ideas presented in this article were first exposed in the workshop "Place reference and landscape" in Nijmegen in April 2013.

Dans quelle mesure les habiletés motrices traditionnelles reflètent-elles un modèle culturel ? Expérimentations de terrain auprès de potiers experts français et indiens

Enora GANDON

Actuellement en congé sabbatique, Institut des Sciences du Mouvement

Résumé

Les habiletés motrices traditionnelles sont transmises culturellement au fil des générations. Jusqu'à aujourd'hui, on ne sait pas dans quelle mesure une habileté apprise dans un contexte culturel donné reflète le modèle spécifique de ce contexte. Nous poursuivons dans cet article un double objectif à la fois théorique et expérimental : i) présenter, dans le cadre de la psychologie écologique, les mécanismes comportementaux à l'œuvre dans la transmission culturelle des habiletés motrices et ii) mettre en œuvre des expérimentations de terrains pour évaluer l'influence du modèle culturel sur l'habileté motrice. En analysant les positions de main utilisées par des potiers experts français et indiens, nous avons montré que leurs habiletés reflètent effectivement des modèles culturels transmis lors de l'apprentissage. En revanche, ces modèles ne sont pas complètement spécifiques à un contexte culturel donné, ils contiennent également des positions transculturelles déterminées par les contraintes de l'espace de la tâche. De plus, l'identification de positions individuelles a confirmé que l'apprentissage n'est pas une simple copie du modèle transmis mais plutôt une réappropriation individuelle de ce modèle. Enfin, nous avons observé que les deux communautés indiennes Prajapati et Multani Kumhar partagent quasiment le même répertoire de positions. Ceci révèle l'existence d'emprunts interculturels qui mériteraient d'être plus amplement étudiés.

Mots-clés

Transmission culturelle, habileté motrice, psychologie écologique, tournage, poterie, positions de main, modèle culturel

To what extent do traditional motor skills reveal a cultural model ? Fields experiments with expert French and Indian potters

Abstract

Traditional motor skills are culturally transmitted across generations. Yet, the question remains to what extent a motor skill developed within a given cultural setting corresponds to a model specific to this cultural setting. In this article we present, within the theoretical framework of ecological psychology, the behavioural mechanisms underlying the cultural transmission of motor skills as well as some of our experimental results evaluating the influence of cultural models on the potter's motor skill of wheel-throwing. By analysing the hand positions used by expert French and Indian potters, we demonstrate that their skills indeed reveal cultural models transmitted in the course of learning. However, such models are not completely specific to a given cultural context, as they also contain transcultural hand positions determined by the task constraints. Moreover, the identification of individual-specific hand positions confirmed that learning should not be understood as resulting

from simply copying a model, but rather as an individual reappropriation of this model. Finally, we observed that the two Indian communities studied, Prajapati and Multani Kumhar, shared almost the same repertoire of positions. This reveals the existence of intercultural borrowings that merit to be more widely studied.

Keywords

Cultural transmission, motor skill, ecological psychology, wheel throwing, pottery, hand positions, cultural model

Introduction

Chaque environnement culturel constitue une réponse singulière aux besoins communs des hommes : toutes les sociétés ont une langue et chaque société a sa langue, toutes les sociétés ont un système de parenté et chaque société a son système de parenté, toutes les sociétés ont des habitations et chaque société a son architecture,... De la même façon, tous les humains partagent un certain nombre d'habiletés motrices et chaque société a sa manière pour effectuer ces habiletés motrices. Il existe ainsi une diversité culturelle observable dans les différents aspects du comportement humain et notamment l'aspect moteur. Selon les termes de la dual inheritance theory, le développement du comportement humain dépend non seulement de la transmission génétique mais également de la transmission culturelle qui est précisément le mécanisme à la source de la diversité culturelle (Durham, 1991 ; Cavalli-Sforza and Feldman, 1981 ; Boyd and Richerson, 1985 ; Heinrich and McElreath, 2003 ; Richerson and Boyd, 2005). L'expression « habileté motrice traditionnelle » fait référence à cette transmission culturelle. Une habileté motrice traditionnelle résulte d'une transmission entretenue sur de nombreuses générations ; elle peut être commune (telle que la posture assise) ou plus spécialisée (comme les habiletés artisanales par exemple). Les ethnologues se sont intéressés aux habiletés motrices traditionnelles dès les fondements de leur discipline (Bateson, 1977 ; Haudricourt, 1948, 1987 ; Hewes, 1955 ; Mauss, 1936). Jusqu'à ce jour cependant, il n'existe pas à notre connaissance de travaux expérimentaux mesurant l'impact de la transmission culturelle sur le développement d'une habileté motrice donnée. Ainsi, on ne sait pas dans quelle mesure l'habileté motrice développée par un individu reflète un modèle culturel. Pour répondre à cette question, essayons de comprendre tout d'abord quels sont les mécanismes comportementaux à l'œuvre dans la transmission culturelle des habiletés motrices.

Mécanismes comportementaux de la transmission culturelle des habiletés motrices

Dans le cadre de la psychologie écologique, on considère que l'habileté motrice est déterminée par les contraintes de la *tâche*, celles de l'*individu* et celles de l'*environnement matériel* **(Fig. 1)**. Cet ensemble de contraintes est appelé l'*espace de la tâche* (Newell, 1986 ; Reed and Bril, 1996). Pour accomplir une tâche donnée, l'individu utilise les contraintes de l'espace de la tâche grâce à un couplage mécanique et informationnel avec son environnement (Bootsma, 1998 ; Gibson, 1979 ; Kugler and Turvey, 1987 ; Warren, 2006). Le système neuromusculaire étant flexible, une même tâche peut être effectuée par des habiletés motrices différentes (Bernstein, 1967). Les différentes habiletés motrices possibles pour effectuer une tâche donnée constituent *l'espace moteur*. Durant l'apprentissage, l'individu explore l'espace de la tâche afin d'éduquer son attention vers les informations sensorielles utiles au contrôle de l'habileté motrice (Newell, 1991 ; Jacobs and Michaels, 2007).

Plusieurs travaux ont montré que l'environnement social joue un rôle dans l'apprentissage en éduquant l'attention de l'apprenant (Boyer and Bril, 2001 ; Bril, 1986, 2002a ; Greenfield et al., 2003 ; Rogoff et al., 2003). Ce guidage social – qui correspond à la transmission culturelle des habiletés motrices (Ingold, 2001) – non seulement facilite l'apprentissage mais il amène également l'apprenant à développer une habileté motrice culturellement située, c'est-à-dire une habileté correspondant à la façon habituelle d'exécuter une tâche donnée au sein de la société où s'effectue l'apprentissage (Bril, 2002b).

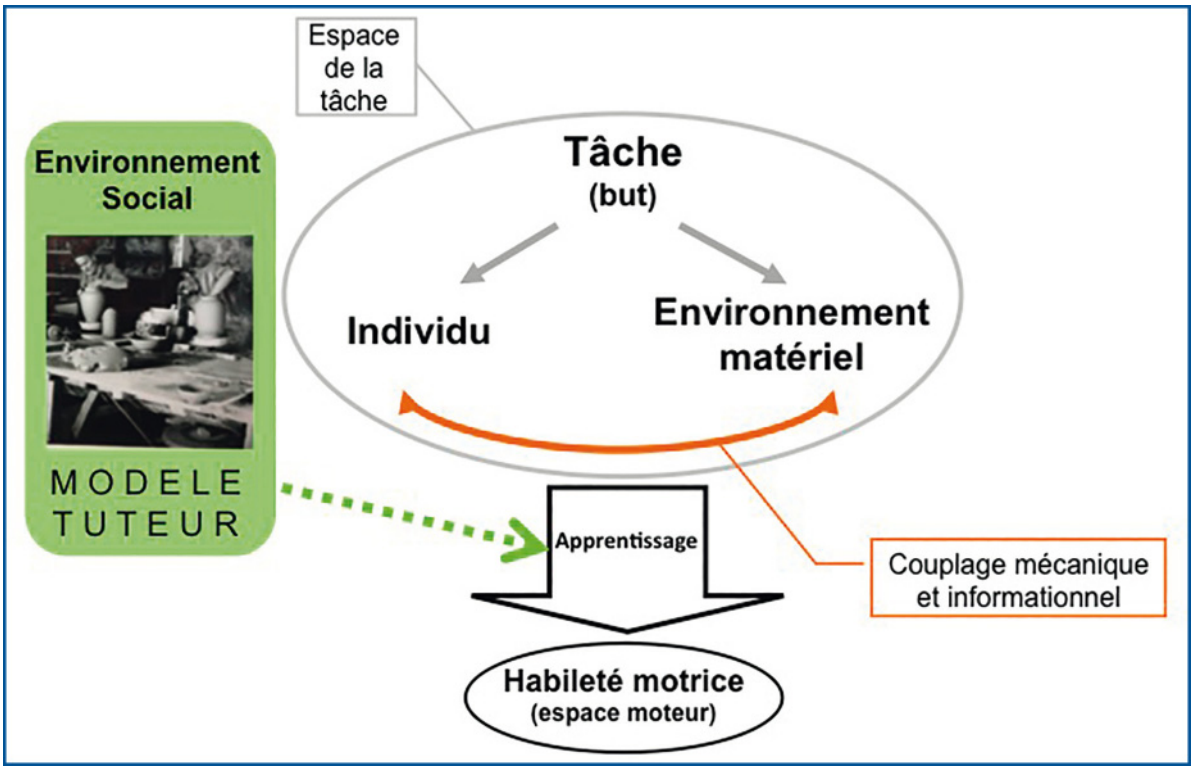


Figure 1 : La transmission des habiletés motrices dans le cadre de la psychologie écologique. L'habileté motrice résulte des contraintes de l'espace de la tâche grâce au couplage mécanique et informationnel entre l'individu et son environnement (Bootsma, 1998 ; Gibson, 1979 ; Kugler and Turvey, 1987 ; Newell, 1986 ; Reed and Bril, 1996 ; Warren, 2006). Du fait de la flexibilité du système neuromusculaire, il existe un ensemble d'habiletés motrices possibles pour effectuer une tâche donnée (l'espace moteur). Au cours de l'apprentissage, l'environnement social guide l'apprenant, notamment en lui fournissant des modèles d'action (modèle tuteur) (Al-abood et al., 2001 ; Bandura, 1969 ; Janelle et al., 2003 ; Neuman and Gray, 2013 ; Scully and Newell, 1985).

Ces habiletés sélectionnées culturellement constituent un sous-ensemble spécifique au sein de l'espace moteur. L'observation d'un modèle constitue l'un des principaux mécanismes d'éducation de l'attention (Al-abood et al., 2001 ; Bandura, 1969 ; Janelle et al., 2003 ; Neuman and Gray, 2013 ; Scully and Newell, 1985). Si l'on se place du point de vue de l'apprenant, on dira que l'apprentissage consiste à reproduire l'habileté exécutée par son tuteur (**Fig. 1**).

Démarche expérimentale et hypothèses

Nous avons adopté une démarche expérimentale pour évaluer l'influence de la transmission culturelle sur une habileté motrice particulière. Le tournage de poterie au tour a été choisi comme exemple. Il s'agit d'une habileté ancienne dans l'histoire de l'humanité et présente dans de nombreuses aires culturelles (Rice, 1987). Le tournage consiste à produire un récipient en argile, d'une forme choisie à l'avance, à l'aide d'un tour dont la girelle (i.e. plateau circulaire) est orientée horizontalement et activée à une vitesse comprise entre 50 et 150 t/min (Gandon et al., 2011a ; Pierret, 1995 ; Rye, 1977). Tout au long du processus, le potier utilise une succession de positions de main différentes (voir **Fig. 2**) et une position donnée peut être utilisée à différents moments du façonnage (Gandon et al., 2013). D'après les enquêtes de terrains que nous avons menées dans plusieurs pays (France, Maroc, Turquie, Azerbaïdjan, Inde, Territoires Palestiniens, Népal et Thaïlande), on sait que les potiers experts encouragent leurs élèves à observer les positions de main pour être capables de les reproduire. Ces positions constitueraient donc le modèle que les tuteurs transmettent à leurs apprenants.

Figure 2 : Exemples de positions de main utilisées pour le tournage. Les images ont été extraites d'une vidéo d'un potier Multani produisant une sphère avec 2.25 kg d'argile (Gandon et al., 2013).

Dans cette étude, nous avons analysé de façon systématique les positions de main utilisées par des potiers de trois groupes culturels distincts. Des expérimentations ont été menées en France et en Inde avec des artisans experts produisant dans leurs conditions habituelles de travail quatre formes, avec deux quantités d'argile distinctes. Nous avons quantifié – en termes de nombre et de durée – les positions de main utilisées, pour chaque potier produisant les quatre différentes formes dans chacune des deux masses. On s'attend à ce que les positions observées correspondent au modèle transmis lors de l'apprentissage. Et, étant donné la flexibilité du système neuromusculaire, on émet l'hypothèse que ces positions soient – au moins en partie – spécifiques à chaque groupe.

Méthode

Expérience standardisée dans trois contextes culturels

Au total, 19 potiers experts ont participé à l'étude : sept potiers français (groupe F), six potiers indiens de la caste Pradjapati (groupe Pr) et six potiers indiens de la caste Multani Kumhar (groupe MK). Alors que les potiers F habitent et travaillent dans différentes régions de France, les potiers des groupes Pr et MK appartiennent respectivement à des communautés hindoues et musulmanes qui vivent dans la même région de l'Uttar Pradesh, souvent dans les mêmes villages. Cependant, ces groupes se distinguent par des traditions techniques propres, les tours et les fours notamment sont différents et un phénomène de non-emprunt a été observé (Roux, 2013). En Inde l'organisation sociale de la production est traditionnelle, elle a lieu au sein de castes endogames qui produisent de façon intensive des objets usuels (Kramer, 1997 ; Roux and Corbetta, 1989 ; Saraswati et al., 1966). En France au contraire, l'organisation du métier a été largement modernisée, l'apprentissage se fait dans des centres de formation et les potiers produisent en faible quantité des objets à forte valence décorative. En plus de ces caractéristiques sociologiques distinctes, les trois groupes se différencient aussi par le type de tour utilisé : les potiers F utilisent un tour électrique activé avec une pédale (**Fig. 3**, photo de gauche) tandis que les potiers Pr utilisent un tour de forte inertie activé à l'aide d'un bâton (**Fig. 3**, photo du milieu) et les potiers MK un tour de faible inertie activé par le pied (**Fig. 3**, photo de droite). Tous les participants avaient une expérience du tournage supérieure à dix années de pratique (F : 30.3 ± 8.6 ans ; Pr : 22.3 ± 11.8 ans ; MK : 16.5 ± 6.4 ans).

Travaillant dans leurs conditions habituelles de travail, les potiers étaient invités à reproduire quatre formes (cylindre, bol, sphère et vase) avec deux masses d'argile (0.75 et 2.25 kg) (**Tab. 1**). Chacune des quatre formes était extérieure au répertoire habituel des potiers. Le jour précédent l'expérience chaque participant s'entraînait brièvement en produisant au moins une fois chacune des huit conditions expérimentales. Durant l'expérience, les potiers ont reproduit cinq fois

Figure 3 : Les tours utilisés dans les trois contextes culturels. De gauche à droite : le tour électrique (activé par une pédale) utilisé par les potiers français, le tour-toupie utilisé par les potiers Prajapati et le tour-à-pied utilisé par les potiers Multani.

Forme	Cylindre		Bol		Sphère		Vase	
Modèle (dessin 2D)								
Masse d'argile (kg)	0.75	2.25	0.75	2.25	0.75	2.25	0.75	2.25

Tableau 1 : Les huit conditions expérimentales définies par quatre formes (cylindre, bol, sphère et vase) et deux masses d'argiles (0.75 et 2.25 kg).

chacune des huit conditions expérimentales. L'assemblage de chaque potier contenait ainsi 40 pots. Les conditions expérimentales ont été produites dans un ordre aléatoire afin d'éviter un phénomène d'apprentissage. Nous avons élaboré ce protocole expérimental en nous appuyant sur nos connaissances de l'expertise du tournage, de façon à faire ressortir dans les comportements enregistrés l'expertise des participants (Gandon et al., 2011b ; Gandon et al., 2014a).

Enregistrement et analyse des données

Les sessions expérimentales ont été filmées (Panasonic NV-GS320) et les films ont été analysés avec un logiciel de chronométrage (Actogram). Nous avons capturé les séquences de positions de main utilisées pour la production de chaque pot, en mesurant la durée (en secondes) d'utilisation de chaque position. Un code (un numéro) a été attribué à toutes les positions de main identifiées parmi les trois groupes et les huit conditions expérimentales. De façon à identifier le plus objectivement possible les positions observées, nous avons établi un éthogramme dans lequel chaque position a été illustrée par plusieurs photos. Au sein des trois groupes et des huit conditions expérimentales, un répertoire total de 77 positions de main a été identifié (on peut voir un échantillon de ces 77 positions sur les **Fig. 2 et 5**). Les actions ne concernant pas directement le façonnage (mouiller l'argile, prendre un outil, enlever un caillou dans l'argile,...) ont également été chronométrées puis exclues de la durée totale du façonnage. Pour chaque pot façonné, nous avons calculé le pourcentage de façonnage (%Shap) de chacune des 77 positions identifiées. Autrement dit, nous avons calculé le temps que le potier passait en utilisant chacune des positions. Nous avons ainsi obtenu pour chaque potier et chacune des huit conditions expérimentales le répertoire individuel moyen des %Shap correspondant à un vecteur

de 77 valeurs. Etant donné que chaque potier n'utilisait qu'une partie du répertoire total, plusieurs valeurs de ce vecteur étaient égales à zéro.

Résultats

Parmi le répertoire total de 77 positions, le répertoire des potiers français comprend 55 positions, alors que les répertoires des deux groupes indiens sont plus restreints (38 positions pour le répertoire Pr et 36 positions pour le répertoire MK). Afin de visualiser les positions de main utilisées dans chacun des trois groupes, nous avons tracé sur la **Fig. 4** les fréquences cumulées des différentes positions, toutes conditions expérimentales confondues. Un premier aperçu permet de constater une distinction entre le groupe français d'une part et les deux groupes indiens d'autre part. En effet, toutes les positions de la moitié droite du graphique (de la position 45 à la position 77) ne sont utilisées que par les potiers français. De plus, ces derniers n'utilisent pas du tout les positions 3, 5, 9, 14, 15, 16, 19, 20, 28, 30 et 39 qui sont uniquement utilisées dans chacun des deux groupes indiens. Au total, 21 positions ne sont utilisées que par des potiers français (par deux potiers au minimum). Concernant les deux groupes indiens, ils ont des répertoires voisins et se différencient seulement par un nombre limité de positions : les positions 25 et 26 qui ne sont utilisées que par les potiers Pr et les positions 31, 32 et 42 qui ne sont utilisées que par les potiers MK (dans les deux cas, par deux potiers au minimum). Si on décompte les positions communes aux différents groupes, on constate que 18 positions sont utilisées par les potiers des trois groupes, 19 positions sont partagées entre les potiers F et Pr, 21 positions sont partagées entre les groupes F et MK, et 29 positions sont partagées entre les groupes Pr et MK. Certaines de ces positions culturelles et transculturelles peuvent être observées sur la **Fig. 5**.

Nos résultats montrent également une influence individuelle dans la façon d'utiliser les mains pour façonner l'argile (**Fig. 4**). Dans chacun des trois groupes, il existe en effet un certain nombre de positions qui ne sont utilisées que par un seul membre du groupe. Dans le groupe F ces positions individuelles sont au nombre de 15, dans les deux groupes indiens Pr et MK, les positions individuelles sont respectivement au nombre de 7 et 5. A l'opposé, il existe également des positions qui sont utilisées par tous les membres du groupe, elles sont au nombre de 6 dans le groupe F et de 16 et 10 dans les groupes Pr et MK. Enfin, il est intéressant de noter que la taille moyenne des répertoires utilisés par les potiers est similaire dans chacun des trois groupes (F = 24, Pr = 27, MK = 23). Autrement dit, chaque potier utilise environ 25 positions différentes, ceci quelle que soit son origine culturelle.

Nous avons décrit jusqu'à présent les positions de main utilisées par les potiers toutes conditions expérimentales confondues. Analysons maintenant comment les potiers utilisent les positions en fonction de la masse et de la forme des pots

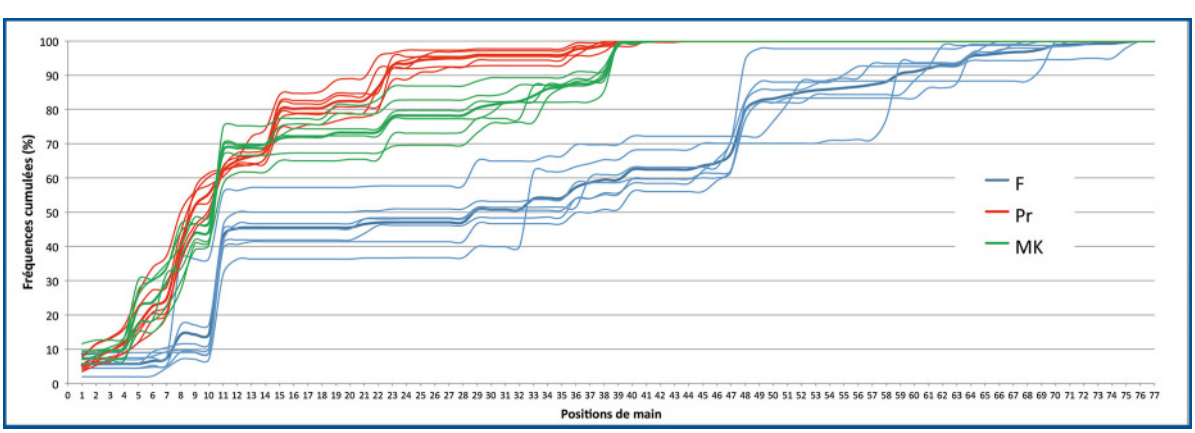


Figure 4. Fréquences cumulées (%Shap) des durées de façonnage de chacune des 77 positions de main identifiées, toutes conditions expérimentales confondues. Pour chacun des trois groupes (bleu = Français, rouge = Prajapati et vert = Multani), la ligne tracée en gras représente la moyenne du groupe et les lignes fines représentent individuellement chaque potier du groupe.

Figure 5. Exemple de positions de main culturelles et transculturelles relevées dans notre étude. La première ligne (en partant du haut) présente quatre positions utilisées spécifiquement par les potiers français, les deux lignes suivantes présentent quatre positions utilisées spécifiquement par les potiers indiens (Prajapati et Multani respectivement), et la dernière ligne présente des positions transculturelles (i.e. utilisées dans chacun des trois groupes). Parmi les quatre positions Prajapati, les deux positions de droite ne sont utilisées que par un seul potier, parmi les quatre positions Multani, la troisième (en partant de gauche) n'est utilisée que par un seul potier.

(**Tab. 1**). Concernant la masse tout d'abord, on observe que les potiers utilisent plus de positions de main lorsqu'ils façonnent les grands pots ($F(1, 16) = 34.76$, $p < 0.001$), ceci dans les trois groupes ($F(2, 16) = 3.61$, *ns*). En moyenne, les potiers utilisent deux positions de plus lorsqu'ils façonnent les grands pots. Sur l'ensemble des trois groupes, la quasi-totalité des potiers (18 sur un total de 19 potiers) utilisent une ou plusieurs positions spécifiques pour le façonnage des grands pots et certains potiers utilisent des positions spécifiques pour le façonnage des petits pots (**Tab. 2**).

Concernant l'effet de la forme, on constate que le bol est façonné avec significativement moins de positions que les trois autre formes ($F(3, 48) = 4.56$, $p < 0.02$), ceci dans les trois groupes ($F(6, 48) = 0.44$, *ns*). Pour le façonnage du bol les potiers utilisent en moyenne deux positions de moins que pour le façonnage des

	0.75 kg	2.25 kg	Cylindre	bol
Français	54, 63, 75, 77	2, 4, 23, 41, 65, 66, 68, 71, 76	77	74
nombre de potier	4	7	1	1
Prajapati	14, 28, 30	17, 18, 19, 20, 27, 44	28	18, 19, 20, 21, 26, 30, 44
nombre de potier	6	6	1	6
Multani	14, 32	19, 20, 22, 42	6	16, 19, 20, 30, 32
nombre de potier	2	5	4	6

Tableau 2. Positions de main spécifiques au tournage des petites (0.75 kg) et grandes (2.25 kg) masses, du cylindre et du bol, dans chacun des trois groupes. Aucune position n'est spécifiquement utilisée ni pour la sphère ni pour le vase (ces deux formes étant façonnées avec les mêmes positions). Les lignes intitulées « nombre de potier » indiquent (pour chaque groupe séparément) le nombre de potier utilisant au moins une des positions spécifiques.

trois autres formes. De la même façon que la masse d'argile détermine l'usage de certaines positions, la forme joue également un rôle dans le choix des positions utilisées. On constate en particulier que pour le façonnage du bol, 13 potiers (tous les potiers Pr et MK et un potier F) utilisent des positions spécifiques (**Tab. 2**). Pour le cylindre, six potiers (1 potier F, 1 potier Pr et 4 potiers MK) utilisent une position spécifique (différente pour chaque groupe). La sphère et le vase sont façonnés avec les mêmes positions, ceci dans chacun des trois groupes.

Discussion

Dans le cadre théorique de la psychologie écologique, la transmission culturelle a lieu au cours de l'apprentissage par l'éducation de l'attention de l'apprenant vers les informations sensorielles utiles à l'accomplissement de la tâche (**Fig. 1**). Cette éducation de l'attention se fait notamment par l'observation d'un modèle, c'est-à-dire que l'apprenant tente de reproduire l'habileté telle qu'il la voit exécutée par son tuteur. Ainsi, en même temps qu'elle soutient l'apprentissage, la transmission culturelle canalise l'apprenant vers le développement d'une habileté culturelle, c'est-à-dire une habileté dont certains aspects sont spécifiques à la société d'appartenance de l'apprenant. Notre objectif dans cette étude était d'évaluer l'influence du modèle culturel sur l'habileté motrice.

Nous avons étudié une habileté donnée, le tournage de poterie, dans trois contextes culturels distincts (Français, Prajapati et Multani Kumhar). D'après plusieurs enquêtes de terrains, nous savons que les potiers experts insistent pour que les apprentis observent et reproduisent les différentes positions de main utilisées dans le façonnage. Ainsi, ces positions de mains semblent déterminantes et sont probablement reproduites d'une génération à l'autre. Nous devrions donc observer un répertoire de positions commun aux membres d'un groupe culturel donné. Et, étant donné la flexibilité du système neuromusculaire, nous émettions l'hypothèse que ces répertoires soient différents d'un groupe culturel à l'autre. Pour tester ces hypothèses, nous avons enregistré et quantifié les positions de main utilisées par les potiers des trois groupes culturels distincts, lors de la production de quatre formes avec deux masses d'argile.

Parmi les 77 positions identifiées dans notre étude, la présence de 26 positions culturellement spécifiques (21 pour le groupe F, 2 et 3 pour les groupes Pr et MK respectivement) attestent de l'existence d'une tradition motrice spécifique à chaque groupe. La transmission culturelle est sûrement la cause de l'existence de ces positions spécifiques puisqu'elles sont utilisées par plusieurs membres d'un groupe donné et absentes dans les deux autres groupes. Ainsi, comme nous le supposions, chaque groupe a investi différemment l'espace moteur, développant un répertoire singulier de positions de main (**Fig. 6**). De façon intéressante, on constate que les deux traditions indiennes sont voisines puisqu'elles partagent plus de la moitié de leurs répertoires

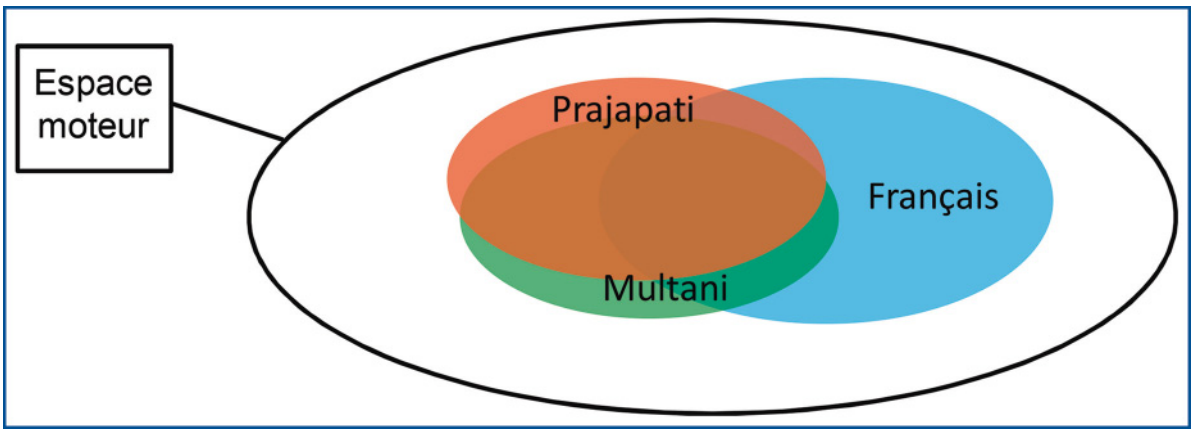


Figure 6. Schématisation des trois sous-ensembles d'habiletés motrices sélectionnées par les trois groupes (bleu = Français, rouge = Prajapati et vert = Multani) dans l'espace moteur de la tâche.

(29 positions partagées sur des répertoires totaux de 38 et 36 positions respectivement pour les groupes Pr et MK).

Si l'habileté motrice reflète bien un modèle culturel spécifique, nos résultats indiquent que cette marque culturelle est loin d'être déterminante. En effet, dans chacun des trois groupes, les positions culturelles représentent moins de la moitié des répertoires de positions de main. La majeure partie des positions est en fait transculturelle et / ou individuelle. Ainsi, l'habileté développée par les potiers ne reflète pas seulement un modèle culturel, elle reflète également les contraintes transculturelles de l'espace de la tâche et la singularité individuelle.

L'influence de l'individu tout d'abord, est observable à travers les 27 positions de main individuelles relevées dans l'étude (15 positions dans le groupe F, 7 et 5 positions dans les groupes Pr et MK respectivement). Parmi les trois groupes confondus, plus de la moitié des participants (14, dont 6 F, 5 Pr et 3 MK) utilise une ou plusieurs positions individuelle(s). De plus, même les positions qui sont partagées par plusieurs potiers sont souvent utilisées avec de subtiles variations individuelles. Ainsi, il est possible d'identifier un potier par une observation fine de ses positions de main. Ces résultats confirment le fait que toute habileté transmise socialement est réappropriée par l'apprenant et reflète ainsi des caractéristiques individuelles (Biryukova and Bril, 2008 ; Thelen, 1990).

D'un autre côté, on observe aussi une influence des contraintes transculturelles sur l'habileté. Les 18 positions de main partagées par les potiers des trois groupes révèlent l'effet structurant de contraintes qui sont communes aux trois groupes : le corps humain, la tâche et l'environnement matériel. En effet, les 19 potiers possèdent des mains humaines, ils ont pour consigne de produire les mêmes formes et ils façonnent le même matériau (l'argile) placé sur un plateau horizontal tournant entre 50 et 150 t/min. Nous avons relevé 77 positions de main dans notre étude mais la prise en considération d'un plus grand nombre de traditions potières révèlerait sûrement un espace moteur global plus large (peut-être 150 ou 200 positions). Il est probable que parmi cet espace moteur global, certaines positions soient incontournables, et donc transculturelles. Pour centrer l'argile au début du façonnage par exemple, nous serions étonnés de ne pas observer la position n° 1 consistant à placer les paumes des mains – dans leurs hémiplans respectifs – de part et d'autre de la motte. En revanche, à d'autres moments du façonnage la marge de manœuvrabilité est plus importante et des positions variées peuvent être utilisées. C'est dans cette marge de manœuvrabilité qu'apparaît l'originalité culturelle et individuelle.

La masse et la forme des productions (contraintes de la tâche) font également partie des contraintes transculturelles. En effet, dans les trois groupes, le répertoire des positions s'adapte en fonction de ces facteurs. L'augmentation de la masse d'argile amène les potiers à utiliser un répertoire de positions plus large comprenant notamment certaines positions spécifiques aux grandes masses. Nous pensons que ces positions spécifiques permettent de produire

plus de force sur l'argile, une hypothèse à vérifier. Concernant la forme des pots, nos résultats nous amènent à penser que les potiers utilisent les mêmes positions de main lorsqu'ils façonnent des formes voisines, comme la sphère et le vase dans cette étude. Il serait nécessaire de tester plus de formes différentes pour approfondir l'analyse de cette relation entre les positions de main et la forme des pots.

Le nombre moyen de positions de main (25 positions) peut également être considéré comme une contrainte transculturelle puisqu'il est similaire dans les trois groupes. Ce nombre correspondrait à la quantité de positions utiles (et mémorisables) pour façonner l'argile sur un tour. Plus d'études interculturelles sont nécessaires pour tester cette hypothèse.

Un autre résultat notable est la plus faible homogénéité du répertoire moteur français comparée à l'homogénéité des répertoires moteurs indiens. Tout d'abord, les positions individuelles sont plus importantes dans le groupes français (15 positions) que dans les groupes indiens (7 et 5 positions pour les groupes Pr et MK respectivement). De plus, le nombre de positions partagées par tous les membres du groupe est plus faible dans le groupe français (6 positions sur un répertoire total de 55 positions) que dans les groupes indiens (16 et 10 positions pour les groupes Pr et MK dont les répertoires totaux comprennent 38 et 36 positions). Rappelons que les potiers français constituent un groupe hétérogène car ils sont originaires de différentes régions et possèdent chacun leur atelier propre. A contrario, les groupes indiens constituent des groupes homogènes puisqu'ils vivent dans un même village et travaillent dans des ateliers familiaux. En somme, l'homogénéité des traditions motrices dépend de l'homogénéité des groupes sociaux considérés. Ainsi, parce que le groupe français est constitué de potiers ayant appris le tournage dans différentes régions, les modèles culturels français seraient plutôt à analyser au niveau régional et non national. En outre, le fait que le répertoire F soit plus étendu que les deux répertoires indiens n'est peut-être qu'une conséquence de la différence d'homogénéité entre les groupes. En effet, les 55 positions de main observées dans le groupe F représentent probablement les positions de main de plusieurs sous-cultures régionales.

Conclusion

La transmission culturelle des habiletés motrices est un objet de recherche clef pour les ethnologues et archéologues qui étudient l'évolution des systèmes techniques des sociétés présentes et passées (Haudricourt, 1987 ; Leroi-Gourhan, 1945). Au cours de l'apprentissage, l'habileté exécutée par le tuteur est un modèle pour l'apprenant. Ainsi, certains aspects de l'habileté sont transmis au fil des générations. La question que nous posions dans cette étude consistait à savoir dans quelle mesure l'habileté apprise dans un contexte culturel donné reflète le modèle spécifique à ce contexte.

Nos résultats confirment tout d'abord que l'habileté apprise dans un contexte culturel donné reflète bien un modèle spécifique à ce contexte, ici en l'occurrence, les potiers reproduisent de façon traditionnelle certaines positions de main. Notre étude a fait ressortir une tradition motrice française constituée de 21 positions spécifiques et deux traditions motrices indiennes, Prajapati et Multani Kumhar, constituées de 2 et 3 positions spécifiques. Parce que ces positions s'observent chez plusieurs potiers d'une tradition donnée et sont absentes des deux autres traditions, nous pouvons en conclure qu'elles résultent d'un modèle culturel transmis lors de l'apprentissage.

D'un autre côté, notre étude montre que l'habileté est loin d'être complètement déterminée par un modèle culturel spécifique. En effet, nos résultats montrent que la spécificité culturelle des répertoires français et indien est limitée, les positions culturelles représentant moins de la moitié de ces répertoires.

L'existence de positions transculturelles indique que l'habileté motrice est structurée par les contraintes de l'espace de la tâche, ces contraintes étant indépendantes de l'environnement culturel. Cela ne signifie pas pour autant que les positions transculturelles ne sont pas elles aussi transmises culturellement. Il est tout à fait probable que le modèle copié par l'apprenant comprenne à la fois des positions culturelles et des positions transculturelles.

Une part non négligeable de l'habileté reflète également l'influence de l'individu, ce qui transparaît au travers les positions individuelles. Ceci confirme que l'apprentissage n'est pas une simple copie du modèle mais une appropriation

individuelle de ce modèle. En quelque sorte, une « erreur de copie » apparaît entre l'habileté modèle du tuteur et l'habileté développée par l'apprenant. Ainsi, il est permis de penser qu'une évolution du modèle culturel se fasse au fil des générations, de la même façon qu'une évolution des artefacts culturels s'observe au cours du temps (Eerkens and lipo, 2005 ; Gandon et al., 2014b).

Enfin, le fait que les potiers Pr et MK ont des traditions motrices voisines est surprenant étant donné qu'il n'y a pas d'emprunt technique entre elles. Les tours et les fours notamment sont différents et chacune des communautés possèdent ses ateliers propres (Roux, 2013). En outre, ces deux communautés ont des historiques distincts puisque les Prajapati vivent dans la région de l'Uttar Pradesh depuis plus de 1000 ans alors que les Multani Kumhar sont arrivés dans cette région au XIVe siècle. Nous pensions que les deux communautés avaient entretenues au cours du temps une tradition motrice propre. Le fait que la majeure partie de leur répertoire soit commun indique au contraire que des emprunts ont eu lieu. Nous savons que, pour des raisons économiques, les potiers Multani Kumhar sont amenés à produire depuis les années 70 une partie des objets traditionnellement fabriqués par les Prajapati (Roux, 2008). Serait-il possible que cet emprunt de formes se soit accompagné d'un emprunt des positions de main ? Des enquêtes de terrains dans la région où cohabitent ces deux communautés sont nécessaires pour éclaircir ce phénomène d'emprunt interculturel.

Remerciements

Je remercie la Fondation Fyssen pour son support financier ; Reinoud Bootsma, Blandine Bril, Valentine Roux et John Endler pour les nombreuses discussions constructives autour de cette recherche; Alain Kerguelen pour son aide technique au traitement des données; Uzy Smilansky pour son accueil au sein du Computerized Archaeology Laboratory à l'Université Hébraïque de Jérusalem et Leore Grosman pour son aide au traitement des données et son encadrement lors de mon Post-doctorat. Je suis également particulièrement reconnaissante envers Valentine Roux pour m'avoir invitée à mener des expérimentations en Inde et envers Reinoud Bootsma pour son aide à la finalisation de cet article.

Bibliographie

- Al-abood, S.A., Davids, K., Bennett, S.J., 2001. Specificity of task constraints and effects of visual demonstrations and verbal instructions in directing learners' search during skill acquisition. Journal of Motor Behavior 33, 295-305.
- Bandura, A., 1969. Principles of Behavior Modification. Holt Rinehart and Winston, New York.
- Bateson, G., 1977. Les usages sociaux du corps à Bali. Actes de la Recherche en Sciences Sociales 14, 3-33.
- Bernstein, N.A., 1967. The Coordination and Regulation of Movements. Pergamon Press, London.
- Biryukova, E., Bril, B., 2008. Organization of Goal-Directed Action at a High Level of Motor Skill: The Case of Stone Knapping in India. Motor Control 12, 181-209.
- Bootsma, R.J., 1998. Ecological movement principles and how much information matters. In: Post, A.A., Pijpers, J.R., Bosch, P., Boschker, M.S.J. (Eds.), Models in Human Movement Science. PrintPartners Ipskamp, Enschede, pp. 51-63.
- Boyd, R., Richerson, P.J., 1985. Culture and the Evolutionary Process. University of Chicago Press, Chicago.
- Boyer, I., Bril, B., 2001. Structuring a child activity: A comparative study of mother-child interaction in a complex bimanual task. In: Van der Kamp, J., Ledebt, A., Savelsbergh, G., Thelen, E. (Eds.), Proceedings of The International Conference on Motor Development and Learning in Infancy. IFKB, Amsterdam, pp. 55-58.
- Bril, B., 1986. The acquisition of an everyday technical motor skill: the pounding of cereals in Mali (Africa). In: Wade, M.G., Whiting, H.T.A. (Eds.), Themes in Motor Development. Martinus Nijhoff, Dordrecht, pp. 315-326.
- Bril, B., 2002a. Apprentissage et contexte. Intellectica 35, 251-268.
- Bril, B., 2002b. L'apprentissage de gestes techniques : ordre de contraintes et variations culturelles. In: Bril, B., Roux, V. (Eds.), Le Geste Technique. Réflexions Méthodologiques et Anthropologiques. Erès, Ramonville Saint-Agne, pp. 113-151.
- Cavalli-Sforza, L.L., Feldman, M., 1981. Cultural Transmission and Evolution: A Quantita-

tive Approach. Princeton University Press, Princeton.

• Durham, W.H., 1991. Co-evolution: Genes, Culture and Human Diversity. Standford University Press, Standford.

• Eerkens, J.W., Lipo, C.P., 2005. Cultural transmission, copying errors, and the generation of variation in material culture and the archaeological record. Journal of Anthropological Archaeology 24, 316-334.

• Gandon, E., Pous, F., Coyle, T., Buloup, F., Bootsma, R.J., 2011a. Regulating rotation speed in wheel throwing: Effects of mass and shape. In: Charles, E.P., Smart, L.J. (Eds.), Studies in Perception and Action IX. Psychology Press, New York, pp. 196-201.

• Gandon, E., Casanova, R., Sainton, P., Coyle, T., Roux, V., Bril, B., Bootsma, R.J., 2011b. A proxy of potters' throwing skill: ceramic vessels considered in terms of mechanical stress. Journal of Archaeological Science 38, 1080-1089.

• Gandon, E., Bootsma, R.J., Endler, J.A., Grosman, L., 2013. How can ten fingers shape a pot? Evidence for equivalent function in culturally distinct motor skills. PLoS ONE 8(11): e81614. doi: 10.1371/journal.pone.0081614.

• Gandon, E., Coyle, T., Bootsma, R.J., 2014a. When handicraft experts face novelty: Effects of shape and wheel familiarity on individual and community standardization of ceramic vessels. Journal of Anthropological Science 35, 289-296.

• Gandon, E., Roux, V., Coyle, T., 2014b. Copying errors of potters from three cultures: predictable directions for a so-called random phenomenon. Journal of Anthropological Science 33, 99-107.

• Gibson, J. J., 1979. The Ecological Approach to Visual Perception. Houghton-Mifflin, Boston.

• Greenfield, P. M., Keller, H., Fuligni, A., Maynard, A., 2003. Cultural pathways through universal development. Annual Review of Psychology 54, 461-490.

• Haudricourt, A., 1948. Relation entre les gestes habituels, forme de vêtement et manières de porter les charges. Revue de Géographie Humaine et Ethnologie 1, 58-67.

• Haudricourt, A., 1987. La Technologie, Science Humaine. Recherche d'Histoire et d'Ethnologie des Techniques. MSH, Paris.

• Henrich, J., McElreath, R., 2003. The evolution of cultural evolution. Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews 12, 123-135.

• Hewes, G.W., 1955. World distribution of certain postural habits. American Anthropologist 57, 231-244.

• Ingold, T., 2001. From the transmission of representations to the education of attention. In: Whithehouse, H. (Ed.), The Debated Mind: Evolutionary Psychology Versus Ethnography. Berg, Oxford, pp. 113-153.

• Jacobs, D.M., Michaels, C.F., 2007. Direct learning. Ecological Psychology 19, 321-349.

• Janelle, C.M., Champenoy, J.D., Coombes, S.A., Mousseau, M.B., 2003. Mechanisms of attentional cueing during observational learning to facilitate motor skill acquisition. Journal of Sports Sciences 21, 825-838.

• Kugler, P.N., Turvey, M.T., 1987. Information, Natural Law, and the Self-Assembly of Rhythmic Movement: Theoretical and Experimental Investigation. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ.

• Kramer, C., 1997. Pottery in Rajasthan: Ethnoarchaeology in Two Indian Cities. Smithsonian Institution Press, Washington.

• Leroi-Gourhan, A., 1945. Evolution et Techniques. Milieux et techniques. Albin Michel, Paris.

• Mauss, M., 1936. Techniques du corps. Journal de Psychologie 32: issues 3-4.

• Neuman, B., Gray, R., 2013. A direct comparison of the effects of imagery and action observation on hitting performance. Movement and Sport Sciences 1, 11-21.

• Newell, K.M., 1986. Constraints on the development of coordination. In: Wade, M.G., Whiting, H.T.A. (Eds.), Motor Development in Children: Aspects of Coordination and Control. Martinus Nijhoff, Boston, pp. 341-360.

• Newell, K.M., 1991. Motor skill acquisition. Annual Revue Psychology 42, 213-237.

• Pierret, A., 1995. Analyse technologique des céramiques archéologiques : développements méthodologiques pour l'identification des techniques de façonnage. Un exemple d'application : le matériel du village des Arènes à Levroux (Indre). Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq.

• Reed, E.S., Bril, B., 1996. The primacy of action in development. A commentary of N. Bernstein. In: Latash, M.L., Turvey, M.T., Bernstein, N.A. (Eds.), Dexterity and its Development. Lawrence Erlbaum associates, Mahwah, pp. 431-451.

• Rice, P. M., 1987. Pottery analysis: a sourcebook. University of Chicago press, Chicago.

• Richerson, P.J., Boyd, R., 2005. Not By Genes Alone: How Culture Transformed Human Evolution. University of Chicago Press, Chicago.

• Rogoff, B., Paradise, R., Arauz, R. M., Correa-Chavez, M., Angelillo, C., 2003. Firsthand learning through intent participation. Annual review of psychology 54, 175-203.

• Roux, V., 2008. Enquête de terrain auprès des communautés Prajapati et Multani Kumhar, unpublished manuscript.

• Roux, V., 2013. Spreading of innovative technical traits and cumulative technical evolution: continuity or discontinuity? Journal of Archaeological Method and Theory 20, 312-330.

• Roux, V., Corbetta, D., 1989. The Potter's Wheel. Craft specialization and technical competence. Oxford and IBH Publishing, New Delhi. (http://www.irit.fr/arkeotek/ebooks/potters wheel.pdf).

• Rye, O. S., 1977. Pottery manufacturing techniques: X-Ray studies. Archaeometry 19, 205-211.

• Saraswati, B., Behura, N.K., Bose, N.K., 1966. Pottery techniques in peasant India. Anthropological Survey of India 13.

• Scully, D., Newell, K., 1985. Observational learning and the acquisition of motor skills: Toward a visual perception perspective. Journal of Human Movement Studies 11, 169-186.

• Thelen, E., 1990. Dynamical system and the generation of individual differences. In: Colombo, J., Fagen, J. W. (Eds.), Individual differences in infancy. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, pp. 19-43.

• Warren, W.H., 2006. The dynamics of perception and action. Psychological Review 113, 358-389.

Introduction

Each cultural environment constitutes a singular response to the common needs of mankind: all societies have a language and each society has its tongue, all societies have a parental system and each society has its particular parental system, all societies have dwellings for habitation to live in and each society has its architecture, ... In the same way, all humans share a certain number of motor skills and each society has its way of expressing such skills. Cultural diversity is thus observable in many different aspects of human behaviour, including motor behaviour (that is, the way people move). In the terms of the dual inheritance theory, human behavioural variability relies not only on genetic transmission but also on cultural transmission, the latter being the mechanism at the source of cultural diversity (Durham, 1991; Cavalli-Sforza and Feldman, 1981; Boyd and Richerson, 1985; Heinrich and McElreath, 2003; Richerson and Boyd, 2005). The expression "traditional motor skill" refers to this cultural transmission. A traditional motor skill implies a transmission that is sustained over many generations; it can be widely shared (such as a sitting posture) or more specialised (such as those found in crafts). Ethnological studies have long since documented that traditional motor skills – as the way people sit, swim, walk, carry loads, and so on – are part of the cultural way of life that characterizes each society (Bateson, 1977; Haudricourt, 1948, 1987; Hewes, 1955; Mauss, 1936). Yet, it is still unclear to what extent – for any given task – a motor skill developed in one cultural setting typifies a model specific to that cultural setting. Before beginning to answer this question, let us first consider the behavioural mechanisms that underlie the cultural transmission of motor skills.

Behavioural mechanisms underlying the cultural transmission of motor skills

Motor skills result from the interplay of three factors which together define the *workspace*: the *individual*, the *task*, and the *material environment* (Newell, 1986; Reed and Bril, 1996). To achieve a particular task, the individual interacts with his/her environment through informational and mechanical couplings (Bootsma, 1998; Gibson, 1979; Kugler and Turvey, 1987; Warren, 2006). Constrained by the combined influence of these factors, the individual's neuromuscular system is harnessed into functional task-appropriate behaviour. Given the flexibility of the individual's neuromuscular system, a specific task can be achieved by several equivalent motor skills (Bernstein, 1967). The set of motor skills

associated with a given task is called the *motor space*. Over the course of motor learning, the individual explores the workspace in order to discover the sensory information relevant to achieve a task (Newell, 1991; Jacobs and Michaels 2007).

Extending this framework to include the social environment, several studies have shown that social pointers – resulting from interaction with individuals mastering the same task – channel the learner's attention so that his/her exploratory activity occurs over an optimal area of the workspace (Boyer and Bril, 2001; Bril, 1986, 2002a; Greenfield et al., 2003; Rogoff et al., 2003). This social channel – which corresponds to the cultural transmission of motor skill (Ingold 2001) – not only facilitates the learning process but also paves the way to the development of a specific, culturally situated, motor skill; that is to say a skill that corresponds to a habitual way of executing a given task within the society in which the learning takes place (Bril, 2002b). These culturally-selected skills form a specific subset within the motor space. Model observation (observation of a person performing the task to be acquired) is one of the major mechanisms for educating the attention (Al-abood et al., 2001; Bandura, 1969; Janelle et al., 2003; Neuman and Gray, 2013; Scully and Newell, 1985). From the point of view of the apprentice, one would say that learning consists in reproducing the skill executed by the tutor (**Fig.1**).

Experimental approach and hypotheses

We adopted an experimental approach to evaluate the influence of cultural transmission on a certain motor skill. Pottery, and more precisely wheel-throwing, was chosen as an appropriate example.

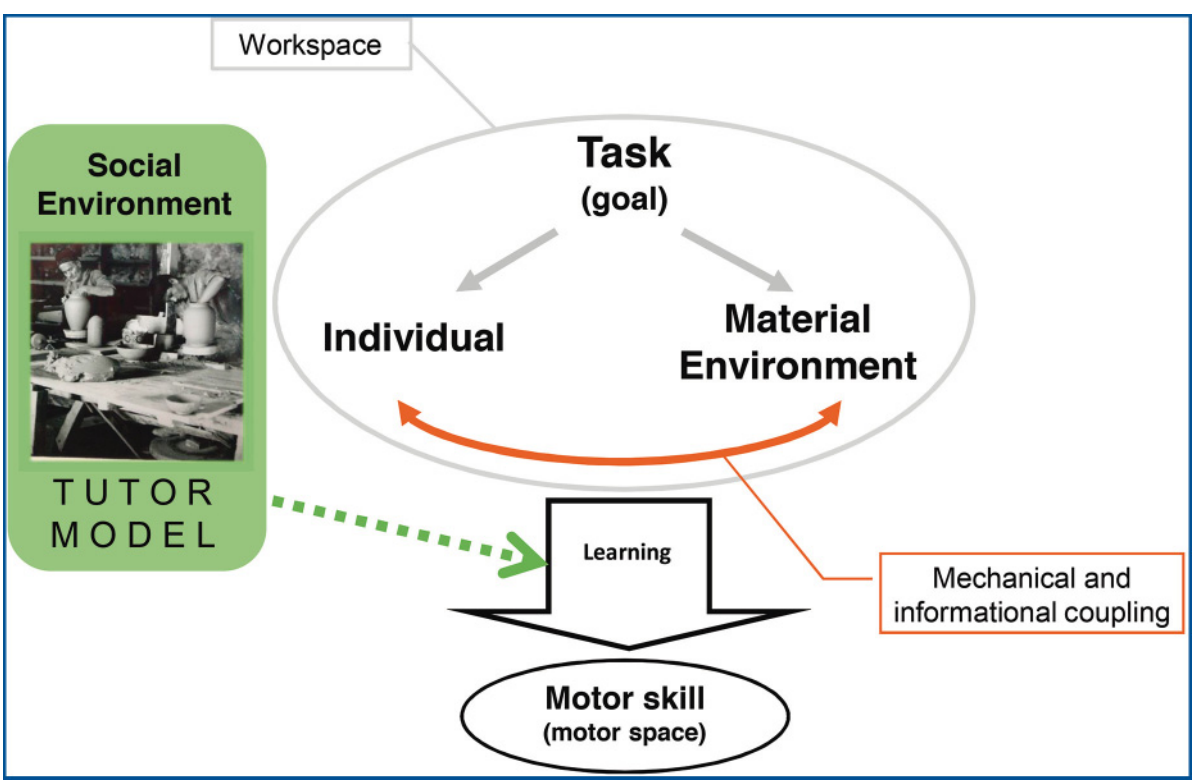


Figure 1: The transmission of motor skills in the ecological perspective. The skill results from the constraints operating in the workspace due to the mechanical and informational coupling between the individual and his/her material environment (Bootsma, 1998; Gibson, 1979; Kugler and Turvey, 1987; Newell, 1986; Reed and Bril, 1996; Warren, 2006). Given the flexibility of the individual's neuromuscular system, a specific task can be achieved by several equivalent motor skills (the motor space) (Bernstein, 1967). In the course of learning, the social environment channels the learner activity, especially in providing models of action (tutor model) (Al-abood et al., 2001; Bandura, 1969; Janelle et al., 2003; Neuman and Gray, 2013; Scully and Newell, 1985).

As a wide-spread, traditional and artisanal skill (Rice, 1987), wheel-throwing provides an excellent model for analysing the cultural transmission of motor skills. Starting with a formless lump of clay, the goal of wheel-throwing is to produce a vessel – of a form chosen in advance – using a wheel rotating in the horizontal plane at speeds varying between 50 and 150 rotations/min (Gandon et al., 2011a; Pierret, 1995; Rye, 1977). In shaping the vessel, potters successively deploy several distinctive hand positions for contact with the clay (see **Fig. 2**) and a given hand position can be used at different moments during the shaping process (Gandon et al., 2013). Personal field observations conducted in France, Morocco, Azerbaijan, Turkey, India, Palestinian territories, Nepal, and Thailand clearly demonstrated that expert potters encourage their apprentices to observe the hand positions used, so as to be able to reproduce them themselves. These hand positions would thus constitute a model that tutors transmit to their apprentices.

In this study, we focused on pottery wheel-throwing in French and Indian cultural settings. Field experiments were set up with expert potters in workshops in central France (Bourgogne) and north India (Uttar Pradesh). Working in their familiar conditions, the participants were invited to reproduce four model shapes with two different masses of clay. First, we identified the various hand positions used by the potters when shaping the pots, for instance, embracing the lump of clay between the two palms facing each other symmetrically, or the left hand inside the vessel and the right hand outside with both indexes pinching the clay from bottom to top, etc. Then, we quantified the number and durations of the different hand positions used by the potters. The goal of this analysis was to measure the influence of cultural transmission by examining the repertoires of hand positions used by the potters. Our underlying hypothesis was that the hand positions used by the potters were influenced by the cultural background and would be – at least partially – different between the three groups of potters.

Method

A standardized experiment in three cultural settings

Seven French, six Indian Prajapati and six Indian Multani Kumhar professional potters voluntarily participated in the experiment. The French potters (Group F) lived and worked in different regions of France, whereas the Indian potters (Groups Pr and MK) belonged respectively to Hindu and Muslim communities which lived and worked in the same region in Northern India (Uttar Pradesh). However, these Indians groups have different technological traditions, especially the wheels and the kilns used are community-specific and a non-borrowing phenomenon has been reported (Roux, 2013). In the Indian setting, the pottery handicraft is still organized in a traditional way: the skill is learned within endogamous castes that produce standardized traditional objects in mass production (Kramer, 1997; Roux and Corbetta, 1990; Saraswati and al., 1966). In France, on the other hand, the social organization of this craft has evolved with

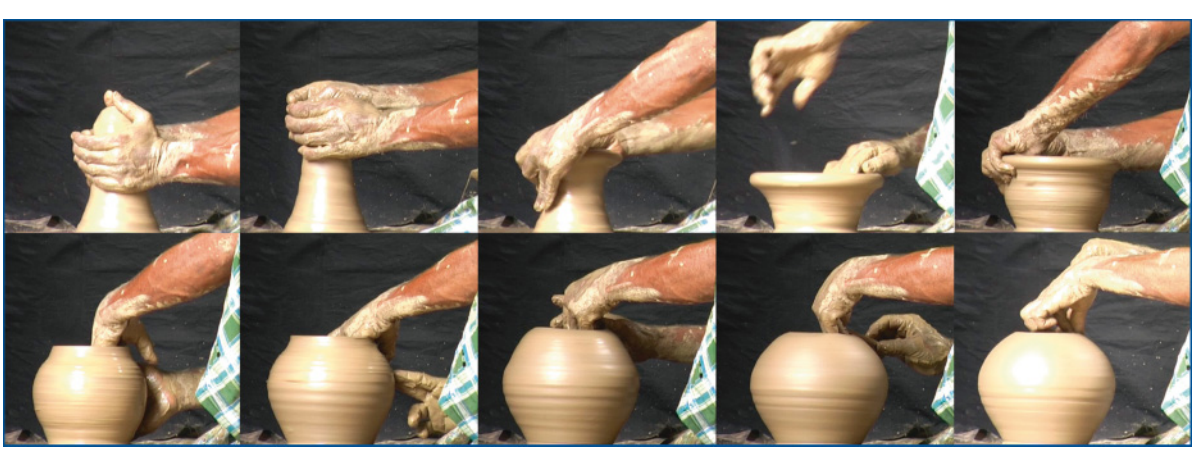


Figure 2: Examples of hand positions used during wheel-throwing. The images were extracted from a video recording of an Indian Multani potter throwing a 2.25 kg sphere (Gandon et al., 2013).

industrialization; the individual pottery apprenticeship has been transferred from family workshops to the public domain and production design has become predominantly artistic. As a result, the training conditions of the seven French potters were much more heterogeneous than those of the Indian potters. In addition to these distinctive social organizations, the instruments (wheels) also vary over the three cultural contexts. While the French potters used an electrical motor-driven wheel activated by a pedal (**Fig. 3**, left panel), the Pr potters used a high inertia stick-wheel launched with a wooden stick (**Fig. 3**, central panel), and the MK potters used a foot-operated, low-inertia kick-wheel (**Fig. 3**, right panel). All the 19 participants had a minimum of ten years of wheel-throwing experience (F: 30.3 ± 8.6 yrs; Pr: 22.3 ± 11.8 yrs; MK: 16.5 ± 6.4 yrs).

Standardized experiments were conducted in three pottery workshops, representative of the different cultural contexts. The F workshop was located in the Bourgogne area of France, while the Pr and MK workshops were located in an Indian village of Uttar Pradesh (district of Bulandshar). Working in their familiar conditions, potters were asked to reproduce four different model shapes using two different quantities of clay (0.75 kg and 2.25 kg), giving a total of eight conditions (**Tab. 1**). These model shapes were external to the daily repertoire for the three groups. Participants briefly practiced the task the day before the experiment, producing one or two vessels under each condition. During the experimental sessions each potter produced five specimens of each of the four shapes with each mass of clay; each participant thus produced a total of 40 vessels. The order of the different conditions was randomized so as to avoid systematic learning effects. This experimental protocol was elaborated so as to allow the participants' expertise to reveal itself in the behavioural measures used (Gandon et al., 2011b; Gandon et al., 2014a).

Figure 3: Wheels used in the three cultural settings. From left to right: the electrical (foot pedal operated) wheel used by the French potters, the high inertia stick-wheel used by the Prajapati potters, and the low-inertia kick-wheel used by the Multani potters.

Shape	Cylinder		Bowl		Sphere		Vase	
Model (2D drawing)								
Mass of clay (kg)	0.75	2.25	0.75	2.25	0.75	2.25	0.75	2.25

Table 1: The eight experimental conditions defined by the combination of four different forms (cylinder, bowl, sphere and vase) and two clay masses (0.75 and 2.25 kg).

Data recording and analysis

The experimental sessions were videotaped (Panasonic NV-GS320) and analysed using Actogram timing software. We captured the sequence of hand positions used for throwing each pot, with measurements of the durations (seconds) spent in each position. A code was attributed to each specific hand position detected in each of the three groups and under each of the experimental conditions. In order to describe as objectively as possible the positions observed, we established a repertoire ethogram in which each position was accurately defined and exemplified by several pictures. A total of 77 different hand positions were defined (see **Fig. 2** and **5** for a small subset). The non-shaping actions (e.g., to wet the clay) were also timed but were excluded from the total shaping duration. For each individual vessel thrown, we calculated the percentage of total shaping time (%Shap) for which each of the 77 hand positions was used. Then, for each potter and each of the eight experimental conditions, we obtained an individual repertoire of %Shap defined as a vector of 77 values corresponding to the percentage time spent by this specific potter using each of the 77 hand positions. Given the fact that each potter used only part of the total hand position repertoire, several values in the vectors were equal to zero.

Results

The potter's "route" in producing the pots through the hand position repertoire is presented in **Fig. 4**. This figure presents the cumulative percentage shaping time (%Shap) of various hand positions used by each participant (thin lines) and the group average (bold lines). Inspection of this figure brings out several noteworthy observations. A striking result is the difference over cultural groups in the number of different hand positions used. Over the eight experimental conditions, the F repertoire revealed 55 different hand positions while the Pr and MK repertories were limited to 38 and 36 hand positions respectively. As can be seen from **Fig. 4**, positions 45 to 77 were exclusively used by the French potters (21 of which were used by at least two F potters) while positions 3, 5, 9, 14, 15, 16, 19, 20, 28, 30 and 39 were exclusively used by the Indian potters. The two groups of Indian potters revealed greatly largely overlapping repertoires (29 positions were shared by Pr and MK potters). Only positions 25 and 26 were used specifically by Pr potters (at least by two potters) and only positions 31, 32 and 42 were used specifically by MK potters (at least by two potters). On the other hand, the overlap between the repertories of the three groups involved 18 hand positions, 19 positions were shared by F and Pr potters and 21 positions were shared by F and MK potters. Several of these culture-specific and transcultural positions can be seen in **Fig. 5**.

Scrutiny of the routes followed by individual potters also indicates individual-specific ways of using the hands (**Fig. 4**). In each of the three groups there is indeed a certain number of hand positions which are solely used by an individual

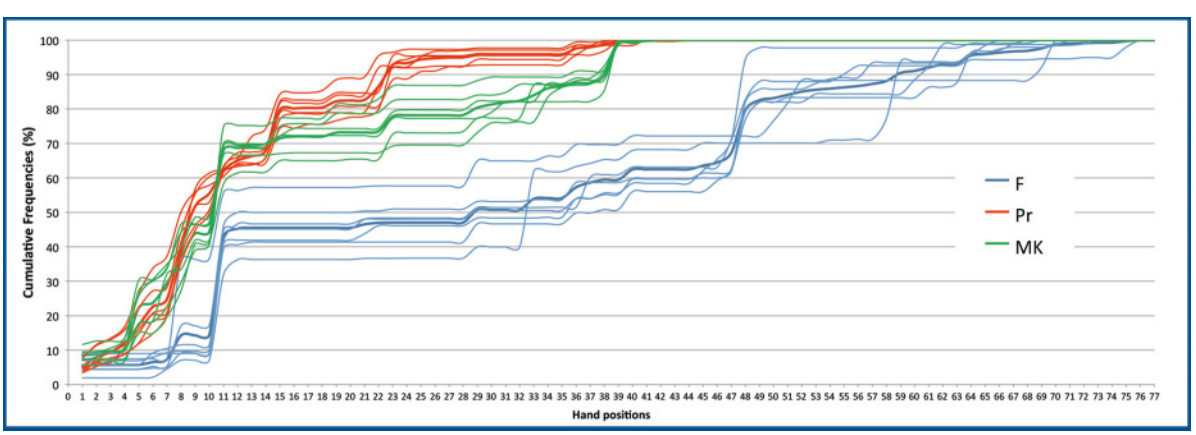


Figure 4. Cumulative percentage shaping time (%Shap) of the hand positions used by each participant (thin lines) and the group average (bold lines), for the three groups (blue = French, red = Prajapati, and green = Multani), for the full set of experimental conditions. The x-axis presents the set of the 77 different hand positions identified in the study.

Figure 5. Examples of cultural and transcultural hand positions observed in our study. The first line (from the top of the figure) presents four French positions, the two following lines presents four Prajapati and four Multani positions, and the last line presents transcultural positions (i.e. positions observed in the three groups). Among the four Prajapati positions, the two positions on the right are used only by one potter; among the four Multani positions the third one (from the left) is used only by one potter.

member of the group. The F repertoire contained more idiosyncratic hand positions than the Pr and MK repertories. Of the 55 hand positions of the F repertoire, 15 hand positions were observed in single potters, whereas only 7 and 5 hand positions were idiosyncratic in the Pr and MK repertories respectively. We also found that certain hand positions were used by all members of a group: there were 6 of these for the F potters, 16 for the Pr potters and 10 for the MK potters. Finally it is noteworthy that the repertories of the three groups were comparable in average size (F = 24, Pr = 27, MK = 23). Put differently, independently of cultural origin each potter used around 25 different hand positions.

Having examined the hand positions used by potters to produce the full set of experimental conditions, we will now consider how the wheel-throwing skill is affected by the mass of clay used (2.25 kg vs. 0.75 kg) and the shape to be thrown (see **Tab. 1**). Statistical analysis first of all revealed that potters use a larger number of hand positions when throwing vessels with larger clay masses ($F(1, 16) = 34.76$, $p < 0.001$);

	0.75 kg	2.25 kg	Cylinder	bowl
French	54, 63, 75, 77	2, 4, 23, 41, 65, 66, 68, 71, 76	77	74
Number of potters	4	7	1	1
Prajapati	14, 28, 30	17, 18, 19, 20, 27, 44	28	18, 19, 20, 21, 26, 30, 44
Number of potters	6	6	1	6
Multani	14, 32	19, 20, 22, 42	6	16, 19, 20, 30, 32
Number of potters	2	5	4	6

Table 2. Hand positions used specifically in throwing the small (0.75 kg) and large (2.25 kg) clay masses and those used in throwing the cylinder and bowl, in the three groups. No specific hand positions were detected for the sphere and vase (these two shapes being fashioned with the same hand positions). The lines labeled "number of potters" indicate (for each group separately) the number of potters using at least one of the specific positions.

this phenomenon was observed in all three groups ($F(2, 16) = 3.61$, *ns*). On average, potters used two hand positions more when throwing the larger vessels. Throwing the larger vessels involved the use of one or more specific hand positions in almost all potters (18 out of the total of 19 participants). Mass-specific hand positions were also observed in certain potters when throwing the smaller vessels (**Tab. 2**).

With respect to the shape to be thrown, the analysis revealed that throwing the bowl was achieved with a smaller number of hand positions than throwing the other shapes ($F(3, 48) = 4.56$, $p < 0.02$), which again occurred for all three groups in a similar way ($F(6, 48) = 0.44$, *ns*). When throwing bowls, potters used two hand positions less than when throwing the cylinder, sphere or vase. In the same way that the mass of clay determines the usage of certain hand positions, the shape to be thrown played a role in the choice of hand positions used. When throwing a bowl 13 potters (all Pr and MK potters as well as one F potter) used specific hand positions (**Tab. 2**). For the cylinder six potters (1 F, 1 Pr and 4 MK) used a specific hand positions (different for each group).

Discussion

Within the theoretical framework of ecological psychology, cultural transmission occurs by educating the apprentice's attention toward the sensory information that are useful for accomplishing the task (**Fig. 1**). This education of attention is guided by the observation of a model; that is to say, the apprentice tries to reproduce the skill as she/he sees it being executed by the tutor. Thus, while supporting acquisition of a new skill, cultural transmission orients the apprentice toward the learning of a cultural skill, that is, a skill with certain characteristics those are specific to the apprentice's society. The goal of our study was to evaluate the influence of a cultural model on a motor skill.

We studied a particular motor skill, wheel-throwing, in three different cultural contexts (French, Prajapati and Multani Kumhar). From field observations we learned that expert potters insist that an apprentice observes and reproduces the different hand positions used when they throw a vessel. Thus, hand positions are considered of primary importance in wheel-throwing and are therefore likely to be reproduced from one generation to the next. Following this logic, members of a given cultural group should have a common repertoire of hand positions. Given the flexibility of the neuromuscular system we hypothesized that these repertories would be different from one cultural group to the other. To test these hypotheses we registered and quantified the hand positions used by potters from three culturally different backgrounds when they threw four different shapes with two different clay masses.

The presence of 26 culture-specific hand positions (21 for the F group, 2 and 3 for the Pr and MK groups, respectively) amongst the total of 77 positions identified in our study underscores the existence of the motor tradition specific to

each group. Cultural transmission definitely underlies the existence of these specific positions, as they were present among several members of one group and absent in the two other groups. Thus, as we expected, each group differently occupied the motor space, developing a singular repertoire of hand positions (**Fig. 6**). Interestingly, we note that the two Indian traditions are close together since they share more than half of their repertories (29 positions shared on the total of 38 and 36 positions in the repertories of the Pr and MK groups respectively).

If a motor skill indeed reflects a specific cultural model, our results indicate that this cultural signature is far from being totally determinant. In each of the three groups the culture-specific hand positions indeed represent less than half of the behavioural repertories. The largest part is in fact transcultural or specific to an individual. The skill developed by the potters therefore not only reflects a cultural model; it also reflects the transcultural task constraints and the individuals' singularities.

The influence of the individual is observable in the 27 hand positions which were only used by a single potter (15 in the F group, 7 and 5 in the Pr and MK groups, respectively). More than half of all potters (6 F, 5 Pr and 3 MK) used one or more hand positions that were not used by any of the other potters. Moreover, even shared positions are often used with subtle inter-individual variations and one can identify a given potter by close inspection of his hand positions. These results confirm that a socially transmitted skill is in fact not copied but reappropriated by the learner, taking on learner-specific characteristics during acquisition (Biryukova and Bril, 2008; Thelen, 1990).

Complementary to the individual-specific influences on the hand positions used, we also observed the effect of transcultural constraints. The 18 hand positions shared by the potters from all three groups reveal the structuring effects of the constraints shared by all potters: All participants had to use their body and hands to reproduce the same vessel shapes with the same clay masses placed on a horizontal wheel rotating at 50-150 rotations/min. In our study we identified 77 hand positions but a larger sample of pottery traditions would no doubt have revealed a more extensive motor space (with perhaps up to 150-200 different hand positions). Within the global motor space certain positions are expected to be inevitable and thereby transcultural. We would, for instance, be surprised to see that position no. 1, consisting in placing the hand palms on opposite sides of the lump of clay, would not be used to centre the mass of clay at the beginning of the throwing process. At other moments in the throwing process, however, the potters have a larger margin of manoeuvrability and different positions may be used. It is within this margin of manoeuvrability that cultural and individual originality can appear.

The mass and shape of the vessels to be thrown (being part of the task constraints) also call upon transcultural constraints. The repertoire of hand positions used was indeed adapted to these

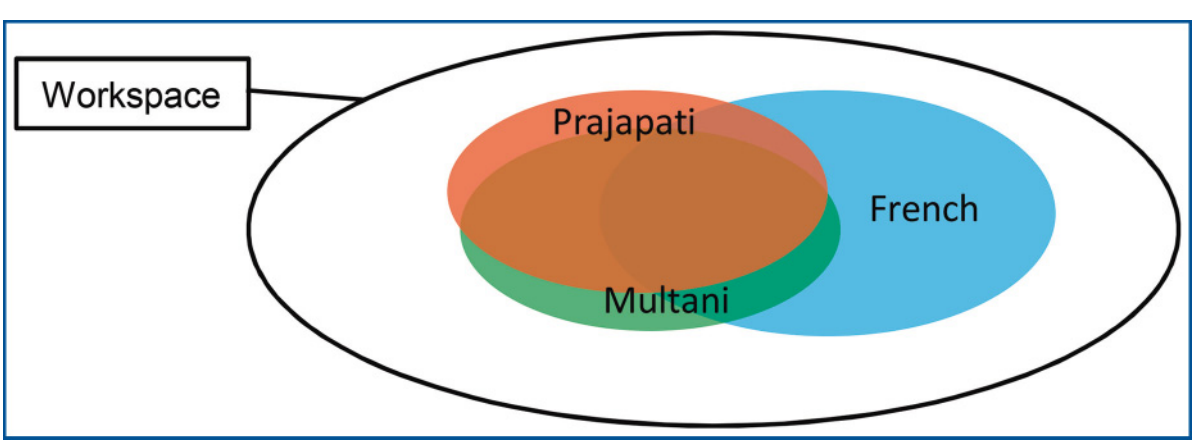


Figure 6. Schematic representation of the subsets of motor skills selected by the three groups (blue = French, red = Prajapati, and green = Multani) in the motor space of the task.

factors in all three groups. Increasing the mass of clay led the potters to use a larger hand position repertoire, notably including certain large-mass-specific hand positions. We suggest that these latter hand positions allow the potters to exert larger forces on the clay, but this hypothesis remains to be verified. Our result with respect to the influence of vessel shapes lead us to think that potters use the same hand positions when throwing neighbouring shapes, such as the sphere and vase in the present study. The range of shapes needs to be enlarged in future work in order to better capture the relation between hand positions and vessels shape.

The number of hand positions (around 25) deployed by the potters from all three groups may also be considered as expressing a transcultural constraint. This number corresponds to a number of hand positions which are at the same time useful and memorisable for throwing a vessel. Testing this hypothesis also requires extension of the number of pottery traditions studied.

Another remarkable result is the lower homogeneity of the French repertoire compared from that of the Indian repertories. First of all, the F group reveals a larger number of individual-specific positions (15 hand positions) than the Pr and MK groups (7 and 5 hand positions, respectively). Moreover, the number of hand positions shared over potters from the same group is less in the F group (6 out of 55) than in the Pr (16 out of 38) and MK (10 out of 36) groups. The French potters participating in the study indeed constituted a heterogeneous group, since they lived in different regions and each had their own workshop. The Indian potters, on the other hand, constituted a more homogeneous group in that they lived in the same village and worked in family-run workshops. The homogeneity of motor traditions thus depends on the homogeneity of the social groups considered. Hence, as the French group consisted of potters who acquired their wheel-throwing skill in different regions, the French cultural models should be analysed at the regional rather than at the national level. Perhaps the fact that the repertoire of hand positions observed in the French potters was larger than the repertories observed in the two Indian groups was a consequence of the homogeneity difference between the French and Indian potters participating in our study; the total of 55 different hand positions observed in the F group could very well be a consequence of mixing several regional subcultures.

Conclusion

Cultural transmission of motor skills is a research topic of a primary interest to ethnologists and archaeologists interested in the evolution of technological systems in past and present societies (Haudricourt, 1987; Leroi-Gourhan, 1945). Over the course of learning, the skill demonstrated by the tutor serves as a model to the apprentice. As a result, certain aspects of the skill are transmitted over several generations. The issue addressed in the present contribution is the extent to which a skill acquired within a given cultural context mirrors the cultural model specific to that context.

Our results confirmed first of all that acquiring a skill within a given cultural context indeed leads to a cultural marking of the acquired skill as exemplified by the traditional reproduction of certain hand positions in the potters studied. A French motor tradition thus appeared, characterized by 21 specific hand positions, as well as two Indian motor traditions, Prajapati and Multani Kumhar, characterized by 2 or 3 specific hand positions. Because these hand positions are observed in multiple potters of the same tradition while being absent in the other two traditions, we may conclude that they stem from a cultural model transmitted during learning. At the same time our study highlighted that the skill is far from being fully determined by such a cultural model. Our results indeed revealed that the cultural specificity of the French and Indian hand position repertories is limited, with culture-specific hand positions representing less than half of the extent of these repertories.

The existence of transcultural hand position indicates that the motor skill is structured by the workspace constraints which are independent of the cultural environment. This does not, of course, imply that transcultural hand positions are not transmitted culturally. It is in fact likely that the model "copied" by the apprentice comprises both culture-specific and transcultural hand positions.

A non-negligible part of the skill reflects the influence of the characteristics of the individual potter, as revealed by the existence of potter-specific hand positions.

This observation confirms that learning cannot be considered as consisting simply of copying a model but rather implies an individual reappropriation of such a model. It is as if a "copying error" occurred between the model skill of the tutor and the skill developed by the apprentice. This allows one to think that the cultural model itself evolves over generations, in the same way as cultural artifacts evolve over the course of time (Eerkens and lipo, 2005; Gandon et al., 2014b).

Finally, the finding that Pr and MK potters revealed neighbouring motor traditions is surprising, given that these communities were not thought to borrow techniques. The wheels and kilns are different and each community has its own workshops (Roux, 2013). Moreover, these communities have different histories, with the Prajapati already having lived in the Uttar Pradesh region for over 1000 years while the Multani Kumhar arrived there in the XIVth century. Although we cannot be sure, we think that over time the two communities have maintained their own motor traditions. But the finding that their hand position repertories overlap to a considerable extent would seem to indicate that borrowing of techniques did in fact occur. We do know that since the nineteen seventies the Multani Kumhar potters have for economical reasons been led to produce some of the objects traditionally crafted by Prajapati community (Roux, 2008). Perhaps this borrowing of forms was accompanied by a borrowing of hand positions. Dedicated fieldwork in the region where these communities cohabitate is needed to clarify this intercultural borrowing phenomenon.

Acknowledgments

I would like to thank the Fyssen Foundation for its financial support ; Reinoud Bootsma, Blandine Bril, Valentine Roux and John Endler for constructive discussions, Alain Kerguelen for his technical assistance, Uzy Smilansky for welcoming and allowing me to work in the Computerized Archaeology Laboratory of the Hebrew University in Jerusalem, and Leore Grosman for the discussions and help provided during my stay in Israel. I am particularly grateful to Valentine Roux for having invited me to conduct experiments in India and to Reinoud Bootsma for his encouragement and his writing assistance. Finally, I thank Thelma Coyle for providing useful revisions in English.

Le raisonnement par analogie chez l'Humain (*Homo sapiens*), le Chimpanzé (*Pan troglodytes*) et le Capucin Brun (*Cebus apella*)

Yannick GLADY

Post-Doctorant à l'Université de Stirling, Royaume-Uni

Résumé

Deux expériences ont été réalisées dans le but de départager deux hypothèses : l'apparition du raisonnement par analogie (1) dans la lignée des Hominidés, ou bien (2) dans la lignée humaine. Dans ce but, nous avons testé trois groupes de participants dans une tâche commune de raisonnement par analogie : des capucins bruns (*Cebus apella*), des chimpanzés (*Pan troglodytes*), et des humains, enfants et adultes (*Homo sapiens*). La première expérience montre une meilleure performance, même si suboptimale, dans la tâche de raisonnement par analogie chez les chimpanzés par rapport aux capucins et aux enfants humains. La seconde expérience montre que des adultes humains réussissent à résoudre la tâche de manière plus rapide et précise que les chimpanzés de l'expérience 1. Ces résultats, dans leur ensemble, semblent être en faveur de l'hypothèse (1), avec cependant des différences qualitatives dans les capacités de raisonnement par analogie entre les humains et les chimpanzés.

Mots-clés

Raisonnement par analogie, évolution, Capucin Brun, Chimpanzé, Humain

Analogical reasoning in Humans (*Homo sapiens*), Chimpanzees (*Pan troglodytes*) and Brown Capuchins (*Cebus apella*)

Abstract

Two experiments were conducted in order to decide between two different hypotheses : the apparition of analogical reasoning (1) in Hominids, or (2) in Humans. To achieve this goal, three groups have been tested in a common analogical reasoning task : brown capuchins (*Cebus apella*), chimpanzees (*Pan troglodytes*), and human children and adults (*Homo sapiens*). The first experiment shows that chimpanzees solve the task better than both capuchin monkeys and human children, though their performance remains suboptimal. The second experiment shows that, on the contrary, adult humans, manage to solve the task in a more rapid and precise way than chimpanzees in the first experiment. Taken as a whole, these results seem to be in favor of hypothesis (1). However, some qualitative difference seems to exist between humans' and chimpanzees' analogical reasoning.

Keywords

Analogical reasoning, evolution, Brown Capuchin, Chimpanzee, Human

I. Introduction

Le raisonnement par analogie désigne la capacité à juger de la similarité de deux domaines à partir de leur structure relationnelle, utilisant ainsi une relation d'ordre supérieur entre des ensembles de relations d'ordre inférieur (Gentner, 1983). On peut prendre comme exemple le modèle de l'atome de Rutherford, comparé au système solaire : la similarité (relation d'ordre supérieur) entre ces deux domaines réside dans le fait que des éléments (électrons ou planètes) gravitent autour d'un autre objet des domaines

comparés (relation d'ordre inférieur), noyau pour l'atome, ou soleil pour le système solaire. L'intérêt scientifique de l'étude de ce type de raisonnement provient de son omniprésence dans les processus de pensée chez l'Humain (Gentner & Smith, 2012 ; Holyoak, 2012). La présence de cette capacité chez le Primate non-humain a été vivement débattue récemment (Gentner, 2010 ; Penn, Holyoak, & Povinelli, 2008, Thompson & Oden, 2000) : il a été suggéré que la capacité à utiliser de telles relations de haut niveau serait ce qui sépare les Humains des autres espèces de Primates en termes de pensée. L'étude comparative du raisonnement par analogie permettrait donc de mieux comprendre les origines et mécanismes de la cognition humaine.

Différentes tâches ont été utilisées pour tester le raisonnement par analogie chez le primate non-humain. Ces tâches peuvent être regroupées dans deux catégories : les tâches de mise en relation d'échantillons relationnels (Relational Match-to-Sample ou RMTS), et les tâches de mise en correspondance de domaines complexes.

La tâche de RMTS est une tâche de choix forcé entre différents ensembles de stimuli après présentation d'un ensemble modèle d'une relation simple (habituellement des stimuli identiques ou différents). Ainsi, si l'ensemble modèle contient uniquement des stimuli identiques, le participant doit choisir l'ensemble contenant uniquement des stimuli identiques dans le choix d'ensembles qui lui est donné. Au contraire, si l'ensemble modèle contient des éléments différents, il lui faut choisir l'ensemble contenant des éléments différents.

Les singes de l'Ancien Monde testés dans des tâches de RMTS n'ont réussi à les résoudre qu'après de nombreux essais (babouins : 4200 essais ; Fagot et Parron, 2010 ; macaques rhésus : 900 essais ; Flemming, Thompson, Beran, et Washburn, 2011). Les hominidés testés dans une tâche similaire ont quant à eux réussi après un nombre moyen d'essais moins grand que les singes de l'Ancien Monde (orang-outans : 42 essais : Vonk, 2003 ; chimpanzés : 88 essais ; Thompson, Oden, & Boysen, 1997). Des humains ont également été testés, sans instructions, en comparaison de macaques rhésus, et de chimpanzés (Flemming, Beran, Thompson, Kleider, & Washburn, 2008). La plupart des humains ont résolu la tâche durant les cent premiers essais. Deux des quatre chimpanzés testés ont réussi à atteindre des performances supérieures à la chance, mais cependant moins bonnes que celles des humains. Les macaques n'ont quant à eux pas réussi à avoir de meilleures performances que la chance dans cette étude.

Les tâches de RMTS sont souvent critiquées pour leur simplicité qui n'est pas représentative de la complexité que peut atteindre le raisonnement par analogie chez l'Humain. Les tâches de mise en relation de deux domaines complexes sont similaires aux tâches de RMTS dans le fait que la relation d'ordre supérieur est la même (c'est-à-dire une relation de similarité). Cependant elles diffèrent dans le nombre et type de relations utilisées dans les domaines comparés. Les tâches de RMTS se limitent souvent aux relations d'identité et de différence, et ne comportent qu'un seul type de relation dans chaque domaine, alors que les tâches de mise en relations incluent des relations plus nombreuses et subtiles telles que des relations spatiales, de taille, de couleur, ou de forme. Dans ce type de tâche, le participant doit trouver l'élément de l'ensemble test qui a la même relation aux autres éléments que l'élément cible dans l'ensemble modèle. Par exemple, si l'élément cible est l'élément à droite des autres éléments, le participant doit choisir l'élément à droite des autres dans l'ensemble test pour résoudre la tâche. Ces tâches, au contraire des tâches de RMTS, ont été utilisées de manière extensive avec des participants humains, et en particulier des enfants (Kotovsky & Gentner, 1996 ; Rattermann, Gentner, & DeLoache, 1990).

En utilisant une tâche de RMTS, puis une tâche de mise en correspondance entre deux domaines contenant des coupes de différentes tailles, Kennedy & Fragaszy (2008) ont testé un groupe de capucins bruns. Un des singes a réussi à résoudre la tâche après un entrainement préliminaire de plus de huit cents essais à une tâche de mise en relation d'objets identiques/différents, puis de RMTS.

Des hominidés ont également été testés dans une tâche de mise en correspondance spatiale. Hribar & Call (2011 ; voir également Hribar, Haun, & Call, 2011) ont testé des orangs-outans, des chimpanzés et des bonobos. Ces différentes espèces ont démontré une certaine capacité à résoudre les problèmes spatiaux proposés, même si la stratégie qu'ils ont utilisée n'était pas la même que les adultes humains emploieraient

(une stratégie basée sur les relations des coupes par rapport aux bords de la table plutôt qu'aux autres coupes). Il est intéressant de noter que des enfants humains (4-5 ans) réussissent la même tâche, sans avoir d'instructions quant à la stratégie à employer pour la résoudre, mais ont de meilleures performances lorsqu'une mise en correspondance basée sur la relation des coupes avec les bords de la table, c'est-à-dire identique à la stratégie utilisée par les autres grands singes, doit être utilisée (Hribar, Haun, & Call, 2012). Des enfants humains ont également été testés avec des tâches de mise en correspondance utilisant des relations de taille, couleur et forme (Kotovsky & Gentner, 1996 ; Rattermann et al., 1990). Les performances, bien que suboptimales, étaient meilleures que ce que la chance prédirait chez les enfants de 4 ans et plus.

L'ensemble de ces résultats dans ces différentes tâches semble donc suggérer une capacité de raisonnement par analogie chez les Primates non-humains, et cela à partir même des Singes du Nouveau et de l'Ancien Monde. Cependant, ceux-ci nécessitent un entrainement particulièrement long et progressif, alors que les hominidés réussissent les tâches après moins d'une centaine d'essais. Ceci suggère que ce n'est pas un mode de raisonnement qu'ils utilisent spontanément.

Il ressort également de cette littérature qu'aucune étude n'a été menée avec une tâche de mise en correspondance de domaines complexes, seule tâche utilisée chez l'animal qui soit proche, en terme de complexité, de ce qui est requis habituellement dans les tâches de raisonnement par analogie chez l'homme, *et* testant les différents groupes concernés par les hypothèses proposées par les théories de l'évolution du raisonnement par analogie dans des conditions identiques. La première de ces hypothèses (Thompson & Oden, 2000 ; hypothèse (1) ci-après) voudrait que l'apparition de ce type de raisonnement se soit faite après l'embranchement séparant les Hominidés des autres Primates. Une discontinuité dans les capacités de raisonnement par analogie devrait donc être observable entre les Singes du Nouveau et de l'Ancien Monde, et les Hominidés. La seconde hypothèse (hypothèse (2) ci-après) voudrait que l'apparition du raisonnement par analogie se soit faite après l'embranchement spécifique à la lignée humaine (Penn, Holyoak, & Povinelli, 2008). Dans ce cas, la discontinuité devrait être présente entre les Humains et le reste des Primates. Le but de notre étude est de départager ces différentes hypothèses sur l'apparition du raisonnement par analogie dans l'ordre des Primates en testant trois espèces représentatives des différents groupes de primates (Singes du Nouveau Monde : capucins bruns, Hominidés : chimpanzés et humains).

II. Expérience 1 : comparaison des enfants humains, capucins bruns et chimpanzés

Dans une tâche de mise en correspondance telle que celle de Kennedy & Fragaszy (2008, voir **Fig. 1**), avec une condition utilisant un distracteur, et une condition sans distracteur, nous prédisons une différence dans la fréquence de bonnes réponses des participants dans les mêmes conditions (distracteur ou sans distracteur) entre les groupes de part et d'autre de la discontinuité (c'est-à-dire entre les capucins bruns d'une part, et les chimpanzés et humains d'autre part dans le cas de l'hypothèse (1), ou entre les humains d'une part et les capucins bruns et chimpanzés d'autre part dans le cas de l'hypothèse (2)) et des différences ou absences de différences similaires entre les fréquences de réponses correctes et le nombre d'erreurs dues à un distracteur à l'intérieur des groupes du même côté de la discontinuité.

Pour tester ceci, nous avons mesuré les fréquences de réponses correctes des participants, et, dans la condition avec distracteur, le type d'erreurs commises.

II.1. Méthodes

Participants

Trois groupes de participants ont été testés dans une tâche de raisonnement par analogie. Le premier groupe était constitué de 31 enfants humains (*H. sapiens*) âgés de 3-4 ans (moyenne = 48,5 mois, écart-type = 9,3 mois, allant de 37 à 64 mois, pour l'échantillon final), le second de 7 chimpanzés (*P. troglodytes*), et le dernier de 20 capucins bruns (*C. apella*).

Matériel

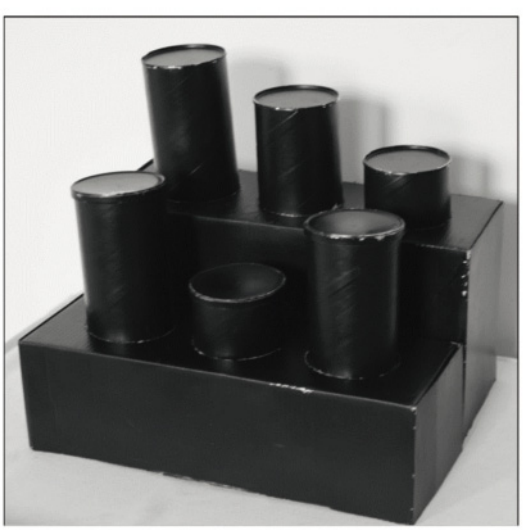
La tâche consistait en quarante essais (divisés en une session de quatorze et deux sessions de treize essais) d'une tâche de raisonnement par analogie utilisée précédemment par Rattermann, Gentner, & DeLoache (1990) avec des enfants humains, et par Kennedy & Fragaszy (2008) avec des capucins bruns **(Fig. 1)**. La moitié

des essais était présentée avec un distracteur, c'est-à-dire une coupe dans l'ensemble Test ayant la même taille absolue, mais une taille relative différente, de la coupe cachant la récompense dans l'ensemble Modèle. L'autre moitié des essais était présentée sans distracteur (les six coupes avaient toutes des tailles différentes). La tâche matérielle a été pré-testée avec des enfants qui ont démontrés une perte d'intérêt rapide due au temps de latence entre les essais, nécessaire à leur préparation. Il a donc été décidé d'utiliser une version virtuelle de la tâche, strictement analogue à la version matérielle (**Fig. 1**, panel de droite).

Dans la tâche matérielle, chaque essai était composé de six coupes (trois dans l'ensemble Modèle, petite, moyenne et grande, et trois dans l'ensemble Test, petite, moyenne et grande). Chaque ensemble de trois coupes était sélectionné dans un plus grand ensemble de six coupes de différentes tailles (5,5cm, 7cm, 8,5m, 10cm, 11,5cm, 13cm). Toutes les coupes étaient des cylindres de diamètre (7,9 cm) et couleur (noire) identiques. Les six coupes étaient présentées sur deux supports séparables de tailles différentes (10cm et 18cm) : l'ensemble Modèle était présenté sur le support le plus haut pour permettre aux participants de comparer les deux ensembles de trois coupes lors de la passation de la tâche. Les coupes adjacentes dans chaque ensemble étaient disposées à une distance égale, et un trou d'une profondeur d'environ 0,5 cm servait de repère pour leur emplacement.

La tâche immatérielle était identique dans sa conception à la tâche matérielle. Les coupes étaient représentées par des rectangles noirs de différentes tailles (50pxls, 65pxls, 80pxls, 95pxls, 110pxls, 125pxls ; 75 pxls de large). Les deux ensembles étaient présentés sur deux lignes différentes, l'ensemble Modèle en haut de l'écran, et l'ensemble Test en bas. Les récompenses étaient représentées par des ronds rouges (50pxls de diamètre). La tâche était présentée sur une tablette tactile (écran de 7 pouces).

Les essais étaient construits de façon à minimiser les différences, pour chaque ensemble (Modèle et Test), dans le nombre de présentations où la récompense était cachée dans l'emplacement de droite, du milieu et de gauche, afin d'éviter le renforcement d'un biais pour un emplacement, et dans le nombre de fois où chaque paire de coupes renforcées apparaissait, pour éviter le renforcement de l'utilisation d'une stratégie associative. Les différences générales dans le nombre de présentations de chaque taille absolue de coupe, dans le nombre de présentation de tailles relatives (petite, moyenne ou grande) aux mêmes emplacements (milieu, gauche ou droite) dans les deux ensembles, et dans le nombre d'essais avec zéro, un et trois emplacements congruents en termes de tailles relatives de cou-



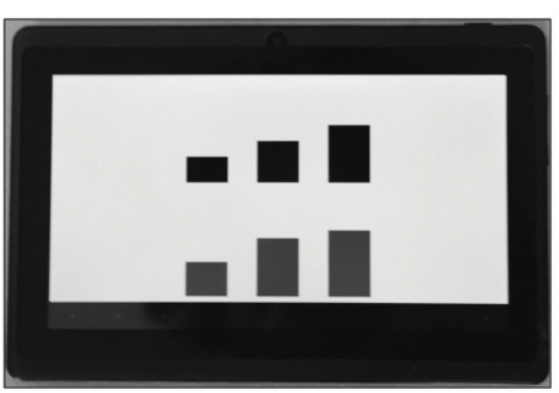


Figure 1 : Matériel utilisé avec les primates non-humains (gauche) et humains (droite)

pes, ont également été minimisées. Enfin, nous avons contrôlé le nombre de présentations de la récompense du même côté dans les deux ensembles de coupes (gauche, milieu ou droite) pour qu'il soit approximativement égal à un tiers.

Sur le conseil des personnels animaliers, des raisins ont été utilisés comme récompenses avec les chimpanzés et des raisins secs avec les capucins. Les enfants recevaient des autocollants.

Procédure

Une procédure identique a été utilisée pour chacun des groupes testés, sans donner aucune explication verbale de la tâche. Seule une présentation rapide du matériel et de la manière de sélectionner les réponses étaient données aux enfants. Les capucins et chimpanzés ont été entraînés à montrer la coupe cachant la récompense jusqu'à ce qu'ils puissent indiquer leur réponse de manière fiable.

Chaque session consistait en treize ou quatorze essais (voir ci-dessus). Dans chacun de ces essais, l'expérimentateur plaçait d'abord la récompense sous la coupe solution de l'ensemble Test à l'insu du participant, puis sous la coupe correspondante en terme de taille relative (petite, moyenne ou grande) dans l'ensemble Modèle, cette fois-ci dans le champ visuel du participant. L'ensemble Modèle était alors avancé vers le participant pour qu'il choisisse la coupe qui cachait la récompense, afin de s'assurer qu'il avait encodé correctement sous quelle coupe la récompense se trouvait (Hribar et al., 2011). Si le participant choisissait la coupe correcte, l'expérimentateur lui donnait la récompense qu'elle contenait, ou bien, dans le cas d'une réponse incorrecte, lui montrait à nouveau l'emplacement de la récompense, et l'autorisait à choisir à nouveau, et cela jusqu'à ce que le participant donne une réponse correcte. Ensuite, l'ensemble Test, dont la récompense était déjà cachée, était présenté devant l'ensemble Modèle, pour lui permettre de choisir une des coupes sur la base des informations encodées pour l'ensemble Modèle. Dans le cas d'une réponse correcte, l'expérimentateur donnait la récompense au participant, déposait la coupe à son emplacement initial, et déposait une capsule rouge au sommet de la coupe renforcée dans les deux ensembles. Dans le cas d'une réponse incorrecte, l'expérimentateur soulevait la coupe choisie pour montrer qu'elle ne contenait pas de récompense, puis la coupe cachant la récompense, la reposait et déposait les deux capsules rouges de la même manière que lors d'une réponse correcte. Le critère pour une réponse était une extension du bras (dans le cas des capucins) ou de la main (dans le cas des chimpanzés) à travers un des trois trous percés dans le plexiglas de la cloison séparant les animaux de l'expérimentateur, en face desquels les coupes étaient disposées.

La procédure décrite ci-dessus était automatisée dans la tâche virtuelle, à l'aide d'animations. Les participants indiquaient qu'ils étaient prêts en touchant une croix au centre de la tablette tactile, puis voyait un rond rouge être caché sous un des rectangles de l'ensemble Modèle. Une fois que le participant avait touché du doigt le rectangle cible, il recevait un autocollant et l'ensemble Test apparaissait. Le participant devait alors toucher du doigt un des trois rectangles de l'ensemble Test. Si ce rectangle correspondait à la réponse correcte, il se soulevait pour montrer que le second rond rouge était caché en-dessous, et les deux ronds rouges apparaissaient sur les rectangles sélectionnés. L'enfant recevait alors un second autocollant. Dans le cas d'une mauvaise réponse, le rectangle touché se soulevait, indiquant qu'il ne contenait rien et les deux ronds rouges apparaissaient au dessus des rectangles noirs qui les cachaient précédemment. Un nouvel essai recommençait lorsque l'enfant touchait à nouveau l'écran.

Les essais des sessions incomplètes étaient reportés à la séance suivante, avec un maximum de quatorze essais par séance.

II.2. Résultats et Discussion

Les participants étaient libres de participer à la tâche, ce qui en a mené certains à abandonner avant la fin des quarante essais. Dix-neuf enfants, 2 chimpanzés, et 19 capucins ont effectué la totalité des quarante essais. Les résultats des autres individus n'ont pas été inclus dans les analyses suivantes.

Une analyse de la variance effectuée sur les scores des participants des différents groupes, avec comme facteur intra-groupe la présence de distracteurs (Présent, Absent), et comme facteur intergroupe l'espèce des participants (Humains, Chimpanzés, Capucins bruns) montre un effet principal de l'espèce ($F(2,37) = 6,8$; $p = 0,003$; $\eta^2 = 0,269$), mais pas d'effet de la présence du distracteur ($F(1,37) = 0,1$; $p = 0,735$; $\eta^2 = 0,003$),

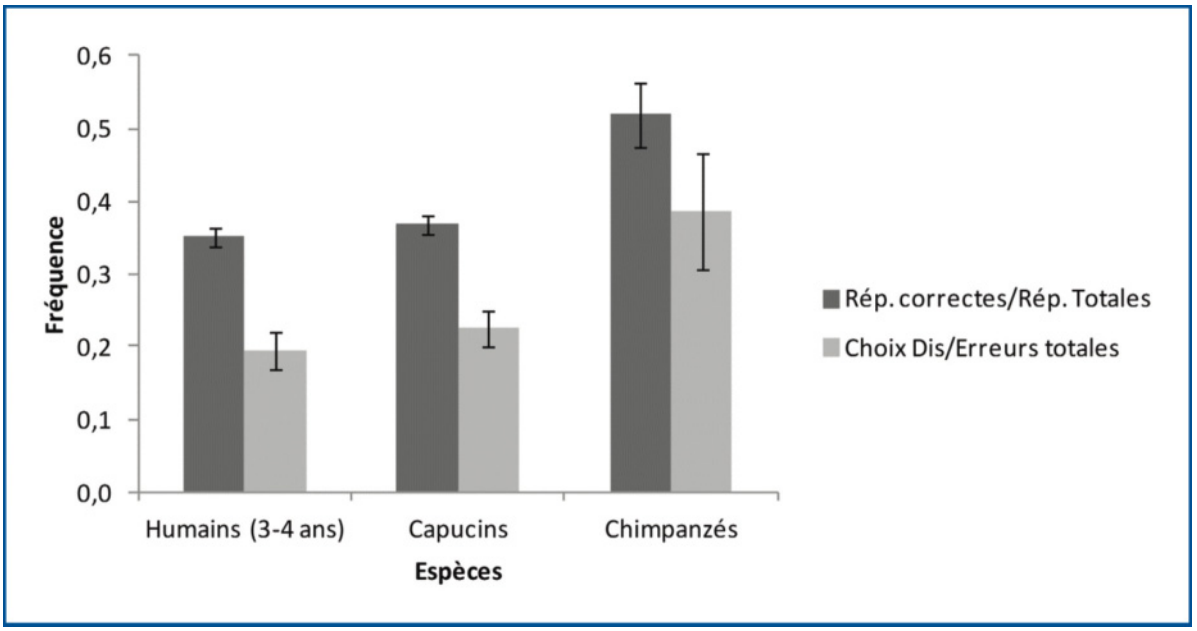


Figure 2 : Fréquence de réponses correctes et de choix du distracteur (barres : erreurs-types)

ni d'interaction entre l'espèce et la présence du distracteur ($F(2,37) = 1,4$; $p = 0,272$; $\eta^2 = 0,068$). Les différences entre les performances moyennes des Chimpanzés (52 % de réponses correctes) et des Humains (35 % de réponses correctes), et entre Chimpanzés et Capucins bruns (37 % de réponses correctes) ont été confirmées par des tests HSD de Tukey (Chimpanzés/Humains : $p=0,002$; Chimpanzés/Capucins bruns : $p=0,006$).

Une seconde analyse de la variance a été effectuée sur la proportion de choix du distracteur (Nombre de choix du distracteur/Nombre d'erreurs dans les essais avec distracteurs), avec comme facteur intergroupe l'espèce du groupe (Humains, Chimpanzés, Capucins bruns). Cette analyse montre une tendance à un effet du groupe dans la proportion de choix du distracteur ($F(2,37)=2,7$; $p=0,078$; $\eta^2=0,129$), avec les Chimpanzés (39 % de choix du distracteur lors d'erreurs) choisissant plus souvent les distracteurs que les autres espèces (Humains : 19 % de choix du distracteur ; Capucins bruns : 23 % de choix du distracteur).[1]

Malgré le faible échantillon de chimpanzés ayant complété l'intégralité des essais, l'ensemble de ces résultats suggère une sensibilité analogique chez les chimpanzés. En effet, ceux-ci ont eu de meilleures performances que les capucins et que les humains, et choisissent plus souvent des distracteurs similaires dans leur propriété de surface à la coupe cible de l'ensemble Modèle (ici, la taille absolue des coupes). La similarité de surface semble donc avoir eu un effet négatif sur les chimpanzés comme celui habituellement observé chez les enfants humains (Gentner & Toupin, 1986).

La différence entre capucins et chimpanzés était attendue, selon l'hypothèse d'une apparition de la capacité de raisonnement par analogie dans la lignée des Hominidés. Cependant cette hypothèse n'est pas compatible avec une meilleure performance des chimpanzés par rapports aux humains qui font partis de cette même lignée. La faiblesse des résultats chez l'enfant a pu avoir différentes origines : la combinaison du jeune âge des enfants testés et de l'absence d'instructions quant à ce en quoi consistait la tâche aura pu diminuer leur motivation malgré l'obtention régulière de récompenses. Ceci explique également pourquoi le distracteur n'a pas eu l'effet prédit dans ce groupe. Le distracteur n'est distracteur que si le participant s'intéresse à la

[1] L'ensemble des résultats rapportés pour les capucins dans l'expérience 1 n'a pas sensiblement changé après de plus nombreux essais (M= 183 essais, $\sigma = 65,7$; résultats non rapportés).

similarité entre les deux domaines comparés en terme de taille. Or les résultats des enfants n'indiquent pas qu'ils aient spontanément effectués ce type de comparaison. En effet, une grande part des enfants (47 %) a utilisé une stratégie de choix du rectangle se trouvant du même côté que le rectangle cible dans l'ensemble Modèle, montrant une tendance des enfants à raisonner en termes spatiaux lorsqu'aucune contrainte ne leur est donnée quant à la solution de la tâche. Ceci est cohérent avec les bonnes performances obtenues par des enfants d'âge comparable dans une tâche de raisonnement par analogie spatiale (Hribar et al., 2012).

Du fait de l'absolue nécessité de tester les différentes espèces dans des circonstances identiques (absence d'instructions), nous avons testé des adultes humains dans l'Expérience 2, afin d'observer si des participants humains plus âgés étaient capables de résoudre la tâche spontanément même en l'absence d'instructions.

III. Expérience 2 : test d'adultes humains sans instruction pour la résolution de la tâche

Étant données les faibles performances des enfants humains dans la tâche de raisonnement par analogie (Expérience 1), probablement dues à l'absence d'information quant à la tâche à effectuer, il paraissait nécessaire de savoir si des adultes étaient capables de résoudre la tâche spontanément en l'absence d'instructions. Nous avons donc réutilisé la tâche dématérialisée utilisée dans l'expérience précédente avec des adultes humains.

III.1. Méthodes

Participants

Au total, 21 adultes (Âge moyen = 30,1 ans, écart-type = 8,7 ans, de 23 à 58 ans) ont été testés dans cette étude, par le biais d'une application distribuée via Internet.

Matériel

Une tâche similaire à la tâche utilisée dans l'expérience 1 a été utilisée. Elle a été modifiée afin de leur donner un nombre d'essais virtuellement illimités pour la résoudre. Les essais étaient arrangés de façon à ce que, dans quarante essais consécutifs, vingt contiennent un distracteur, et vingt n'en contiennent pas. Une liste de quatre cents essais a été créée, et un ordre différent a été utilisé pour chaque participant, avec la contrainte que chaque bloc de quarante essais apparaisse dans le même ordre. Ainsi, les quarante premiers essais, les quarante suivants, et ce jusqu'aux quarante derniers étaient les mêmes, même si l'ordre des essais à l'intérieur de ces blocs était différent. Pour chaque bloc de quarante essais, les mêmes minimisations des différences des nombres de présentations que dans l'expérience 1 ont été effectuées.

Les rectangles et les ronds étaient de taille proportionnelle à l'écran sur lequel l'application était affichée ([[1,2,3,4,5 ou 6] $\times$ 0,06 $\times$ hauteur de l'écran + 0,06 $\times$ hauteur de l'écran] pxls pour la hauteur des rectangles ; [0,08 $\times$ largeur de l'écran] pxls pour la largeur des rectangles ; [0,06 $\times$ largeur de l'écran] pxls pour le diamètre des ronds). La présentation générale des ensembles était la même que dans l'expérience 1, avec la rangée supérieure de trois rectangles représentant l'ensemble Modèle, et la rangée inférieure l'ensemble Test.

Procédure

La procédure pour chaque essai était la même que celle décrite pour la tâche virtuelle de l'expérience 1, mis à part la sélection des réponses qui se faisait par un clic de la souris sur le rectangle choisi. La tâche s'arrêtait automatiquement après que le critère de réussite ait été atteint (dix essais réussis de manière consécutive).

III.2. Résultats et Discussion

Au total, 19 des 21 adultes testés ont réussi à atteindre le critère de réussite de la tâche (dix essais réussis de manières consécutives ; probabilité de 2×10^{-5} d'arriver à ce résultat par la chance). Les deux participants n'ayant pas fini la tâche ont abandonné après 13 et 40 essais. Les participants ayant réussi à atteindre le critère de réussite de la tâche y sont parvenus après une moyenne de 16 essais (incluant les dix essais réussis ; σ = 6,16, avec une amplitude de 10 à 29 essais).

Les participants ont très rapidement adopté la stratégie analogique correcte et 19 ont utilisé principalement cette stratégie au long de la tâche. Un des 2 sujets n'ayant pas réussi à résoudre la tâche a montré un biais pour un des côtés, et l'autre a alterné entre un biais de côté et le choix du rectangle le plus similaire en terme de taille à celui cachant le rond dans l'ensemble Modèle.

Cette expérience montre que même en l'absence d'instructions explicites (comme dans l'Expérience 1), les adultes humains utilisent spontanément leur capacité de raisonnement par analogie pour résoudre les problèmes présentés, même si tous les sujets n'ont pas adopté la stratégie correcte, ce qui montre l'importance du rôle des instructions verbales dans ce type de tâche chez l'Humain.

Les capacités de raisonnement par analogie sont connues pour se développer durant l'enfance et l'adolescence, et un des principaux facteurs de développement est le développement de la verbalisation spontanée des informations visuelles dans le raisonnement (Glady, Thibaut, French, & Blaye, 2012) et dans les processus associés tels que la mémoire de travail (Hitch, Halliday, Schaafstal, & Heffernan, 1991 ; Hitch, Halliday, Schaafstal, & Schraagen, 1988). Il est donc possible que la différence observée dans les performances des enfants de l'Expérience 1 et des adultes testés dans cette expérience soit due à l'absence d'instructions, ne permettant pas aux enfants de montrer leur plein potentiel. Les adultes testés ont eu des performances meilleures que celles des chimpanzés de l'Expérience 1, atteignant dix réponses correctes consécutives en moins de quarante essais, ce qu'aucun des chimpanzés n'a réussi. Ce résultat, compatible avec l'hypothèse (1), est en faveur d'une hypothèse intermédiaire développée par Gentner (2010) : le langage, propre à l'Homme en terme de capacités descriptives et de complexité, et prenant la forme d'objets et de prédicats, aurait apporté un changement qualitatif dans les capacités de représentation, et donc de raisonnement par analogie, même si ces capacités étaient déjà présentes chez les autres Hominidés.

V. Discussion générale

Les résultats de ces deux expériences convergent : testés dans des conditions conceptuellement identiques, des capucins bruns, des chimpanzés et des humains, enfants et adultes, ont montré des performances contrastées. Les capucins bruns, singes du Nouveau Monde, n'ont pas réussi à avoir des performances meilleures que ce que prédirait la chance (Expérience 1). Au contraire, la plupart de ces singes ont fini par adopter une stratégie consistant à choisir systématiquement le même côté de l'appareil. Les chimpanzés ont quant à eux démontré une certaine capacité à résoudre la tâche de mise en relation, mais ont eu des résultats suboptimaux. Un autre indice que leurs réponses étaient guidées par la similarité de taille entre les deux ensembles de coupes est leur propension à choisir le distracteur lorsqu'il était présent (Expérience 1). Enfin, les humains ont eu des résultats mitigés. Les enfants (3-4 ans) n'ont pas réussi à résoudre la tâche et ont montré des performances au niveau de la chance (Expérience 1). Les adultes ont réussi à résoudre la tâche et cela après quelques essais seulement (Expérience 2). Ainsi, les adultes humains ont montré les meilleures performances dans la tâche de mise en correspondance.

L'hypothèse que le raisonnement par analogie soit apparu spécifiquement dans la lignée humaine (Penn et al., 2008) n'est pas capable de décrire correctement l'ensemble des résultats présentés ici, qui sont confortés par d'autres études similaires mais n'ayant pas directement testé différentes espèces dans des conditions identiques. En effet les grands singes ont démontré à plusieurs reprises leur capacité à utiliser des relations d'ordre supérieur, telles que les relations d'identité, de différence et de similarité (Hribar & Call, 2011 ; Hribar et al., 2011, 2012 ; Thompson et al., 1997 ; Vonk, 2003).

Cependant les résultats semblent plus nuancés que ce que l'hypothèse d'une apparition chez les Hominidés sans évolution différentielle ultérieure dans cette lignée décrirait (Thompson & Oden, 2000). En effet, malgré les capacités des grands singes non-humains à résoudre les tâches de raisonnement par analogie, leur précision a été systématiquement inférieure à celle des humains. En effet, aucune des espèces de grands singes, à part l'espèce humaine, n'a atteint des performances proches de la perfection (Hribar & Call, 2011 ; Hribar et al., 2011, 2012 ; Thompson et al., 1997 ; Vonk, 2003, le présent document, Expérience 1 et 2). Ceci est compatible avec l'hypothèse de Gentner (2010) qui veut que l'apparition du raisonnement par analogie se soit faite chez les Hominidés, mais qu'une évolution qualitative se soit faite ultérieurement, du fait de la complexification du langage chez l'Humain. Ainsi la différence dans les résultats à ces tâches entre les différentes espèces d'Hominidés résiderait dans la capacité de l'espèce humaine à utiliser un langage utilisant des prédicats et objets, qui contribuerait à une représentation du monde

plus riche et complexe, ainsi qu'à focaliser son raisonnement sur des aspects relationnels et à maintenir des éléments en mémoire de travail, étapes nécessaires dans ce type de raisonnement (Bermudez, 2003 ; Glady et al., 2012 ; Hitch et al., 1988 ; Rattermann et al., 1990).

Dans ces expériences, nous avons également introduit une interférence due à la similarité de surface par l'intermédiaire, dans l'ensemble Test, d'un distracteur identique à la cible de l'ensemble Modèle, mais n'ayant pas la même relation aux autres coupes de l'ensemble Test que la cible aux autres coupes de l'ensemble Modèle. Il a été montré que cette similarité de surface, lorsqu'elle ne converge pas avec la similarité relationnelle, interfère avec la capacité de raisonner par analogie chez l'Humain (Gentner & Toupin, 1986 ; Kotovsky & Gentner, 1996 ; Ross, 1989). Les enfants testés dans notre étude n'ont pas été la cible de ce type d'interférence. Ceci résulte probablement du fait que l'interférence de ce type de distracteur est due au but de la tâche, but qui se focalise sur la similarité entre les deux domaines comparés (Glady et al., 2012). Dans notre tâche, les enfants n'ont pas fait l'expérience de cette interférence parce qu'ils n'ont pas réussi à extraire correctement le but de la tâche, et qu'aucune instruction quant à ce but ne leur a été donnée. Il est notable que les chimpanzés, qui ont eu de relativement bonnes performances dans la tâche, ont eu une tendance à choisir ce distracteur plus souvent que les deux autres espèces. Ceci est probablement le fruit de la compréhension du but de la tâche en termes de similarité. Les adultes humains n'ont pas montré de signes liés à l'interférence due au distracteur, ce qui peut s'expliquer par des performances plafond de la plupart des individus après un faible nombre d'essais.

Remerciements

J'aimerais remercier la Fondation Fyssen d'avoir soutenu ce projet. J'aimerais également remercier Christine Caldwell et le département de Psychologie de l'Université de Stirling pour leur collaboration dans la réalisation de ces études, ainsi que le Zoo d'Edimbourg qui m'a permis de faire participer leurs animaux à ces expériences.

Bibliographie

• Bermudez, J. L. (2003). *Thinking Without Words* (Oxford Uni.).

• Fagot, J., & Parron, C. (2010). Relational matching in baboons (Papio papio) with reduced grouping requirements. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 36*(2), 184–193.

• Flemming, T. M., Beran, M. J., Thompson, R. K., Kleider, H. M., & Washburn, D. a. (2008). What Meaning Means for Same and Different: Analogical Reasoning in Humans (Homo sapiens), Chimpanzees (Pan troglodytes), and Rhesus Monkeys (Macaca mulatta) Timothy. *Journal of Comparative Psychology, 122*(2), 176–185.

• Flemming, T. M., Thompson, R. K., Beran, M. J., & Washburn, D. a. (2011). Analogical reasoning and the differential outcome effect: transitory bridging of the conceptual gap for rhesus monkeys (Macaca mulatta). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 37*(3), 353–60.

• Gentner, D. (2010). Bootstrapping the mind: Analogical processes and symbol systems. *Cognitive Science, 34*(5), 752–75.

• Gentner, D., & Toupin, C. (1986). Systematicity and surface similarity in the development of analogy. *Cognitive Science, 10*(3), 277–300.

• Glady, Y., Thibaut, J.-P., French, R. M., & Blaye, A. (2012). Explaining children's failure in analogy making tasks: A problem of focus of attention? In *Proceedings of the 34th annual conference of the Cognitive Science Society* (pp. 384–389).

• Hitch, G. J., Halliday, M. S., Schaafstal, A. M., & Heffernan, T. M. (1991). Speech, "inner speech," and the development of short-term memory : Effects of picture labeling on recall. *Journal of Experimental Child Psychology, 51*(2), 220–234.

• Hitch, G. J., Halliday, S., Schaafstal, a M., & Schraagen, J. M. (1988). Visual working memory in young children. *Memory & Cognition, 16*(2), 120–32.

• Hribar, A., & Call, J. (2011). Great apes use landmark cues over spatial relations to find hidden food. *Animal Cognition, 14*(5), 623–35.

• Hribar, A., Haun, D., & Call, J. (2011). Great apes' strategies to map spatial relations. *Animal Cognition, 14*(4), 511–23.

• Hribar, A., Haun, D., & Call, J. (2012). Children's reasoning about spatial relational simila-

rity: the effect of alignment and relational complexity. *Journal of Experimental Child Psychology, 111*(3), 490–500.

• Kennedy, E. H., & Fragaszy, D. M. (2008). Analogical reasoning in a capuchin monkey (Cebus apella). *Journal of Comparative Psychology, 122*(2), 167–75.

• Kotovsky, L., & Gentner, D. (1996). Comparison and categorization in the development of relational similarity. *Child Development, 67*(6), 2797.

• Oden, D. L., Thompson, R. K., & Premack, D. (2001). Can an ape reason analogically ? Comprehension and production of analogical problems by Sarah, a chimpanzee (Pan troglodytes). In D. Gentner, K. J. Holyoak, & B. N. Kokinov (Eds.), *The Analogical Mind: Perspectives from Cognitive Science* (pp. 471–497). Cambridge, MA : The MIT Press.

• Penn, D. C., Holyoak, K. J., & Povinelli, D. J. (2008). Darwin's mistake: explaining the discontinuity between human and nonhuman minds. *The Behavioral and Brain Sciences, 31*(2), 109–178.

• Rattermann, M. J., Gentner, D., & DeLoache, J. (1990). The effects of familiar labels on young children's performance in an analogical mapping task. In *Proceedings of the Twelfth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 22–29).

• Ross, B. H. (1989). Distinguishing types of superficial similarities: Different effects on the access and use of earlier problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 15*(3), 456–468.

• Thompson, R. K., & Oden, D. L. (2000). Categorical perception and conceptual judgments by nonhuman primates: the paleological monkey and the analogical ape. *Cognitive Science, 24*(3), 363–396.

• Thompson, R. K., Oden, D. L., & Boysen, S. T. (1997). Language-naive chimpanzees (Pan troglodytes) judge relations between relations in a conceptual matching-to-sample task. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 23*(1), 31–43.

• Vonk, J. (2003). Gorilla (Gorilla gorilla gorilla) and orangutan (Pongo abelii) understanding of first– and second–order relations. *Animal Cognition, 6*(2), 77–86.

I. Introduction

Analogical reasoning is the ability to judge of the similarity of two domains on the basis of their relational structure, thus using a higher order relation between sets of lower order relations in the compared domains (Gentner, 1983). The scientific interest of the study of this process resides in its omnipresence in human thinking (Gentner & Smith, 2012; Holyoak, 2012). The presence of this ability in non human Primates was recently debated (Gentner, 2010; Penn, Holyoak, & Povinelli, 2008, Thompson & Oden, 2000) because it was suggested that the ability to use such higher order relations would be what separates human minds from those of other primate species. Hence, the comparative study of analogical reasoning would allow to better understand the origins and mechanisms of human cognition.

Different tasks have been used to test analogical reasoning in non human primates. These tasks can be grouped in two main categories: the Relational Matching-to-Sample task (RMTS), and the complex domains mapping task.

The RMTS task is a forced choice task between different sets of stimuli after the presentation of a model set depicting a simple relation (usually sets of identical or non identical stimuli). Thus, if the model set only contains identical stimuli, the participant has to choose the set that contains only identical stimuli in the choice between two sets that she is given. On the contrary, if the model set contains non identical elements, she has to choose the set containing different elements.

Old World monkeys tested in RMTS tasks solved them after numerous trials (baboons: 4200 trials; Fagot et Parron, 2010; rhesus macaques 900 trials; Flemming, Thompson, Beran, et Washburn, 2011). Hominids tested in similar tasks solved them considerably more quickly (orangutans: 42 trials: Vonk, 2003; chimpanzees: 88 essais; Thompson, Oden, & Boysen, 1997). Humans were also tested without instructions, and compared to rhesus macaques and chimpanzees (Flemming, Beran, Thompson, Kleider, & Washburn, 2008). The majority of humans reached the criterion of 80% of correct answers in ten consecutive trials within the first hundred trials. Two out of the four chimpanzees

tested managed to perform above chance, though they were not as good as humans. Macaques did not manage to perform above chance in this study.

RMTS tasks are however often criticized for their simplicity which is not representative of the complexity reached by analogical reasoning in Humans. Complex domains mapping tasks are similar to RMTS tasks in that the higher-order relation used is the same (i.e., a similarity relation between the two domains). Nevertheless, they differ in the number and type of relations used in the compared domains. RMTS tasks are often limited to same/different relations, and do not use more than one relation in each domain compared, while complex domains mapping tasks involve more numerous and subtler relations such as spatial, height, color, or shape relations. In this kind of task, the participant has to find the element in the test set which has the same relation to the other elements in this set as the target element in the model set has to other elements of that set. These tasks, unlike the RMTS tasks, have been used extensively with human participants, and children in particular (Kotovsky & Gentner, 1996; Rattermann et al., 1990).

By using an RMTS task, then a mapping task of two domains containing cups of different sizes, Kennedy & Fragaszy (2008) tested a group of brown capuchins. One of the monkeys managed to solve the task and generalize the solution to more complex mapping tasks after a preliminary training of more than eight hundred trials in a same/different object matching task, then in the RMTS task.

Apes have also been tested in a spatial mapping task. Hribar & Call (2011, see also Hribar, Haun, & Call, 2011) tested orangutans, chimpanzees and bonobos. These different species demonstrated some ability to solve spatial problems, even though the strategy they were using was not the same as the strategy adult humans would spontaneously use (a strategy based on the relation of the cups to the table edges rather than to one another). It is interesting to note that human children (4-5 year old) solve the same task, without instructions about the strategy to use, but perform better when a mapping based on the relation of the cups to the edges of the table has to be used instead (i.e., the strategy used by the other apes species; Hribar, Haun, & Call, 2012). Human children were also tested with other mapping tasks using height, color, and shape relations (Kotovsky & Gentner, 1996; Rattermann et al., 1990). Their performance, though suboptimal, was above chance, for children aged 4 and older.

These results in RMTS and complex domains mapping tasks seem to suggest an ability to reason by analogy in non human primates, including monkeys. However, monkeys need a particularly long training, suggesting that they don't use this mode of reasoning spontaneously, when apes manage to solve the task within less than a hundred trials.

This review of the literature also brings out that there has not been any study conducted with the same complex domains mapping task, the only task used with animals which is close enough to the complexity met in usual analogical reasoning tasks used with humans, *and* testing the different groups concerned by the hypotheses of evolutionary theories of analogical reasoning in identical conditions. The first of these hypotheses (Thompson & Oden, 2000, hypothesis (1) hereafter) states that the apparition of analogical reasoning happened in Apes' common ancestor. A discontinuity in analogical reasoning abilities should thus be observed between Monkeys and Apes. The second hypothesis (hypothesis (2) hereafter) states that this apparition happened in the human lineage (Penn, Holyoak, & Povinelli, 2008). In this case, the discontinuity should be present between Humans and non human Primates. The goal of our study was to decide between these different hypotheses of analogical reasoning in primates by testing three representative species of these different Primate groups (Monkeys: brown capuchins, Apes: chimpanzees and humans).

II. Experiment 1: comparison of human children, brown capuchins, and chimpanzees

In a mapping task such as the one used by Kennedy & Fragaszy (2008, see **Fig. 1**), with a condition with a distractor, and one without, we predicted a difference in the frequency of correct responses of participants in the same conditions (with or without distractor) between the groups on each side of the discontinuity (i.e., between

brown capuchins and the two other groups if hypothesis (1) is correct, or between humans and the two other groups if hypothesis (2) is correct), and similar differences or absence of differences in the frequencies of correct responses and of the number of errors due to the distractors in the groups on the same side of the discontinuity (i.e., the same difference or absence of difference between the conditions (with or without distractors) within these groups).

We also expect that participants will use heuristics not resulting in the correct answer in the groups which are not able to reason by analogy, and that they will display different proportions of the possible types of response dissimilar to the groups which are able to reason by analogy.

In order to test this, we measured frequencies of correct responses, and, in the condition with distractor, the type of errors.

II.1. Methods

Participants

Three groups of participants were tested in an analogical reasoning task. The first group consisted of 31 human children (*H. sapiens*) aged 3 to 4 years (M = 48.5 months, σ = 9.3 months, with a range from 37 to 64 months in the final sample), the second of 7 chimpanzees (*P. troglodytes*), and the last one of 20 brown capuchins (*C. apella*).

Materials

The task consisted in forty trials (divided in one session of fourteen trials and two sessions of thirteen trials) similar to the complex domain mapping task used by Rattermann, Gentner, & DeLoache (1990) with human children, and by Kennedy & Fragaszy (2008) with brown capuchins **(Fig. 1)**. Half of the trials were presented with a distractor, defined as a cup in the Test set having the same absolute, but not relative, height as the cup hiding the reward in the Model set. The other half of the trials were presented without a distractor (i.e., all the six cups were of different heights). The material task was pretested with children who demonstrated a rapid loss of interest due to the time needed to prepare trials. We thus decided to use a virtual version of the task strictly analogous to the material version (**Fig. 1**, right panel).

In the material task, each trial consisted in six cups (three [small, medium, and big] in the Model set, and three [small, medium, and big] in the Test set). Each set of three cups was selected in a set of six cups of different heights (5.5cm, 7cm, 8.5cm, 10cm, 11.5cm, 13cm). All the cups were cylinders, with an identical diameter (7.9cm) and color (black). The six cups were presented on two separable stands of different height (10cm and 18cm): the Model set was presented on the highest stand to allow the partici-

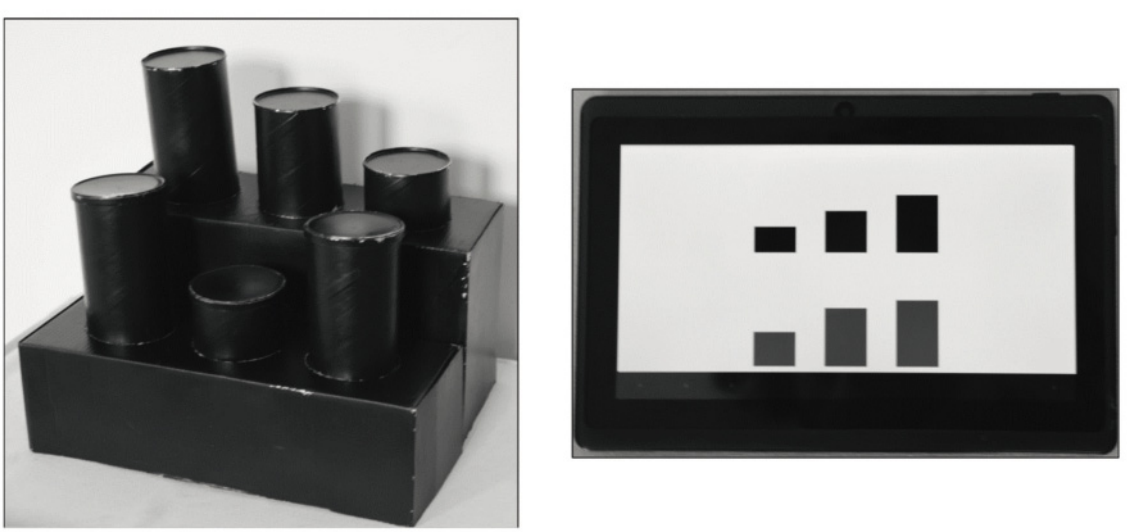


Figure 1: Materials used to test non human primates (left) and humans (right)

pant to compare the two sets of three cups when solving the task. The distances between adjacent cups were equal, and a 0.5cm-deep whole was used as a landmark for their position.

The virtual task was conceptually identical to the material task. The cups were symbolized by black rectangles of different heights (50pxls, 65pxls, 80pxls, 95pxls, 110pxls, 125pxls; 75pxls wide). The two sets were presented on two different lines, the Model set at the top of the screen, and the Test set at the bottom. Rewards were symbolized by red circles (50 pxls diameter). The task was presented on a 7" tactile tablet.

The trials were constructed in order to minimize the differences, for each set (Model and Test), in the number of presentations where the reward was hidden in the left, middle, and right position, and in the number of times each pair of baited cups appeared together to avoid to reinforce an associative strategy. General differences in the number of presentation of each absolute height of cup, in the number of congruent presentations of relative heights in both sets (left, middle, or right), and in the number of trials with zero, one and three congruent presentations of relative heights of cups were also minimized. We also controlled for the number of presentations of the reward on the same side (left, middle, right) in each set to be approximately equal to a third.

On the advice of the keepers, we used grape as a reward with chimpanzees, and raisins as a reward with capuchin monkeys. Children were given stickers as a reward.

Procedure

An identical procedure was used in each group, without giving any verbal explanation of the task. Only quick instructions about the material and how to select an answer were given to children. Capuchins and chimpanzees were trained to reach for the baited cup until they could indicate their choice reliably.

Each session consisted in thirteen to fourteen trials (see above). During each trial, the experimenter first put the reward under the cup of the Test set, without the participant being able to see where it was hidden, then the experimenter put the reward under the baited cup in the Model set in the participants' visual field. The Model set was then put forward for the participant to choose the cup that was baited, in order to control that she correctly encoded under which cup the reward was (Hribar et al., 2011). If the participant chose the correct cup, the experimenter gave her the reward, or, in the case of an incorrect response, showed again the place of the reward and authorized her to give another answer, until the response was correct. Then the Test set, in which the reward was already hidden, was presented before the Model set, in order to allow the participant to choose one of the cups on the basis of the information encoded for Model set. In the case of a correct response, the experimenter gave the reward to the participant, put the cup back in its initial place, and put a red cap on top of the baited cup in each set. In the case of an incorrect response, the experimenter lifted the chosen cup to show that it was not containing the reward, lifted the cup hiding the reward, then put it back in its place, and finally put the red caps on the two baited cups in the same manner as with a correct response. The criterion for a response was an extension of the arm (in the case of capuchins) or of the hand (in the case of chimpanzees) through one of the holes in the Plexiglas of the experiment room/cubicle. The different cups were displayed in front of these holes.

The procedure described above was automated in the virtual task, with the help of animations. Participants indicated that they were ready by touching a cross in the center of the tactile tablet, then saw a red circle being hidden under one of the rectangles of the Model set. Once the participant had touched the rectangle hiding the circle from the tip of the finger, she received a reward, and the three rectangles from the Test set appeared. The participant then had to touch one of the rectangles from the Test set. If that rectangle corresponded to the correct response, it was lifted up to show that it covered the second red circle, the two red cirles appeared on top of the selected rectangles, and the participant received a second reward. In the case of an incorrect answer, the selected rectangle was lifted up, indicating that it was not containing the second circle, and the two red circles appeared on top of the two target rectangles which were hiding them. A new trial started again when the participant touched the screen again.

The trials of the incomplete sessions were postponed to the next session, with a maximum of fourteen trials per session.

II.2. Results and Discussion

Participants were free to participate to the task, which lead some of them to give up before the end of the forty trials. Nineteen children, 2 chimpanzees, and 19 capuchin monkeys took part in the forty trials. The results of the other individuals were not included in the following analyses.

A two-way mixed ANOVA ran on the scores of the participants of different groups, with the presence of a distractor (Present, Absent) as a within-subject factor, and the species of the participants (Human, Chimpanzee, Brown Capuchin) as a between-subject factor, shows a main effect of the species ($F(2,37) = 6.8$; $p = 0.003$; $\eta^2 = 0.269$), but no effect of the presence of the distractor ($F(1,37) = 0.1$; $p = 0.735$; $\eta^2 = 0.003$), nor an interaction between the species and the presence of distractor ($F(2,37) = 1.4$; $p = 0.272$; $\eta^2 = 0.068$). The difference in performance between Chimpanzees (52% of correct response) and Humans (35% of correct response), and between Chimpanzees and Brown Capuchins (37% of correct response) were confirmed by Tukey HSD tests (Chimpanzees vs. Humans: $p = 0.002$; Chimpanzees vs. Brown Capuchins: $p = 0.006$).

A one-way ANOVA was ran on the proportion of choice of the distractor (Number of choice of the distractor/Total number of errors in the trials with distractor), with the species of the group (Human, Chimpanzee, Brown Capuchin) as a between-subject factor. It shows that the species effect tends to be significant ($F(2,37) = 2.7$; $p = 0.078$; $\eta^2 = 0.129$), with Chimpanzees (39% of choice of the distractor when making an error) choosing more often distractors than the other two species (Humans: 19% of choice of the distractor when making an error; Brown Capuchins: 23% of choice of the distractor when making an error).[2]

Despite the small sample of chimpanzees who have completed the task, these results, taken as a whole, suggest an analogical sensitivity in this species. Indeed, they performed better than both capuchin monkeys and humans, and tended to choose the distractors more often than them. The superficial similarity thus seems to have a negative effect on chimpanzees, as usually observed in humans (Gentner & Toupin, 1986; Ross, 1989).

The difference between chimpanzees and capuchins was expected in the context of the hypothesis of an appearance of analogical reasoning in

[2] The results reported in Experiment 1 about capuchin monkeys did not sensibly change after more trials (M= 183 trials, $\sigma = 65.7$; results not reported).

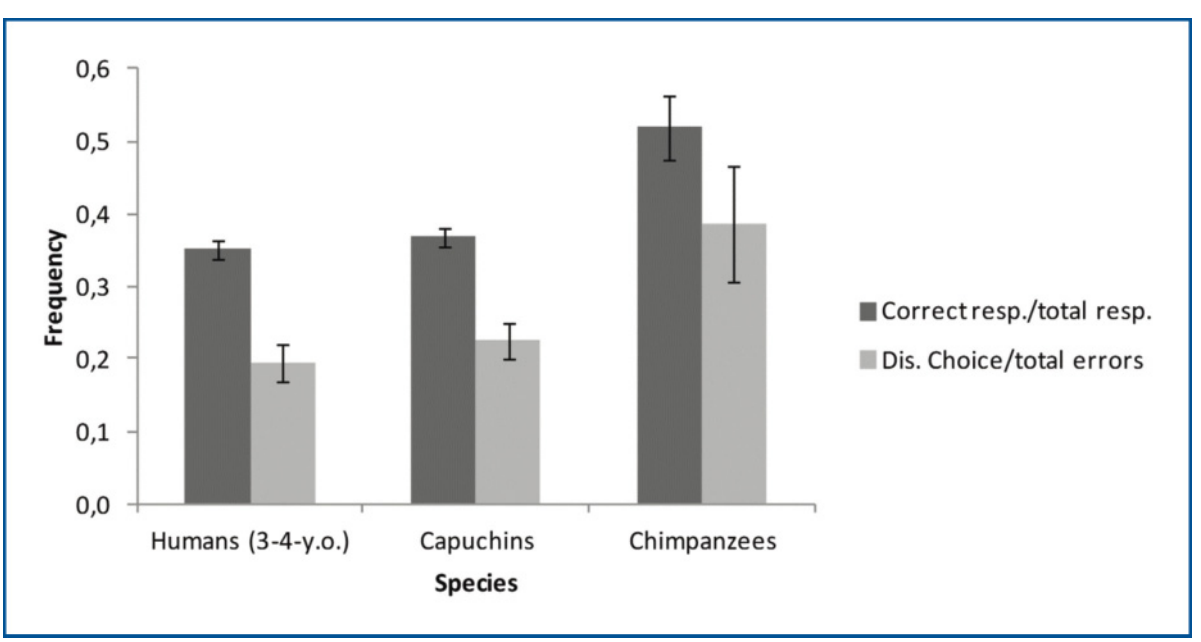


Figure 2: Frequency of correct response and of choice of the distractor (bars represent SEM)

apes. However, this hypothesis is not compatible with a better performance of the chimpanzees in comparison to humans who are apes too. The weakness of children's results might have been caused by several factors. The combination of their young age and of the absence of instructions about the goal of the task could have decreased their motivation to understand the task, despite them regularly getting rewards. This also explains why the distractor did not have the predicted effect in this group. The distractor was distracting only if the participant was interested in the similarity between the two domains in terms of height. However, the children's results do not indicate that they spontaneously made this kind of comparison. Indeed, a great proportion of children (47%) consistently chose the cup which was on the same side as the target cup in the Model set, showing a tendency to spontaneously reason in spatial terms when no explanation about the solution was given. This is consistent with the good performance of children of the same age tested in a spatial mapping task (Hribar et al. 2012).

Because of the absolute necessity to test the different species in identical settings (absence of instructions), we tested adult humans in the second experiment, in order to observe if older human participants were able to spontaneously solve the task without instructions.

III. Experiment 2: test of adult humans without instructions for the solution of the task

Given the weak performance of human children in the analogical reasoning task in the first experiment, probably due to the absence of information about the goal of the task, it was necessary to know whether adult humans were able to spontaneously solve the task without instructions. We thus reused the virtual task of the first experiment with human adults.

III.1. Methods

Participants

In total, 21 human adults (mean age = 30.1 years, $\sigma = 8.7$ years, with a range from 23 to 58 years) were tested in this experiment, via an application distributed on the Internet.

Materials

A task similar to the one in Experiment 1 was used to test participants, but was modified in order to give a virtually unlimited number of trials for the participants to solve the task. The trials were balanced so twenty trials contained a distractor, and twenty did not, in a block of forty consecutive trials. A list of four hundred trials was created, and a different order was used for each participant, with the constraint that each block of forty trials appeared in the same order. Thus, the forty first trials, the next forty, and so on until the last forty trials were the same, even though the order of the trials was different within each forty-trials block. For each block of forty trials, the same differences in the number of presentations were minimized as in Experiment 1 (place of the reward, pairs of cups of absolute heights, number of congruent presentation of relative heights, number of congruent relative heights in the two sets, side of the rewards).

The dimension of the rectangles and circles were proportional to the screen on which they were displayed ([[1,2,3,4,5 or 6] $\times$ 0.06 $\times$ height of the screen + 0.06 $\times$ height of the screen] pxls for the height of the rectangles; [0.08 $\times$ width of the screen] pxls for the width of the rectangles; [0.06 $\times$ width of the screen] pxls for the diameter of the circles). The general presentation of the two sets was identical to the one in Experiment 1, with a top row of three rectangles symbolizing the Model set, and a bottom row of three rectangles symbolizing the Test set.

Procedure

The procedure for each trial was the same as the one described for the virtual task in Experiment 1, apart from the selection of the responses which was done by a click of the mouse on the selected rectangle. The task automatically stopped after a criterion of ten consecutive correct responses was met.

III.2. Results and Discussion

In total, 19 of the 21 adults tested managed to reach the criterion (ten consecutive correct responses, with an approximate 2×10^{-5} probability to reach this result by chance). The 2 participants who did not manage to reach the criterion gave up after 13 and 40 trials. The participants who managed to reach it, did it after an average of 16 trials (including the ten correctly solved trials; σ=6.16, in a range from 10 to 29 trials).

Participants quickly adopted the correct, analogical strategy. Indeed, 19 out of 21 participants used mainly this strategy along the task. One of the 2 participants who failed showed a bias for one of the sides, and the other one alternated between a side bias, and a choice of the rectangle which was the most similar in terms of height to the target rectangle of the Model set.

This experiment shows that, even in absence of explicit instructions (i.e., in conditions comparable to those of Experiment 1) adult humans spontaneously use their analogical reasoning abilities to solve the problems displayed, even though all participants did not adopt the correct strategy, which shows the importance of verbal instructions in this kind of tasks in humans. These results are in sharp contrast with the results by human children observed in the first experiment.

Analogical reasoning abilities are known to develop during childhood and adolescence, and one of the factors of general development is the development of spontaneous verbalization of visual information in reasoning (Glady et al., 2012) and in related processes such as working memory (Hitch et al., 1991, 1988). It is thus possible that the difference observed between the performance of children in Experiment 1 and adults in Experiment 2 was due to the absence of instructions, which did not allow children to show their full potential in this task. The adults performed better than the chimpanzees in Experiment 1, reaching ten consecutive correct responses in less than forty trials, which none of the chimpanzees managed to do. This result, though coherent with hypothesis (1), is in favor of an intermediary hypothesis developed by Gentner (2010), stating that language, unique to Humans in its descriptive capacity and complexity, and taking an object and predicate formalism, brought a qualitative change in the ability to represent and thus to reason by analogy, though this ability is already present in the other ape species.

V. General discussion

The results from these two experiments are converging. Tested in conceptually identical conditions, brown capuchins, chimpanzees and humans, children and adults, showed different levels of performance. Brown capuchins which are New World monkeys did not manage to perform above chance level (Experiment 1). On the contrary, most of them ended adopting a strategy consisting in always choosing the cup on the same side of the apparatus. Chimpanzees, on the contrary, demonstrated some ability to solve the mapping task, but had suboptimal results. Another clue that they were guided by height similarity between the two sets of cups was their tendency to choose the distractor when it was present (Experience 1). Finally, humans showed mixed results. Children (aged 3-4) did not manage to solve the task, and did not perform above chance (Experiment 1). On the contrary, adults solved the task only after a few trials (Experience 2). Thus, adult humans showed the best performances in the mapping task.

These results suggest that the hypothesis that analogical reasoning has appeared specifically in the human lineage (Penn et al., 2008) is not able to account accurately for the results presented here, results which concur with those from other similar studies which did not directly test monkeys and apes in identical conditions. Indeed, non human apes demonstrated their ability to use higher order relations in several studies (Hribar & Call, 2011; Hribar et al., 2011, 2012; Thompson et al., 1997; Vonk, 2003).

However the present results seem more finely-shaded than the hypothesis of an apparition of analogical reasoning in the Apes without further evolution within the apes lineage would state (Thompson & Oden, 2000). Indeed, even though non human apes displayed an ability to solve analogical problems, the accuracy of their solution is below the level of humans. No other apes species than humans reached a near perfection level (Hribar & Call, 2011; Hribar et al., 2011, 2012; Thompson et al., 1997; Vonk, 2003, the present document, Experience 1 and 2). This is coherent with the hypothesis developed by Gentner (2010) which states that analogical reasoning appeared in Apes, but that a qualitative evolution followed due to a higher complexity of the language in Humans than in Apes. The difference in the results of these tasks between the different species of apes would thus reside in the capacity to use a language with an object and predicate formalism which would contribute to a richer and more complex representation of the world, and to focalize reasoning on relational aspects and to maintain elements in working memory, all necessary steps in this kind of reaso-

ning (Bermudez, 2003; Glady et al., 2012; Hitch et al., 1988; Rattermann et al., 1990).

In these experiments, we also introduced interference due to superficial similarity through distractors, identical in their absolute height to the target cup in the Model set, in the Test set, but not having the same relative height as this target cup. Superficial similarity has been shown to interfere in human analogical reasoning, when it is not converging with relational similarity (Gentner & Toupin, 1986; Kotovsky & Gentner, 1996; Ross, 1989). However, children tested in our study were not subject to this kind of interference. This is probably the result of the interference of this type of distractor being due to the goal of the task, goal that focalizes on the similarity between the two domains compared (Glady et al., 2012). In our task, children did not experience interference because they did not extract the goal of the task on their own, and no instruction was given to guide them toward this goal. It is noteworthy that chimpanzees which had good performances in the task had a tendency toward choosing the distractor more often than the two other species. This is probably the result of their understanding of the goal of the task in terms of similarity. Adult humans did not show any sign of interference due to the distractors, which can be explained by ceiling performances by most of the individuals shortly after the beginning of the task.

Acknowledgements

I would like to thank the Fyssen Foundation for supporting this project. I would also like to thank Christine Caldwell and the department of Psychology at the University of Stirling for their collaboration in the realization of these studies, and the Edinburgh Zoo staff who allowed me to test their animals in these experiments.

L'invariance comme une mesure objective de l'attribution distale en perception tactile ?

Jessica HARTCHER-O'BRIEN

Universités de la Sorbonne, UPMC Université Paris VI, UMR 7222, ISIR, Paris, France

Résumé

Quand nous explorons le monde avec nos mains, nous sommes directement conscients des objets que nous touchons, plutôt que des stimulations proximales aux bouts de nos doigts. Par exemple, quand nous cherchons une pièce dans notre sac, au moment du contact, nous sommes directement conscients de la pièce, pas du contact mécanique au bout de nos doigts. La capacité à reconnaître la pièce est indépendante des conditions de perception dans laquelle nos doigts saisissent et reconnaissent la pièce. Dans le présent article, nous évaluons si la perception haptique des formes est invariante aux changements perceptifs d'hémichamp et de distance entre l'objet et l'observateur. En utilisant une tâche de jugement de courbure, nous avons trouvé que la forme perçue n'est pas invariante à l'hémichamp mais qu'il y a un fort biais individuel dans la forme perçue qui est lié à la région de l'espace externe que l'objet occupe. Ce biais dans la forme perçue ne dépend pas de la main utilisée pour explorer la forme. Ce résultat suggère que les processus somatosensoriels latéralisés outrepassent la constance de la forme et sont eux-mêmes dépendants de l'espace externe plutôt que de la somatotopie. Dans une deuxième tâche, les participants exploraient les mêmes objets, soit proches, soit éloignés d'eux. Ici encore, nous observons des biais systématiques dans la forme perçue qui dépendent de la position en profondeur par rapport à l'observateur. Les changements de distance sont pris en compte par une surcompensation ou une sous-compensation de la distance à l'observateur. Ni les différences entre observateurs pour la constance de l'objet ni la latéralisation perceptive n'ont été documentées pour le toucher. Des caractéristiques différentes de celles des processus visuels apparaissent : pour la plupart des observateurs, les changements de stimulations proximales sont largement invariants aux variations d'hémichamp ou de distance.

Mot-clés

Haptique, Constance de forme, le toucher, invariance

Invariance as an objective measure for distal attribution in touch?

Abstract

When we explore the world with our hands, we are directly aware of the objects we touch, rather than the proximal patterns of stimulation at our fingertips. For instance, when reaching for a coin in your bag, at the moment of contact you are directly aware of the coin, not of the contact mechanics at our fingertips. The ability to recognise the coin is independent of the sensing conditions under which our fingers grasp and recognise the coin. In the current article we explore whether perceived haptic shape is invariant across sensing conditions of hemi-space and object distance from the observer. Using a curvature judgment task we found that perceived shape is not invariant across hemi-space but that there is a strong individual observer bias in perceived shape that is linked to the region of external space that the object inhabits. The bias in perceived shape does not depend on the hand used to explore the shape. This finding suggests that lateralised somatosensory processing overrides shape constancy and is itself dependent on external space rather than somatotopy. In a second task observers explored the same objects either located near or far from them. Here again we observe systematic biases in perceived shape that depend on the objects position in depth relative to the observer. Compensation for changes in sensing depth is accounted for both by over- and under-compensation for object distance

from the observer. Both the individual observer difference in object constancy strategies and perceptual lateralisation have not previously been documented in touch. Different characteristics emerge than has been observed for visual processing where for most observers changes in proximal stimulation are largely invariant under a change in hemifield or depth.

Keywords

Haptics, shape constancy, touch, invariance

1. Attribution distale, toucher et invariance

Lorsque nous nous déplaçons à travers le monde, nous prenons directement conscience des objets autour de nous plutôt que des stimulations proximales qu'ils provoquent chez nos récepteurs. Par exemple, quand nous écrivons sur du papier avec un stylo, nous sommes conscients des mouvements du stylo sur le papier, mais pas des vibrations ressenties au bout des doigts[1]. La capacité à transformer les stimulations locales en coordonnées externes pour maintenir une représentation constante et invariante de l'objet est centrale à ce phénomène appelé attribution distale. Autrement dit, pour ressentir les propriétés de l'objet plutôt que les stimulations proximales, le système nerveux doit maintenir une représentation invariante du stylo malgré les changements d'adhérence sur le papier, les changements de direction du mouvement d'écriture, etc. Nous avons exploré le rôle de l'invariance haptique dans notre capacité à percevoir les propriétés des objets externes plutôt que les stimulations générées par l'interaction avec les objets par le toucher. La manière dont le système nerveux maintient une représentation stable du monde est bien connue pour la vision. Pour le toucher, les processus sont encore peu compris[2]. Notre hypothèse était que le phénomène de constance de la forme est une mesure objective de l'attribution distale en perception tactile.

Considérons l'exemple de la perception visuelle des formes : une pièce nous paraît ronde à la fois quand elle est vue de face ou selon un angle aigu, alors que l'aire projetée par la pièce sur notre rétine est très différente selon ces deux conditions. La stabilité dans l'espace et le temps des propriétés perçues d'un objet est appelée constance ou invariance. En vision, la constance est obtenue en convertissant les signaux rétiniens en coordonnée externes, permettant à l'observateur de percevoir l'espace indépendamment des mouvements de ses yeux[3,4].

Le problème est aussi important en perception haptique pour laquelle les surfaces sensorielles subissent des mouvements encore plus complexes dans l'espace. Il est bien connu que la taille d'un objet perçue de manière haptique est influencée aussi bien par l'extension du bras que par les déformations locales de l'objet[5]. Chaque système sensoriel capable de se déplacer et d'explorer l'environnement est confronté au problème de devoir tenir compte des changements de stimulations proximales qui sont dûs aux mouvements autogènes et de ceux qui ne le sont pas. De plus, pour ressentir les objets dans l'espace externe, les stimulations proximales doivent être converties en coordonnées externes pour que l'objet puisse être représenté indépendamment des perturbations générées par l'observateur. La constance perceptive est souvent considérée comme résultant de contraintes à la fois physiques et physiologiques[6].

En l'absence d'information visuelle, qu'est-ce que l'on ressent quand on déplace son doigt sur la surface d'un objet ? Selon les résultats précédemment obtenus, le simple fait d'explorer un objet de manière haptique nous donne une impression sur l'étendue de l'objet[7], sa forme[8,9], et sa possible utilisation dans les interactions quotidiennes[10]. En fait, un certain nombre d'invariants perceptifs haptiques qui donnent au cerveau les indices spécifiques nécessaires à l'extraction des propriétés matérielles de l'objet exploré ont été identifiés[6]. Dans les expériences présentées ci-dessous, nous nous sommes demandés si l'impression des propriétés de l'objet est dérivée d'un processus d'attribution similaire à celui qui intervient en vision. Et, en outre, si la constance de la forme peut être utilisée comme un test décisif de l'attribution distale en perception tactile. Nous présentons ici des résultats montrant que la constance de la forme dépend de la

modalité utilisée pour extraire les informations de forme et que, pour le toucher, l'invariance au champ perceptif et à la distance dépend de multiples sources d'information et de contraintes physiologiques. Quand nous faisons l'expérience de l'invariance de la forme des objets à travers ces transformations, nous ne ressentons plus les stimulations proximales mais plutôt les propriétés matérielles des objets.

2. Constance haptique de la forme : hémichamp perceptif et distance

En perception tactile, les invariants perceptifs sont régis à la fois par les contraintes mécaniques du bout des doigts et par les contraintes physiques de l'objet exploré. S'il existe une constance haptique de la forme analogue à la constance visuelle, la forme perçue d'un objet doit être invariante aux transformations dans le champ d'exploration (c'est-à-dire, l'hémichamp gauche ou droit) et à la distance.

2.1 Invariance à l'hémichamp et à la ligne médiane du corps

Le bout du doigt humain est extrêmement sensible aux petits changements des propriétés de surface[11,12] et aux différents matériaux [6,13], mais cette sensibilité signifie-t-elle que chaque main apporte au cerveau des informations identiques ou différentes à propos des propriétés spatiales de l'objet telles que la forme, la taille ou la texture ? A partir des travaux antérieurs sur la perception haptique de la forme[6,14], nous avons formulé l'hypothèse que l'information de courbure perçue avec l'index gauche doit être la même que celle perçue avec l'index droit, à l'intérieur des variations dues aux erreurs de mesure. Autrement dit, il devrait y avoir une constance de la forme à travers la ligne médiane du corps (c'est-à-dire, l'hémichamp).

Pour évaluer si la perception haptique des formes est invariante à l'hémichamp et à la distance, nous avons utilisé une méthode simple de comparaison de formes : nous demandions aux participants d'explorer consécutivement deux formes cylindriques de courbures différentes en les effleurant avec l'index. Les participants indiquaient quelle forme était la plus étroite, celle explorée avec l'index droit ou gauche (**Fig. 1a**). Dans cette condition, il ne devrait pas y avoir de différences de stimulations proximales sur le bout des doigts des mains gauche et droite. Par conséquent, si la forme perçue peut être obtenue par l'exploration haptique, la courbure de la forme perçue avec l'index gauche doit être la même que celle perçue avec l'index droit.

En regardant la forme perçue avec l'index gauche versus droit, il n'y avait en moyenne aucune différence (**Fig. 1a**). L'estimation globale des courbures est similaire à celles obtenues précédemment pour des objets de taille similaire, avec une courbure moyenne perçue d'une forme concave de 3,5 m^{-1} pour une exploration à un doigt et de 5,5 m^{-1} pour une exploration à plusieurs doigts. Cependant, la corrélation négative observée entre les biais de forme perçue pour l'index gauche et l'index droit est un résultat complètement inattendu. Contrairement à ce qui était préalablement supposé, les participants qui ressentent un objet comme étroit quand il est exploré avec leur index gauche, ressentent le même objet comme ayant une courbure significativement plus faible quand il est exploré avec leur index droit. Les **Figures 1b et 1c** montrent les fonctions psychométriques de deux participants, démontrant cette relation négative entre les formes perçues par les parties gauche et droite du corps.

En fait, le biais de courbure perçue avec la main gauche peut être utilisé pour prédire la taille et la direction du biais ressenti avec la main droite. En utilisant un modèle linéaire pour comprendre si la courbure perçue avec un index permet de prédire la courbure perçue avec l'autre index, nous démontrons que la perception de la forme n'est pas invariante à l'hémichamp perceptif mais que nous pouvons prédire la quantité et la direction du biais perceptif avec l'index gauche si nous connaissons le biais avec l'index droit, et vice versa.

Un tel effet de biais pourrait bien être le résultat de participants étant simplement peu sûrs de ce qu'ils ressentent. Nous avons évalué si le biais de courbure perçue que nous observons peut être expliqué si nous considérons la quantité de bruit dans l'estimation de courbure de chaque participant. Notre variance d'estimation ne peut pas prédire le biais de courbure perçue. Ces résultats supportent l'idée que le biais n'est pas simplement dû au fait que les participants ont des difficultés pour estimer les courbures de manière

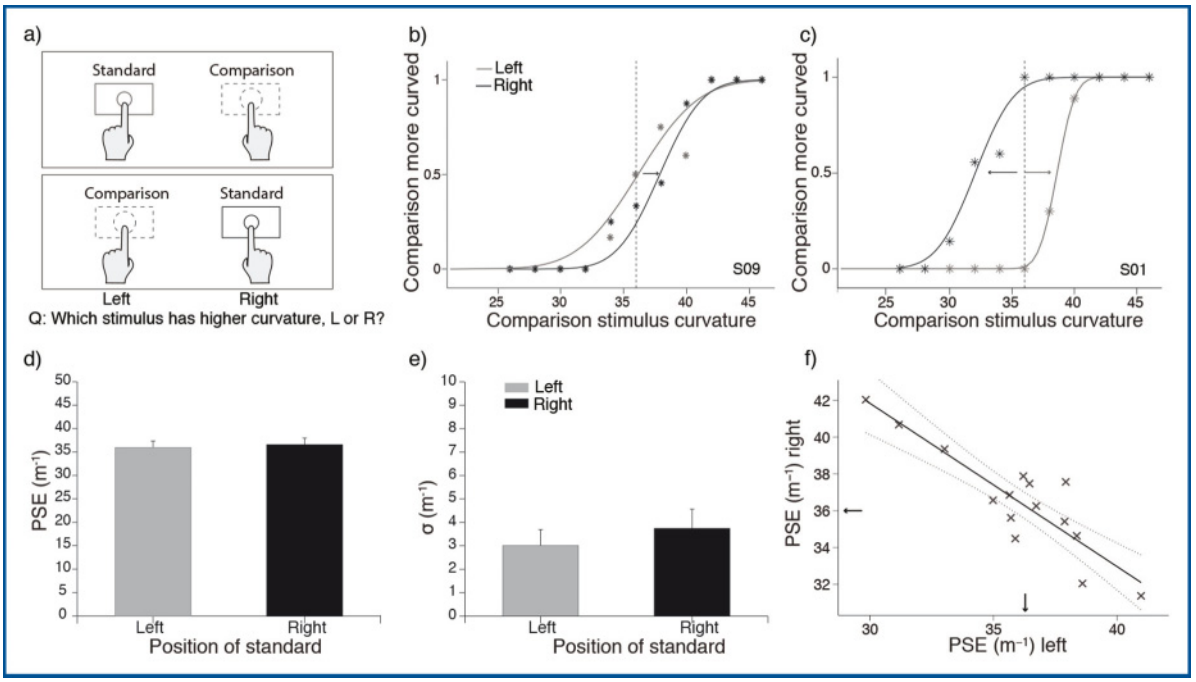


Figure 1 : Dispositif, procédure et résultats pour l'estimation de la courbure d'un cylindre stationnaire rigide avec les mains gauche et droite. **a)** Exemples des essais avec la forme standard à gauche ou à droite pour la procédure de choix forcé à deux alternatives dans laquelle les participants exploraient consécutivement l'objet standard et l'objet à comparer par effleurement avec l'index de chacune des deux mains. Les participants estimaient quel objet, le gauche ou le droit, avait la plus grande courbure. **b)** Exemple de fonction psychométrique d'un participant donnant la proportion d'objets à comparer perçus comme plus courbes que l'objet standard en fonction de la courbure de l'objet à comparer, pour les essais où l'objet standard était à gauche (en gris) et à droite (en noir). **c)** Autre exemple d'un participant montrant un biais plus important dans l'estimation des courbures. **d)** Point d'égalité subjective (PES) moyenné sur l'ensemble des participants pour l'objet standard à gauche (en gris) et à droite (en noir). **e)** Moyenne de la variance sur l'ensemble des participants pour l'objet standard à gauche (en gris) et à droite (en noir). Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance de 95% par rapport à la moyenne. **f)** Le PES à gauche en fonction du PES à droite pour chaque participant. Un modèle d'ajustement linéaire a été appliqué aux valeurs de PSE (ligne noire) avec un intervalle de confiance de 95% de l'ajustement (ligne pointillée grise). Les flèches noires indiquent la courbure de l'objet standard sur chaque axe.

haptique, mais plutôt qu'il y a une variation systématique qui est négativement corrélée entre les deux mains.

Dans ces conditions d'exploration, l'information disponible à l'observateur était la même pour les mains gauche et droite. Les indices kinesthésiques disponibles étaient équivalents pour les mains gauche et droite, étant donné que l'angle d'articulation et l'extension du bras étaient les mêmes pour chaque côté.

2.2 Forme haptique et distance

En perception haptique, il est rare d'avoir un champ perceptif qui reste constant. Les capteurs sensoriels – les doigts – sont souvent radicalement plus petits que l'objet exploré : comme c'est souvent le cas, la courbure du doigt est plus grande que celle de l'objet, où qu'il soit touché. Etant donné que la perception haptique de la taille est connue pour dépendre de l'extension du bras[7], il serait raisonnable de supposer qu'une constance haptique analogue à la constance visuelle pour la distance n'est pas l'option la plus parcimonieuse pour le système nerveux. Une approche plus efficace peut être de re-pondérer l'information proprio-tactile pour expliquer le déplacement. La question est donc comment la déformation locale de la peau au bout du doigt et l'information proprioceptive peuvent être

prises en compte ensemble à travers la distance de l'objet.

Nous avons fait l'hypothèse que le manque d'invariance à l'hémichamp perceptif que nous observons peut disparaître si elle est évaluée à travers des changements de distance. Nous avons donc testé si la forme d'un objet est perçue comme constante à travers différentes distances entre l'objet et l'observateur lorsque l'objet est exploré à l'intérieur du même ou de différents hémichamps. Nous avons supposé ici que les indices cutanés et kinesthésiques joueraient tous les deux un rôle dans la perception de la forme d'un objet et que le changement de dépendance aux indices kinesthésiques pourrait bien induire une perception invariante de la forme.

Le même groupe de participants a fait la même tâche d'estimation de courbure en comparant deux formes consécutivement. Par contre, cette fois, une forme était à la même position que dans la tâche précédente, alors que la seconde forme était positionnée dans l'hémichamp opposée à la position d'extension du bras (**Fig. 2a**). Dans la seconde tâche contrôle, les formes proches et éloignées étaient positionnées à gauche et à droite du participant mais étaient explorées par l'index de la main dominante uniquement. Dans cette position il est possible de dissocier la

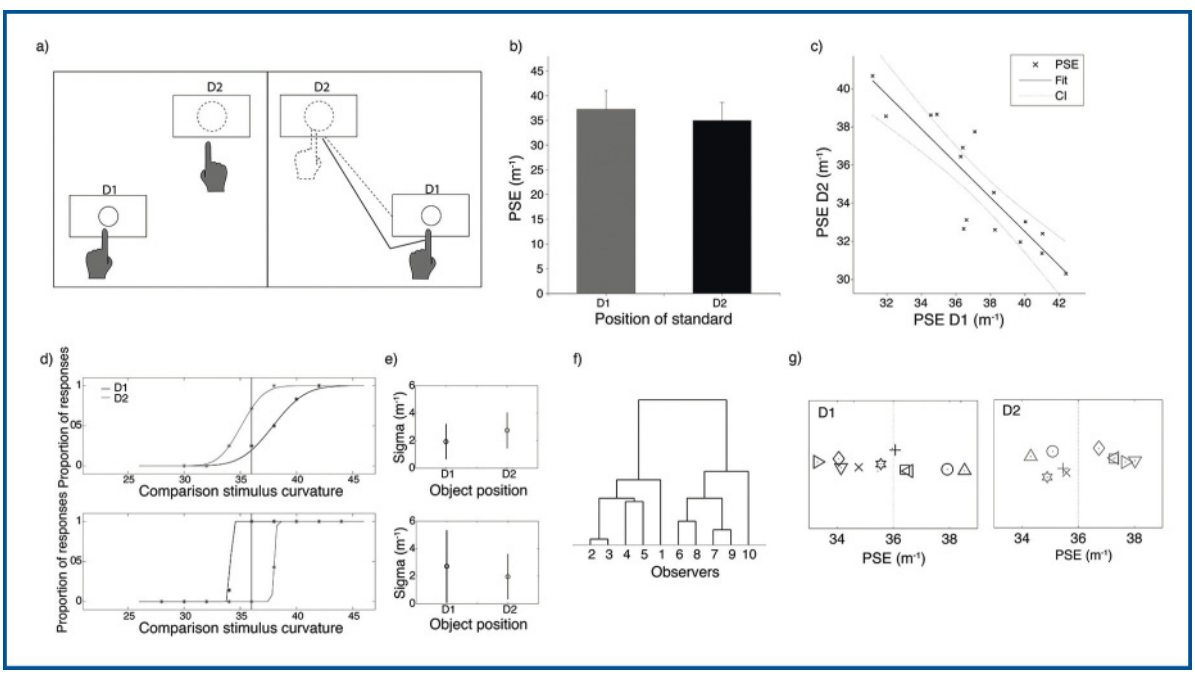


Figure 2 : Représentation schématique de la tâche d'estimation de courbure à travers différentes distances avec une ou deux mains et résultats obtenus. **a)** Description d'un essai de la procédure à choix forcé avec deux alternatives dans lesquelles les participants comparaient la courbure des deux objets, un localisé en D1 et l'autre localisé en D2. La partie de gauche montre la condition d'exploration à deux mains et la partie de droite montre la condition dans laquelle les participants utilisaient l'index de leur main dominante pour explorer les deux objets consécutivement. Ils parcouraient ΔD (la distance entre D1 et D2) en suivant une ligne de ruban adhésif sur le dessus de la table pour les guider vers l'objet à comparer. **b)** PES moyen pour D1 et D2 quand les index gauche et droit étaient tous les deux utilisés. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne. **c)** Diagramme de dispersion de PES D1 et PES D2 avec la droite de régression correspondant au meilleur ajustement des données. **d)** Fonctions psychométriques pour les positions D1 et D2 dans la deuxième tâche contrôle avec l'utilisation de l'index de la main dominante uniquement. Le participant donné en exemple (en haut) perçoit les objets éloignés comme plus étroits alors que l'autre participant donné en exemple (en bas) ressent l'inverse. **e)** La variance de l'estimation pour ces deux participants est donnée pour les positions D1 et D2. **f)** Dendrogramme résultant de l'analyse par regroupement hiérarchique faite sur les différences de distance des PES utilisée pour vérifier les deux groupes observés lors de l'ajustement des données. **g)** Les PES (m^{-1}) pour chaque participant quand l'objet standard était en position D1 et D2.

variance à travers les récepteurs et à travers l'espace pour expliquer les différences entre les index gauche et droit. Les résultats sont présentés dans les **Figures 2b-g**.

Que devient la forme haptique perçue lorsque l'input à l'index gauche ou droit est déplacé ? La **Figure 2b** montre l'estimation de courbure moyennée sur tous les participants pour la forme standard positionnée en D1 et D2. Alors qu'il n'y a pas de différence significative de courbure perçue entre ces deux positions, la corrélation entre les formes perçues avec les index gauche et droit est significative et négative. Ces résultats traduisent l'idée que le système somatosensoriel n'a pas d'accès direct à la forme perçue, étant donné que la perception n'est pas la même avec les mains gauche et droite. L'ajustement des données par un modèle linéaire montre que la relation peut être utilisée pour prédire la forme perçue en D2 quand D1 est connue. La forme de ces résultats ressemble à celle obtenue pour l'estimation de la courbure avec les index gauche et droit quand les deux formes ne sont pas positionnées différemment en profondeur. Finalement, dans cette expérience, nous observons que les participants qui comparaient un objet proche et un objet éloigné avec les mains gauche et droite respectivement avaient moins de variabilité inter-participant et le phénomène de compensation de la distance de perception se trouve être similaire à celui observé en vision (**Fig. 2c**).

2.3 Forme haptique avec l'index de la main dominante déplacé en profondeur

Alors que nous observons clairement une relation négative entre les formes perçues avec les mains gauche et droite, nous ne pouvons pas conclure que cette différence est due à un déplacement spatial de l'autre côté de la ligne médiane du corps ou au fait que les deux index ressentent simplement des formes différentes, suggérant un manque d'invariance au changement de main. Dans une deuxième expérience contrôle, l'index de la main dominante était utilisé pour explorer deux objets positionnés différemment en profondeur (**Fig. 2a**). Deux stratégies différentes de compensation de la différence de profondeur sont apparues. Premièrement, les fonctions psychométriques d'un exemple de participant du premier groupe de participants identifié grâce à l'analyse par regroupement sont montrées dans la partie haute de la **Figure 2d**. La proportion d'essais dans lesquels l'objet à comparer était jugé comme ayant une plus grande courbure que l'objet standard est représentée en fonction de la courbure de l'objet à comparer. Pour ce participant, les fonctions psychométriques sont déplacées vers des valeurs de courbure plus grandes pour l'objet proche (D1, en noir) et vers des valeurs de courbure plus petites pour l'objet éloigné (D2, en gris). Les objets éloignés doivent donc avoir une courbure plus petite pour être perçus comme identiques à l'objet standard le plus proche. Ces résultats sont consistants avec les prédictions de constance visuelle de la forme[2–4]. Deuxièmement, un autre exemple de participant du second groupe de participants identifié est montré dans la partie basse de la **Figure 2d**. Le pattern de réponse est inversé par rapport au premier groupe : pour ressentir l'objet proche et l'objet éloigné comme étant également courbés, l'objet proche doit avoir une courbure plus petite et l'objet éloigné une courbure plus grande. Les changements de courbure perçus avec le déplacement en profondeur de la forme (**Fig. 2d**, partie basse) ne sont pas compatibles avec la constance visuelle de la forme. Une seconde observation des données des deux groupes montre qu'il n'y a pas de réelle différence de variance associée aux pentes des courbes d'ajustement (**Fig. 2e**). La différence entre les deux groupes ne peut donc être expliquée par la variance de leurs formes d'estimation.

Les **Figures 2e et 2f** montrent l'estimation de courbure perçue pour chaque participant quand l'objet standard était proche (D1) et quand il était éloigné (D2). Les participants peuvent être classés en deux catégories : ceux pour qui l'estimation haptique des formes avec différentes distances est compatible avec un processus de compensation de type visuel (c'est-à-dire les formes proches doivent avoir une courbure plus petite pour être perçues comme la même forme que l'objet standard en D2) et ceux pour qui la réponse est inversée.

3. Implications pour l'invariance haptique et pour le déplacement spatial

Dans ces études, nous avons observé le curieux phénomène que les formes ressenties avec chaque index ne sont pas les mêmes alors qu'elles

proviennent de l'exploration du même objet, avec la même stratégie d'exploration. En fait, les deux formes ressenties sont inversement corrélées : si l'index gauche ressent un objet comme fortement courbé, l'index droit va le ressentir comme large et plat. Nos résultats montrent que nous n'avons pas réellement accès à la forme de l'objet par l'exploration haptique car pour une forme concave, ce que l'on ressent avec nos mains gauche et droite est différent. De plus, la perception haptique des formes n'est pas invariante à la distance et n'est pas identique pour chaque observateur. Elle a tendance à être modulée par les deux facteurs, résultant potentiellement de pondérations différentes des indices cutanés et proprioceptifs dérivés du déplacement de l'objet.

De plus, nous avons montré que la perception haptique des formes dépend de la distance de l'objet perçu par rapport à l'observateur. La nature exacte de cette dépendance est compliquée, étant donné que les données supportent deux stratégies de compensation opposées. Ce n'est pas si surprenant quand on considère que la surface disponible de l'objet pour le bout du doigt est plus large que le récepteur lui-même. Contrairement au processus visuel, il y a donc de multiples sources d'information qui peuvent intervenir pour expliquer le déplacement. Nos données montrent deux formes distinctes de compensation de la distance, ce qui pourrait être le résultat d'une pondération de différentiel des deux indices par les différents groupes d'observateurs.

Nous suggérons que la courbure perçue de manière haptique à travers différentes distances dépend des différentes pondérations des multiples indices disponibles par l'observateur. Une façon différente de voir les choses est de considérer que l'observateur n'a pas d'accès haptique à la forme en soi mais plutôt aux indices proprioceptifs et tactiles, qui, combinés, produisent une expérience de forme tactile. Cependant, les différences de stratégies peuvent être expliquées par différentes dépendances aux indices.

Quand nous nous déplaçons dans l'espace, il paraît sensé que notre système nerveux corrige les petites perturbations dans nos stimulations proximales induites par nos mouvements. L'invariance perceptive en résulterait.

Nous avons évalué si le sens du toucher est invariant, malgré le codage passif des informations entrantes.

4. Conclusion générale – mécanismes

Dans l'ensemble des études présentées, nous avons souligné les différences entre l'invariance visuelle et l'invariance tactile pour différents types de transformation : (hémi)champ récepteur et distance. Les résultats de ces études apportent une démonstration claire de la variabilité de l'invariance potentielle en perception tactile. C'est en fort contraste avec les transformations similaires en perception visuelle, où les transformations interviennent d'une manière systématique. En fait, cela suggère que le type de contraintes qui opèrent pour un système sensoriel donné provient plus du système lui-même que de l'environnement dans lequel il perçoit[15].

Quand nous explorons le monde, nos actions ont des conséquences sur les patterns de stimulations que reçoivent nos récepteurs. En vision, les changements de stimulations proximales sont corrigés par un degré d'invariance aux changements de point de vue, d'angle de vue et de distance[16]. Quand nous explorons le monde à travers le sens du toucher, les compensations des distorsions des stimulations proximales ne montrent aucune ressemblance avec ce qui est observé pour la vision : la forme perçue n'est pas invariante à l'hémichamp perceptif et ceci peut être dû au fait que l'information somatosensorielle est fortement latéralisée et, d'ailleurs, n'a pas tendance à traverser la ligne médiane. La forme perçue de manière haptique n'est pas non plus systématiquement invariante à la distance mais dépend de la pondération de chaque observateur, des distorsions cutanées et des informations kinesthésiques. Les différences ici ont un sens en termes de fonction plénhaptique et des multiples degrés de liberté apportés par le système et le nombre de dimensions qu'il peut percevoir.

Dans une nouvelle exploration des différences entre les effets de points de vue visuels et haptiques, Newell et al.[17] ont utilisé des formes nouvelles pour quantifier les différences et les limitations de chaque système pour les mêmes objets. Ils ont trouvé que les points de vue préférentiels pour la vision correspondent à l'exploration et la reconnaissance des objets par devant, alors que pour le toucher, explorer et reconnaître les objets par derrière produit les meilleurs taux de

reconnaissance. Ces résultats, couplés à nos résultats sur la perception haptique des formes, suggèrent que le cerveau corrige les changements d'angle de vue et de distance différemment pour l'information visuelle et somatosensorielle.

Ainsi, lorsque nous faisons courir nos doigts sur une surface, ou lorsque nous écrivons avec un stylo, nous n'avons pas directement conscience des stimulations proximales produites et nous ne contrôlons pas autant ces changements, et de manière aussi systématique, qu'en vision. Ceci a des implications pour le type de codes utilisés pour traduire l'information visuelle en information tactile avec différents dispositifs d'augmentation sensorielle.

Remerciements

J'aimerais remercier la Fondation Fyssen d'avoir soutenu mes efforts de recherche. Sans oublier le Docteur Auvray qui m'a accueillie au sein de son laboratoire et m'a aidée tout du long à développer mes idées. Enfin j'aimerais remercier le Docteur Gabriel Arnold qui m'a permis de traduire le résultat de mon travail en français.

Références et Bibliographie

• 1. Hayward, V. A brief taxonomy of tactile illusions and demonstrations that can be done in a hardware store. *Brain Res. Bull.* **75,** 742–752 (2008).

• 2. Glennerster, A., Tcheang, L., Gilson, S. J., Fitzgibbon, A. W. & Parker, A. J. Humans Ignore Motion and Stereo Cues in Favor of a Fictional Stable World. *Curr. Biol.* **16,** 428–432 (2006).

• 3. Epstein, W. Stability and Constancy in Visual Perception : Mechanisms and Processes. (1977). at < http://eric.ed.gov/?id=ED153183 >

• 4. Gregory, R. L. Distortion of Visual Space as Inappropriate Constancy Scaling. *Nature* **199,** 678–680 (1963).

• 5. Voisin, J., Benoit, G. & Chapman, C. E. Haptic discrimination of object shape in humans : two-dimensional angle discrimination. *Exp. Brain Res.* **145,** 239–250 (2002).

• 6. Hayward, V. in *Human haptic perception: Basics and applications* 381–392 (Springer, 2008). at < http ://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7643-7612-3_31 >

• 7. Hanley, C. & Goff, D. P. Size constancy in extended haptic space. *Percept. Psychophys.* **15,** 97–100 (1974).

• 8. Sanders, A. F. J. & Kappers, A. M. L. Bimanual curvature discrimination of hand-sized surfaces placed at different positions. *Percept. Psychophys.* **68,** 1094–1106 (2006).

• 9. Sanders, A. F. J. & Kappers, A. M. L. A kinematic cue for active haptic shape perception. *Brain Res.* **1267,** 25–36 (2009).

• 10. Turvey, M. T., Shockley, K. & Carello, C. Affordance, proper function, and the physical basis of perceived heaviness. *Cognition* **73,** B17–B26 (1999).

• 11. Smith, A. M. *et al.* Roughness of simulated surfaces examined with a haptic tool: effects of spatial period, friction, and resistance amplitude. *Exp. Brain Res.* **202,** 33–43 (2009).

• 12. Yoshioka, T., Bensmaïa, S. J., Craig, J. C. & Hsiao, S. S. Texture perception through direct and indirect touch: An analysis of perceptual space for tactile textures in two modes of exploration. *Somatosens. Mot. Res.* **24,** 53–70 (2007).

• 13. Klatzky, R. L., Lederman, S. J. & Reed, C. There's more to touch than meets the eye: The salience of object attributes for haptics with and without vision. *J. Exp. Psychol. Gen.* **116,** 356–369 (1987).

• 14. Dostmohamed, H. & Hayward, V. Trajectory of contact region on the fingerpad gives the illusion of haptic shape. *Exp. Brain Res.* **164,** 387–394 (2005).

• 15. Hayward, V. Is there a 'plenhaptic' function? *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **366,** 3115–3122 (2011).

• 16. Barlow, H. B. in *Sensory Communication* 217–34 (MIT Press, 1961).

• 17. Newell, F. N., Ernst, M. O., Tjan, B. S. & Bülthoff, H. H. Viewpoint Dependence in Visual and Haptic Object Recognition. *Psychol. Sci.* **12,** 37–42 (2001).

1. Distal attribution, touch and invariance

When we move through the world we are directly aware of the objects around us, not the proximal stimulation they provide to our receptors. For instance, when writing with a pen on paper, we are directly aware of the pen moving across the surface of the paper, not of the vibrations at our fingertips[1]. This phenomenon is known as distal attribution, and central to this ability is our ability to transform local patterns into external coordinates, to maintain an invariant, constant representation of the object. That is, to experience the object properties, rather than the proximal patterns of stimulation, requires the nervous system to maintain an invariant representation despite changes in grip on the pen, direction of motion, etc. We explored the role of haptic invariance in our ability to experience external object properties, rather than the stimulation patterns generated through interacting with these objects though touch. In vision much is known about how our nervous system maintains a stable representation of the world[2]. In touch the exact process remains not well understood. Here I propose that constancy is an objective measure for distal attribution in touch.

Consider the example of visual shape perception: a coin looks round both when viewed head on and when viewed from an acute angle, even though the area projected by the coin onto our retinae under these two conditions is very different. The stability of the perceived properties of an object over space and time is called constancy or invariance. In vision, constancy can be achieved by converting retinal signals into external coordinates, allowing the observer to perceive space independently of his or her own eye movements[3,4].

The problem is as important in haptic perception, where sensory surfaces undergo even more complex movements in space. It is known that an object's perceived haptic size is influenced by the extent of the arm, as well as local deformation of the probe[5]. Any sensory system with the ability to move and explore the environment faces the problem of accounting for changes in proximal patterns of stimulation that are due to self-generated movement, and those that are not. Moreover, in order to experience objects in external space, these proximal patterns need to be converted into external coordinates such that the object can be represented independently of the observer-generated perturbations. Perceptual constancies have often been suggested to arise from both physical and physiological constraints[6].

In the absence of visual information, what do you experience when you run a finger along an object's surface? According to previous findings, the simple act of haptically exploring an object provides you with an impression of the explored object's extent[7], it's shape[8,9] and it's potential use in daily interactions[10]. In fact, a number of haptic perceptual shape invariants have been identified that provide the brain with specific cues about the material properties of the object being explored[6]. In the experiments reported here addressed the question of whether the impression of object properties is derived from a similar attribution process as occurs for vision. And furthermore, whether constancy can then be used as a litmus test for distal attribution in touch. Here, we present evidence that shape constancy depends on the modality used to extract the shape information, and that, for touch, invariance across field of view and distance is dependent on multiple sources of information and physiological constraints. When we experience invariance of object shape across these transformations, we are no longer experiencing proximal patterns, but rather the material properties of objects.

2. Haptic shape constancy: hemifield of view and distance

In touch, perceptual invariants are governed by both mechanical constraints of the fingertip and the physical constraints governing the explored object. If there is observable shape constancy in touch analogous to visual constancy, then the apparent perceived shape of an object should be invariant across transformations in field of exploration, i.e. the left or right hemi-field and distance.

2.1 Invariance across hemi-field and body midline

The human fingertip is exquisitely sensitive to perceiving small changes in surface properties[11,12] and different materials[6,13], but does this sensitivity mean that each hand provides the brain with different or identical information about an object's spatial properties such as shape, size, or texture? From previous work on haptic shape[6,14], we hypothesised that curvature

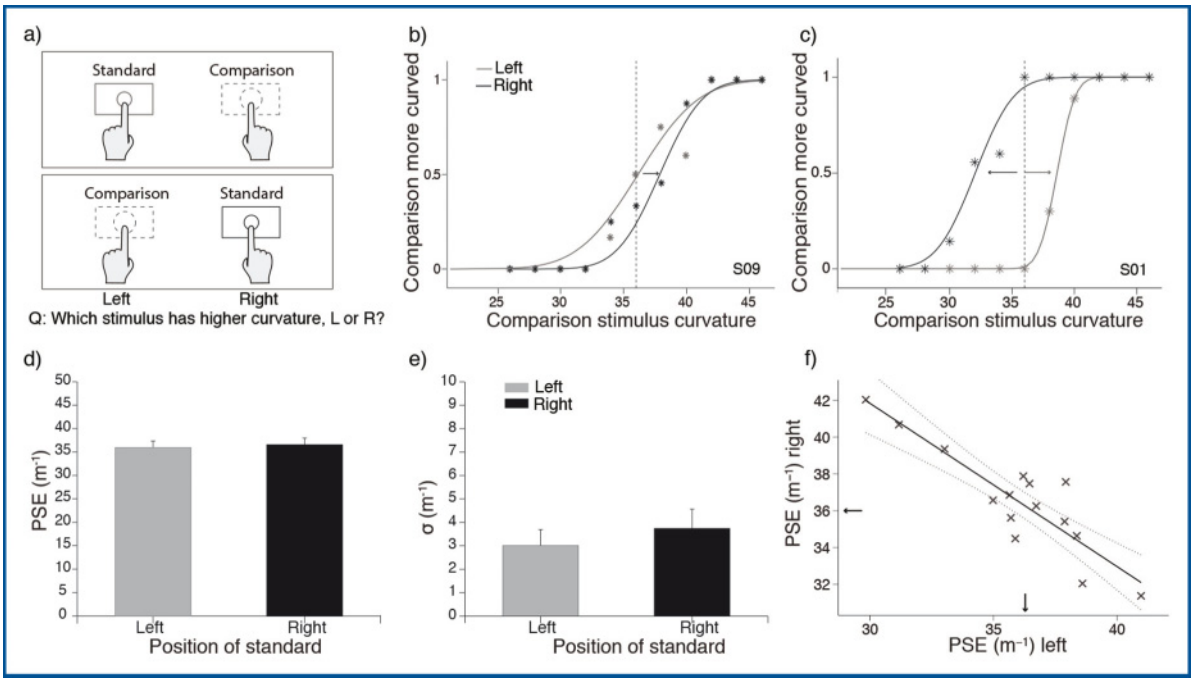


Figure 1: Setup, procedure and results for estimating curvature of the rigid stationary cylinders at the left and right hands. **a)** Example standard left and standard right trials for the 2AFC procedure in which observers consecutively bare-finger scanned the standard and comparison objects which were presented one to either hand with the corresponding index finger. Observers estimated which shape, the left or right, had the highest curvature. **b)** Example observer's psychometric function fits for the proportion of comparison shapes perceived as more curved than the standard as a function of comparison stimulus curvature, for trials when the standard was on the left (black) and the right (grey). **c)** Second example observer showing larger bias in curvature estimates. **d)** Average PSE estimates across all observers for trials when the standard was at the left hand (black) and at the right hand (grey). **e)** Mean variance estimates across observers for trials when the standard was to the left (grey) or right (black) of the observer midline. Error bars represent the 95% confidence intervals of the mean. **f)** PSE left as a function of PSE right estimates for each observer. A linear model was fit to the PSE data (black line) with the 95% confidence intervals of the fit shown in the grey dotted lines. Black arrows indicate the standard object curvature on both axes.

information at the left index finger should be the same as curvature information at the right finger, within the range of the measurement noise. That is, there should be shape constancy across the body midline, i.e. hemifield.

To test whether haptic shape perception is invariant across hemifield and distance we used a simple shape comparison method: we asked observers to scan two cylindrical shapes of different curvatures consecutively using bare-index finger contact. Observers indicated which shape felt narrower, i.e. which had higher curvature, the shape explored by the right or the left index finger (**Fig. 1a**, left panel). In this condition there should be no differences in the proximal patterns on the fingertip of the left or the right hand (**Fig. 1a**). Therefore, if perceived shape can be obtained through haptic exploration, the curvature of the shape at the left should be the same as the perceived curvature at the right index finger.

When we looked at the perceived shape for the left versus the right index finger we saw, on average, no difference (**Fig. 1a**). The overall curvature estimates are similar to those obtained by previous researchers for similarly sized objects, with an average perceived curvature of a concave shape of $3.5m^{-1}$ for single finger exploration and $5.5m^{-1}$ for multi-finger exploration. However, what is completely unexpected given previous results is the observed negative correlation in the bias in perceived shape between the left and right index finger. Contrary to what has previously been assumed observers who experience objects as narrow when explored by their

left index finger, experience the same objects as having significantly lower curvature when explored by their right index finger. **Figure 1b** shows two example observers' psychometric function fits demonstrating this negative relationship between perceived shape at the left and right sides of the body.

In fact, the bias in perceived curvature at the left hand can be used to predict the size and direction of bias experienced by the right hand. Using a first-order regression model to understand whether perceived curvature at one fingertip can predict perceived curvature at the other we demonstrate that shape is not invariant across the hemifields, but that we can predict the amount and direction of the bias at the left index finger if we know the bias at the right, or vice versa.

Such a bias effect could well be the result of observers simply being unsure about what they feel. We tested whether the bias in perceived curvature that we observed, could be accounted for if we consider how noisy each observer's curvature estimation was. Our variance estimate cannot predict the bias in perceived curvature. These findings support the idea that the bias is not simply due to observers being bad at estimating haptic curvature, but rather that there is a systematic deviation that is negatively related across the hands. Under these conditions of exploration, the patterns of information available to the observer were the same at the left and right hands. The available kinaesthetic cues available at the left and right side were equivalent, given that joint angle and arm extent did not differ for either side.

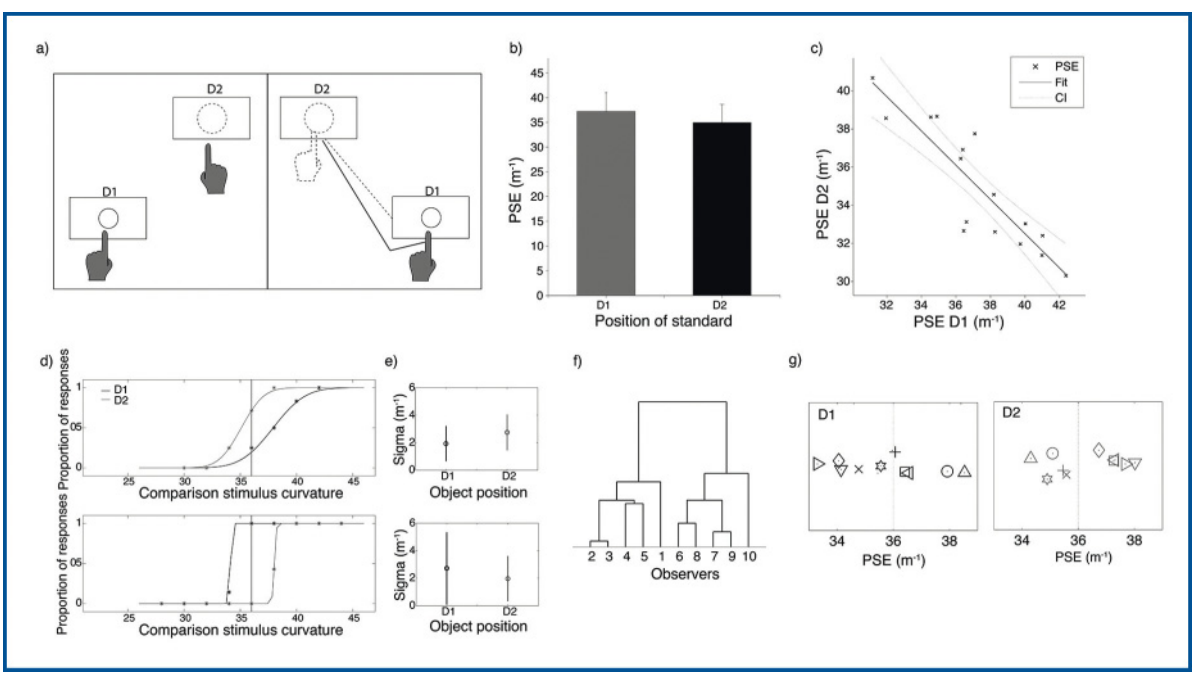


Figure 2: Schematic representation of the curvature estimation task across distance and results. **a)** Single trial for the 2AFC procedure in which observers compared the curvature of two objects, one located at D1 and the second positioned at D2. The left panel represents the two hand condition and the right panel shows the condition in which observers used their dominant index finger to exploration the two shapes consecutively. They traversed ΔD (the distance between D2-D1) by following a line of tape on the tabletop to guide them to the comparison object. **b)** Mean PSE estimates for D1 and D2 when both left and right index fingers were used. The error bars represent the standard error of the mean. **c)** The scatterplot of PSE D1 & PSE D2 with the regression line of best fit to the data. **d)** Psychometric function fits for D1 and D2 positions for the second control task using the dominant index finger only. The example observer (top panel) perceives further objects as narrower while the other example observer experiences the reverse (bottom panel). **e)** The variance estimates from the fits for the two example observers are given for D1 and D2. **f)** Dendrogram resulting from the hierarchical cluster analysis done on delta distance PSE used to verify the 2 groups observed during data fitting. **g)** The PSE (m^{-1}) for each individual observer when the standard stimulus was e) at position and at D2.

2.2 Haptic shape across distance

In haptics it is unusual to have a field of view that remains constant. The sensor, your finger, is often dramatically smaller than the explored object: as is commonly the case, the curvature of the finger is larger than that of the object, wherever it is touched. Given perceived haptic size is known to depend on the extension of the arm[7], it may be reasonable to assume that an haptic analogue to visual constancy across distance is not the most parsimonious option available to the nervous system. Maybe a more efficient approach is to reweight the proprio-tactile information to account for the displacement. The question is therefore how local skin deformation at the fingertip and proprioceptive information will work together across object distance.

We hypothesised that the lack of invariance across hemifield that we observe may disappear when tested across changes in distance. We therefore tested whether an object's shape is perceived as constant across distance from the observer when explored within the same or across different hemifields. Here we assumed that both cutaneous and kinaesthetic cues would play a role in determining object shape and the change in dependence on kinaesthetic cues might well produce invariance in perceived shape.

The same group of observers did the same curvature estimation task comparing two shapes consecutively. Only this time, one shape was at the same position as in the previous task, while the second was positioned at the arms extent and in opposite hemifields (**Fig. 2a**, left panel). In the second control the near and far shapes were positioned to the left and right of the observer, but were scanned by the dominant index finger only. In this condition it is possible to decouple variance across sensors or across space to account for difference at the left vs. the right index finger. The results are clear as seen in **Figure 2 d-g**.

What happens to perceived haptic shape when the input at the left or right index finger is displaced? **Figure 2b** shows average curvature estimates across observers for the standard shape when positioned at D1 and D2. While there is no significant difference between perceived curvature at these two positions, the correlation between perceived shape at the left index finger versus at the right index finger is negative and significant. These results support the idea that the somatosensory system does not have direct access to object shape, given that the perception at the left and right hand is not the same thing. The linear model fit to the data shows that the relationship can be used to predict perceived shape at D2 when D1 is known. This pattern of results mimics that obtained for the left and right index finger curvature estimates when both shapes were not displaced in depth. Finally for this experiment we observe that for observers who compared a near and far object with the left and right hand respectively showed less of the inter-subject variability and demonstrated a similar pattern of compensation for viewing distance as observed with vision (**Fig. 2c**).

2.3 Haptic shape at the dominant index finger displaced in depth

Although we observe a clear negative relationship between the perceived shape at the left and right hand, it is not clear whether this difference is due to spatial displacement across the body midline or whether the two index fingers simply experience different shape percepts, suggesting a lack of invariance across hands. In a second control experiment, the dominant index finger was used to explore two objects displaced in depth (**Fig. 2a**). Two different strategies of compensation for displacement emerged: the psychometric functions of an example observer from the first group of observers identified via the cluster analysis are shown in the top panel of **Figure 2 d**. The proportion of trials in which the comparison stimulus was judged as having higher curvature than the standard is plotted as a function of comparison curvature. For this observer the psychometric functions are shifted toward higher curvature values for the near condition (D1 in black) and toward lower curvature values for the far object (D2) condition (in grey). Thus, for this observer to experience the same object size at the two distances, objects further away need to have lower curvature to be perceived as equal to the closer standard. The pattern is consistent with visual shape constancy predictions[2–4]. The second example observer (from the second group identified) is shown in **Figure 2 d**, lower panel. Here the response pattern is reversed: to experience the near and far objects as equally curved, the close object needs to have lower curvature and the far object, higher curvature to be perceptually equal.

The perceived curvature shifts for displacement in depth of the shape in 2d) –lower panel– are inconsistent with the expectation of shape constancy from vision. A second observation of the data in the two groups is that there is no real difference in the variance associated with the slopes of the fits **Figure 2e**. Therefore the difference between the two groups cannot be accounted for by the variance in their estimation patterns.

Figures 2 e & f show the perceived curvature estimates for each observer when the standard was at closer (D1) and when it was at the further position (D2). The observers fall into two categories: Those whose haptic shape estimates across distance were consistent with visual-like compensation (i.e. closer shapes needed to have lower curvature to be perceived as the same shape as the standard at D2); and those for whom this pattern was reversed.

3. Implications for haptic invariance and spatial displacement

In these studies, we observed that the shape experienced at each index finger is not the same, despite being derived from exploration of the same object, while using the same exploration strategy. In fact the two are inversely related, i.e., if your left index finger experiences an object as highly curved your right hand will perceive it as relatively broad and flat. Our results show that we do not really have access to an object's shape through haptics because for a concave shape, what you experience at your left and right hand are two different objects. Moreover, haptic shape perception is not invariant across distance or observer, but tends to be modulated by both factors, potentially resulting from differential weighting of cutaneous and proprioceptive cues derived from object displacement.

Furthermore we have shown that perceived haptic shape depends on the sensed object's distance from the observer. The exact nature of the dependence is complicated given that the data support two opposite compensation strategies. This may not be so surprising when we consider that the object surface available to the fingertip is larger than the sensor itself. Therefore, unlike in visual processing, there are multiple sources of information that can weigh in to account for the displacement. Our data show two distinct compensation patterns for displacement in depth, which could be the result of a differential weighting of the two cues by the different groups.

We suggest that perceived haptic curvature across distance depends on observers' differential weighting of the multiple available cues. An alternative way of looking at this is that observers do not have haptic access to shape itself but rather to the proprioceptive and tactile cues, which, combined produce our experience of haptic form. However, the difference in observer strategies can be accounted for by different cue dependencies.

When we move through space, it makes sense that our nervous system corrects for the small perturbations in proximal patterns of stimulation introduced by our movement. In turn this may result in perceptual invariance.

We addressed the question of whether the mind's viewpoint on touch is invariant, despite passive encoding of the incoming information.

4. General conclusion – mechanisms

In the set of studies reported here we highlight the differences between invariance for vision and touch for a number of different transformations: (hemi)field of view and distance. The outcome of these studies provides a clear demonstration of the variability in the potential invariance in touch. This is in stark contrast to similar transformations in visual information processing, where the transformations occur in a systematic fashion. In fact, it suggests that the kind of constraints that operate for a sensory system are constrained more by the system itself than by the environment in which it senses[15].

When we explore the world, our actions have consequences for the patterns of stimulation we receive at our receptors. In vision, the changes in the proximal patterns are corrected for by a degree of invariance across changes in viewpoint, viewing angle and distance[16]. When we explore the world through our sense of touch, compensation for distortions in proximal patterns of stimulation do not bare any resemble to that observed for vision: Perceived shape is not invariant across hemifield and this may be due to the fact that somatosensory information is highly lateralised and, indeed does not tend to cross the body midline. Perceived haptic shape is also not systematically invariant across distance, but depends on individual observer cue weightings

for cutaneous distortions and kinaesthetic information. The differences here make sense in terms of the plenhaptic function and the multiple degrees of freedom provided by the system and the number of dimensions it can sense.

In a novel exploration of differences in visual and haptic viewpoint, Newell et al.,[17] used novel shapes to quantify the differences and limitations of each system for the same objects. They found that the preferred viewpoint for vision was when exploring and recognising objects from a frontal plane perspective, while for touch, exploring the back of the object gave highest recognition rates. These findings, coupled with our findings on shape haptic shape perception, suggest that the brain corrects for changes in viewing angle and distance differently for visual information and somatosensory inputs.

Therefore, although when we run our fingers along a surface, or write with a pen, we are not directly aware of the proximal patterns of stimulation they provide, we do not control for changes in these proximal patterns to the same extent, and as systematically as observed for vision. This has implications for the type of codes used to translate visual cues into tactile information with different sensory augmentation devices.

Acknowledgments

I would like to thank the Fyssen Foundation for supporting my research endeavours. I would also like to thank Dr. Auvray for welcoming me into her laboratory and supporting the development of my ideas, and finally, Dr. Gabriel Arnold for translating my work into French.

References and Bibliography

- 1. Hayward, V. A brief taxonomy of tactile illusions and demonstrations that can be done in a hardware store. *Brain Res. Bull.* **75,** 742–752 (2008).
- 2. Glennerster, A., Tcheang, L., Gilson, S. J., Fitzgibbon, A. W. & Parker, A. J. Humans Ignore Motion and Stereo Cues in Favor of a Fictional Stable World. *Curr. Biol.* **16,** 428–432 (2006).
- 3. Epstein, W. Stability and Constancy in Visual Perception : Mechanisms and Processes. (1977). at < http://eric.ed.gov/?id=ED153183 >
- 4. Gregory, R. L. Distortion of Visual Space as Inappropriate Constancy Scaling. *Nature* **199,** 678–680 (1963).
- 5. Voisin, J., Benoit, G. & Chapman, C. E. Haptic discrimination of object shape in humans : two-dimensional angle discrimination. *Exp. Brain Res.* **145,** 239–250 (2002).
- 6. Hayward, V. in *Human haptic perception: Basics and applications* 381–392 (Springer, 2008). at < http ://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7643-7612-3_31 >
- 7. Hanley, C. & Goff, D. P. Size constancy in extended haptic space. *Percept. Psychophys.* **15,** 97–100 (1974).
- 8. Sanders, A. F. J. & Kappers, A. M. L. Bimanual curvature discrimination of hand-sized surfaces placed at different positions. *Percept. Psychophys.* **68,** 1094–1106 (2006).
- 9. Sanders, A. F. J. & Kappers, A. M. L. A kinematic cue for active haptic shape perception. *Brain Res.* **1267,** 25–36 (2009).
- 10. Turvey, M. T., Shockley, K. & Carello, C. Affordance, proper function, and the physical basis of perceived heaviness. *Cognition* **73,** B17–B26 (1999).
- 11. Smith, A. M. *et al.* Roughness of simulated surfaces examined with a haptic tool: effects of spatial period, friction, and resistance amplitude. *Exp. Brain Res.* **202,** 33–43 (2009).
- 12. Yoshioka, T., Bensmaïa, S. J., Craig, J. C. & Hsiao, S. S. Texture perception through direct and indirect touch: An analysis of perceptual space for tactile textures in two modes of exploration. *Somatosens. Mot. Res.* **24,** 53–70 (2007).
- 13. Klatzky, R. L., Lederman, S. J. & Reed, C. There's more to touch than meets the eye: The salience of object attributes for haptics with and without vision. *J. Exp. Psychol. Gen.* **116,** 356–369 (1987).
- 14. Dostmohamed, H. & Hayward, V. Trajectory of contact region on the fingerpad gives the illusion of haptic shape. *Exp. Brain Res.* **164,** 387–394 (2005).
- 15. Hayward, V. Is there a 'plenhaptic' function? *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **366,** 3115–3122 (2011).
- 16. Barlow, H. B. in *Sensory Communication* 217–34 (MIT Press, 1961).
- 17. Newell, F. N., Ernst, M. O., Tjan, B. S. & Bülthoff, H. H. Viewpoint Dependence in Visual and Haptic Object Recognition. *Psychol. Sci.* **12,** 37–42 (2001).

Rôle de l'habenula latérale dans les symptômes d'abstinence à la cocaïne

Frank Julius MEYE

Chercheur postdoctoral INSERM UMR S 839 Institut du Fer à Moulin, Paris, France

Résumé

L'arrêt de la consommation de drogues entraine chez l'individu une variété de symptômes négatifs qui participent à la rechute de prise de drogues. Afin de prévenir cette rechute, il est important de comprendre quelles modifications dans le cerveau sous-tendent les symptômes de manque. Dans cette étude réalisée chez la souris, nous nous sommes intéressés au rôle joué par une structure cérébrale nommée l'Habenula Latérale (LHb) dans la période d'abstinence à la cocaïne. Plus précisément, nous avons étudié comment la prise de cocaïne modifie les connexions entre la LHb et d'autres structures qui lui sont liées : le noyau entopedunculaire (EPN ; Structure qui envoie des axones à la LHb), et le noyau tegmental rostro-medial (RMTG ; structure qui reçoit des axones de la LHb). Nous avons mis en évidence des changements dans la communication entre ces structures pendant la période d'abstinence à la cocaïne. De plus, nous avons établi un lien fonctionnel entre ces changements cérébraux et les symptômes négatifs durant l'abstinence. Ces résultats éclaircissent la façon dont l'abstinence est encodée par le cerveau et pourrait ouvrir la voie à de nouvelles cibles thérapeutiques pour lutter contre la rechute.

Mots-clés

Cocaïne, Addiction, Abstinence, Habenula laterale, électrophysiologie, optogénétique

The role of the lateral habenula in cocaine withdrawal symptoms

Abstract

Withdrawal from drug intake causes the user to feel a wide range of negative symptoms, which may trigger renewed drug taking. To prevent such relapse, it is important to know which changes in the brain underlie the withdrawal symptoms. In this study we have looked in mice at how a brain region called 'lateral habenula' (LHb) plays a role in cocaine withdrawal. Specifically, we investigated how cocaine experience changes connections between the LHb and regions it is in direct contact with: the entopeduncular nucleus (EPN; an input structure), and the rostromedial tegmental nucleus (RMTg; a target output structure). We found changes in the communication between these regions after abstinence from cocaine. We link these brain changes to negative feelings during drug withdrawal. These findings contribute to insight in how drug withdrawal is coded in the brain, and may provide therapeutic targets to help prevent drug relapse.

Keywords

Cocaine, addiction, withdrawal, lateral habenula, electrophysiology, optogenetics

Introduction

La dépendance présente plusieurs stades. Dans un premier temps, la prise de drogue est associée aux effets positifs qu'elle procure (renforcement positif). Au contraire, dans les étapes ultérieures, les drogues sont de plus en plus consommées dans le but de soulager les symptômes de sevrage négatifs (renforcement négatif)

(Koob et al., 2008). Les régions du cerveau qui permettent le renforcement positif sont fortement étudiées. En revanche, les régions du cerveau impliquées dans le renforcement négatif sont moins connues mais non moins importantes de par leur implication dans le risque de rechute (Koob et al., 2008).

Une région cible pour ces effets est l'habenula latérale (LHb). En effet, cette structure a été récemment impliquée dans le codage des états émotionnels négatifs. Elle est hyperactive chez les patients déprimés, et dans des modèles rongeurs de dépression (Lecca et al., 2014). De plus, l'hyperactivité de la LHb a également été décrite au cours de la période d'abstinence de drogues telle que la cocaïne (Jhou et al., 2013 ; Maroteaux & Mameli, 2012).

Ces résultats suggèrent : (i) un lien entre l'activité de l'habenula latérale et les effets négatifs, ainsi qu' (ii) une augmentation de l'activité de l'habenula latérale après l'utilisation de drogues. Ainsi, nous avons suggéré que les symptômes de sevrage sont codés par l'hyperactivité de l'habénula latérale et pour tester cette hypothèse durant cette étude nous avons abordé les points suivants :

i. Comment l'hyperactivité de la LHb modifie-t-elle en aval les structures cibles ? ii. Quels mécanismes permettent d'expliquer l'hyperactivité des neurones de la LHb durant l'abstinence ? iii. Quelles sont les conséquences comportementales de ce changement d'activité ? iv. Quelles sont les afférences du cerveau susceptibles de modifier l'activité de la LHb pendant le sevrage ?

Partie 1 : Comment l'hyperactivité de la LHb entraine des modifications en aval (quelles régions reçoivent des afférences de la LHb ?)

Contexte :

La LHb est positionnée au milieu du cerveau. Cette structure envoie ses informations principalement à des structures ventrales du cerveau, telles que l'aire tegmentale rostromédiale (RMTG), et la région tegmentale ventrale (VTA) (**Fig. 1**).

Sur la base d'études anatomiques et fonctionnelles (voir Lecca et al., 2014) nous pouvons prévoir que lorsque la LHb est excitée, elle excite à son tour le noyau tegmental rostromédial (RMTG). Le RMTG va alors inhiber l'aire tegmentale ventrale (VTA), et plus particulièrement les neurones dopaminergiques (DA). En d'autres termes, la (sur)activation de la LHb (via le RMTG) conduit à la réduction d'activité des neurones dopaminergiques de la VTA pouvant être à l'origine des comportements dépressifs. De tels comportements ayant par ailleurs déjà été décrits chez la souris lors d'inhibition directe des neurones dopaminergiques de la VTA (Tye et al., 2013).

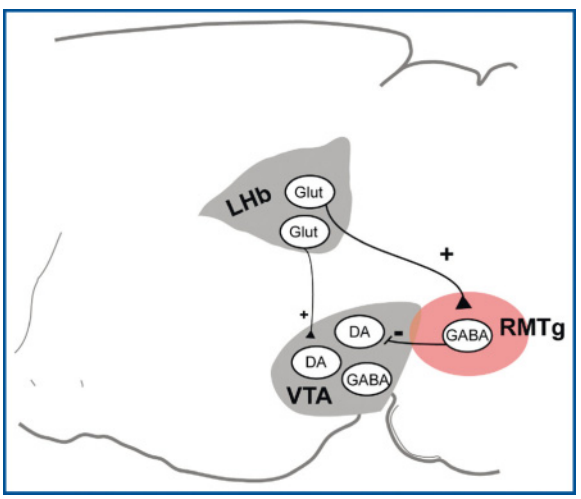


Figure 1 : Schéma d'une section sagittale de cerveau de souris. L'Habenula latérale (LHb) envoie des afférences glutamatergiques (Glut) excitatrices au noyau tegmental rostromédial (RMTG). En retour, le RMTG, GABAergique, réduit l'activité des neurones dopaminergiques (DA) de l'aire tegmentale ventrale (VTA). Il existe également une projection directe, moins forte, de la LHb vers la VTA (Lecca et al., 2014).

Ceci suggère que le syndrome de manque à la cocaïne conduirait à une surexcitation des neurones de la LHb projetant sur les neurones du RMTG (projetant eux-mêmes vers la VTA et ainsi réduisent l'activité des neurones dopaminergiques). Par conséquent, nous avons décidé de tester l'effet du syndrome de manque à la cocaïne sur les neurones de l'habénula latérale qui projettent sur le RMTG (LHb-> RMTG).

Méthodes :

Notre premier objectif était d'enregistrer l'activité synaptique des neurones dans la LHb en utilisant une préparation de tranches aigües de cerveau de souris (contenant le LHb). Ces tranches ont été maintenues dans une solution salée qui imite le liquide céphalo-rachidien du cerveau,

permettant aux neurones de continuer à communiquer les uns avec les autres pendant une période limitée de temps (environ un jour). Afin d'enregistrer l'activité synaptique de ces neurones, nous avons placé une coupe de cerveau dans une chambre d'enregistrement. Nous avons localisé la LHb dans la tranche, et grâce à une pipette en verre enregistré les neurones en utilisant la technique de patch-clamp (à l'aide d'un microscope pour visualiser les cellules).

Notre deuxième objectif était d'enregistrer les neurones de la LHb qui projettent spécifiquement sur le RMTg. Pour cela, nous avons au préalable effectué une chirurgie chez la souris, pour injecter un traceur fluorescent rétrograde dans le RMTg. Grâce à ce marquage, il nous a été possible d'identifier au sein de la LHb les neurones de LHb qui projetaient spécifiquement sur le RMTg (car fluorescents) et de les enregistrer (**Fig. 2**).

Notre troisième objectif était d'observer les changements au sein des neurones LHb-> RMTG neurones pendant la période de manque. Dans ce but, nous avons comparé un groupe d'animaux ayant reçu des injections multiples de cocaïne, suivie d'une période de manque à un groupe témoin, ayant reçu une solution saline à la place des injections de cocaïne. Dans cette première partie de l'étude, nous nous sommes principalement intéressés aux entrées glutamatergiques (excitatrices) sur les neurones LHb projetant sur le RMTg.

Résultats et conclusion

En utilisant la stratégie décrite ci-dessus, nous avons enregistré des neurones de la LHb qui projettent sur le RMTG chez les souris en syndrome de manque, ou non (groupe contrôle injecté à la solution saline). Par blocage pharmacologique des autres types de transmission, nous avons pu isoler et enregistrer spécifiquement la transmission glutamatergique spontanée, générée par les récepteurs AMPA post-synaptiques, sur les neurones LHb-> RMTG et ce dans les deux groupes. Ainsi, nous n'avons pas observé de modification de la fréquence des évènements excitateurs suite au syndrome de manque. Par contre, nous avons pu observer une augmentation de l'amplitude des événements individuels glutamatergiques au cours de la période d'abstinence (**Fig. 3**). Ceci suggère que dans les neurones LHb projetant sur le RMTG (qui peuvent inhiber les neurones dopaminergiques de l'aire tegmentale ventrale), la composante excitatrice est renforcée après l'abstinence de la cocaïne. Cela contribue probablement à la sur-activation des neurones LHb durant le sevrage. De plus, le fait que le changement soit en amplitude plutôt qu'en fréquence des événements glutamatergiques, renseigne sur le mécanisme sous tendant ces modifications. En effet il indique que, pendant le sevrage, il y a une augmentation du nombre de récepteurs glutamatergiques ou de leurs fonctionnalités au niveau des neurones de la LHb.

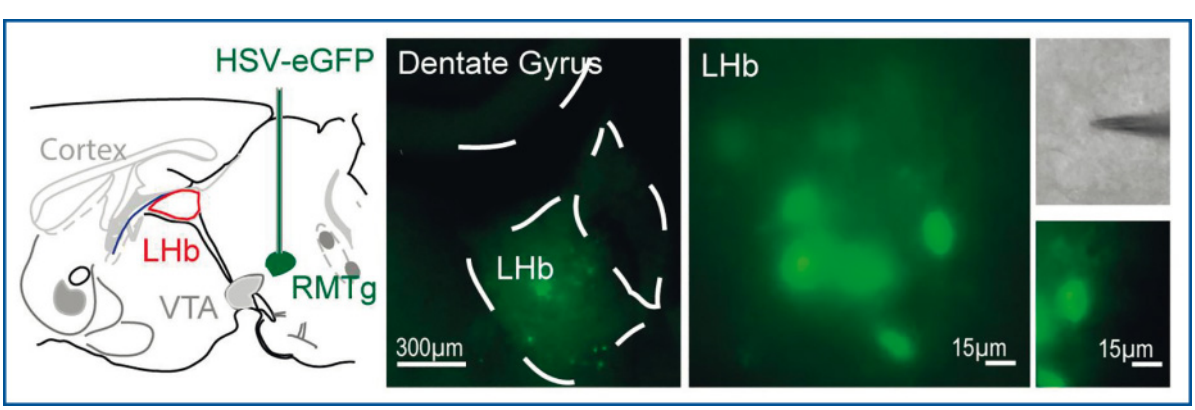


Figure 2 : Premier panneau : Traceur fluorescent vert (HSV-eGFP) injecté dans le RMTG. Deuxième et troisième panneau : le HSV marque les neurones de l'habenula latérale en vert qui projettent sur le RMTG. Quatrième panneau : Le marquage nous permet de placer la pipette de verre (en haut) spécifiquement dans les neurones qui sont vert-fluorescent (en bas, projetant sur le RMTG).

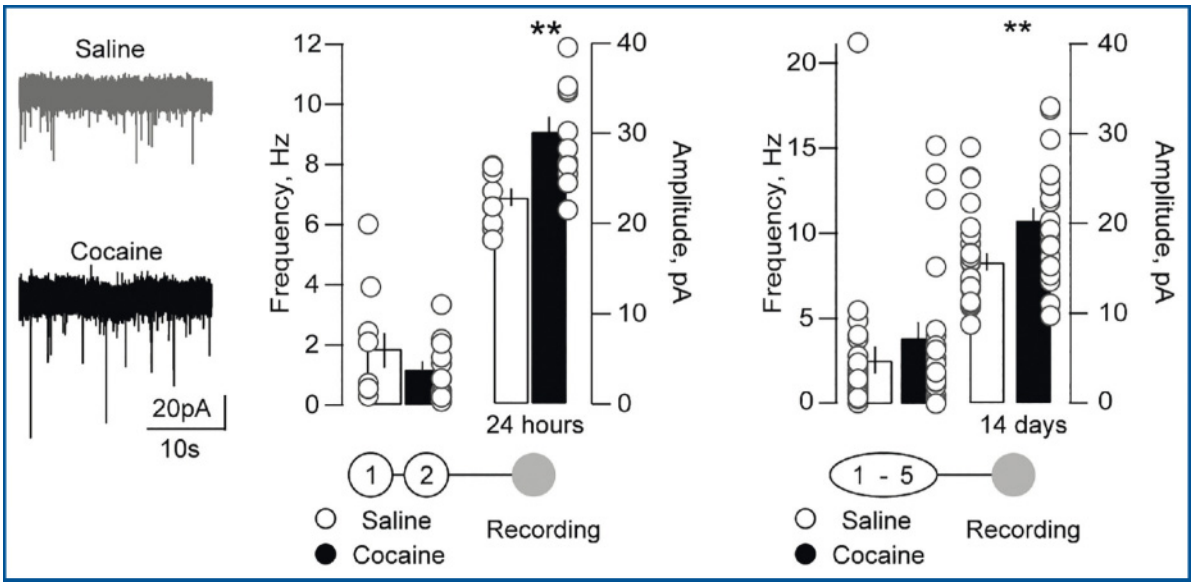


Figure 3 : Premier panneau : exemples d'enregistrements de signaux glutamatergiques dans un neurone LHb- > RMTG d'une souris traitée à la saline, et d'une souris traitée à la cocaïne. Deuxième panneau : Enregistrement 24 heures après deux injections de cocaïne. Ceci est suffisant pour augmenter l'amplitude des événements glutamatergiques, tandis que leur fréquence reste inchangée. Troisième panneau : Enregistrement 14 jours après 5 injections de cocaïne observation d'un effet similaire de renforcement de l'amplitude des évènements glutamatergiques, avec une fréquence inchangée.

Partie 2 : Quel mécanisme permet d'expliquer l'augmentation des entrées excitatrices au niveau des neurones de la LHb ?

Contexte :

Comme indiqué précédemment, l'augmentation de l'amplitude de connexions glutamatergiques suggère un changement au niveau des récepteurs postsynaptiques au glutamate dans les neurones LHb pendant le sevrage de la cocaïne. Nous avons alors émis l'hypothèse selon laquelle le sevrage de la cocaïne produirait une augmentation du transport des récepteurs glutamatergiques (récepteurs AMPA). Ainsi, nous avons essayé de démontrer que la cocaïne entraîne une augmentation du transport des récepteurs AMPA dans les neurones de la LHb projetant vers le RMTG.

Méthodes :

Nous avons réitéré l'expérience décrite dans la partie 1, à l'exception du changement suivant : préalablement aux injections de cocaïne, nous avons infusé chirurgicalement dans la LHb un peptide qui, lors de son activation, prévient du transport des récepteurs AMPA. Nous avons ensuite activé cette séquence juste avant les injections de cocaïne (ou de solution saline). Chaque fois que le peptide, appelé GluA1-ct, était activé dans un neurone LHb, celui-ci devenait rouge. Cela nous a permis d'enregistrer des neurones LHb projetant sur le RMTG (cellules vertes) dans les 4 conditions suivantes (**Fig. 4**) :

- 2x Saline + 24 heures ; peptide GluA1ct non actif [cellule verte]
- 2x Saline + 24 heures ; peptide GluA1ct actif [cellule verte + rouge]
- 2x Cocaïne + 24 heures d'abstinence ; pas de peptide GluA1ct actif [cellule verte]
- 2x Cocaïne + 24 heures d'abstinence ; peptide GluA1ct actif [cellule verte + rouge]

Résultats et Conclusion

Nous avons étudié si l'augmentation d'amplitude des signaux glutamatergiques dans les neurones de la LHb- > RMTG pendant le sevrage de la cocaïne, était due au transport des récepteurs AMPA. Si oui, cette augmentation devrait être bloquée par le peptide GluA1-ct infusé dans LHb (qui empêche le trafic des récepteurs AMPA). Chez les souris traitées à la cocaïne, dans les

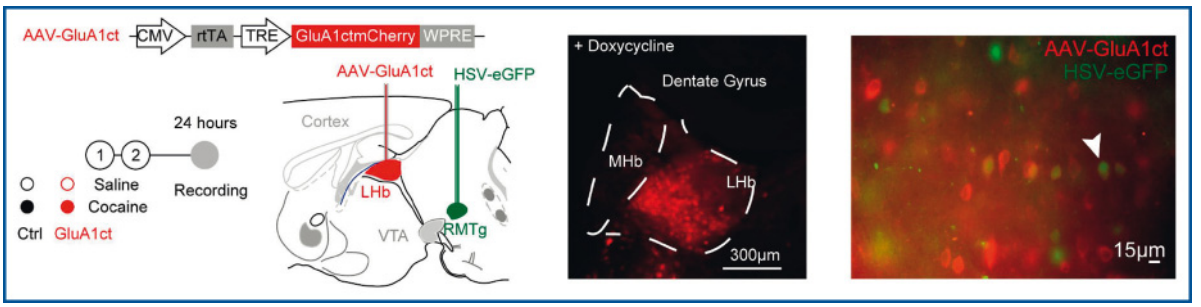


Figure 4 : Panneau de gauche : Schéma d'injection de colorant vert dans le RMTG, et du peptide GluA1-ct dans LHb (en rouge = actif). Panneau central : Activation de GluA1-ct dans LHb induit des cellules rouges. Troisième panneau : Dans la LHb des cellules rouges (GluA1-ct actif, mais ne projetant pas au RMTg), cellules vertes (projetant au RMTG, mais pas GluA1-ct actif), et cellules doublement marquées jaunes (GluA1-ct activé et projetant au RMTG). Cela nous permet d'enregistrer des cellules dans les différentes conditions (GluA1-ct actif ou non) lors de l'injection d'une solution saline ou de cocaïne.

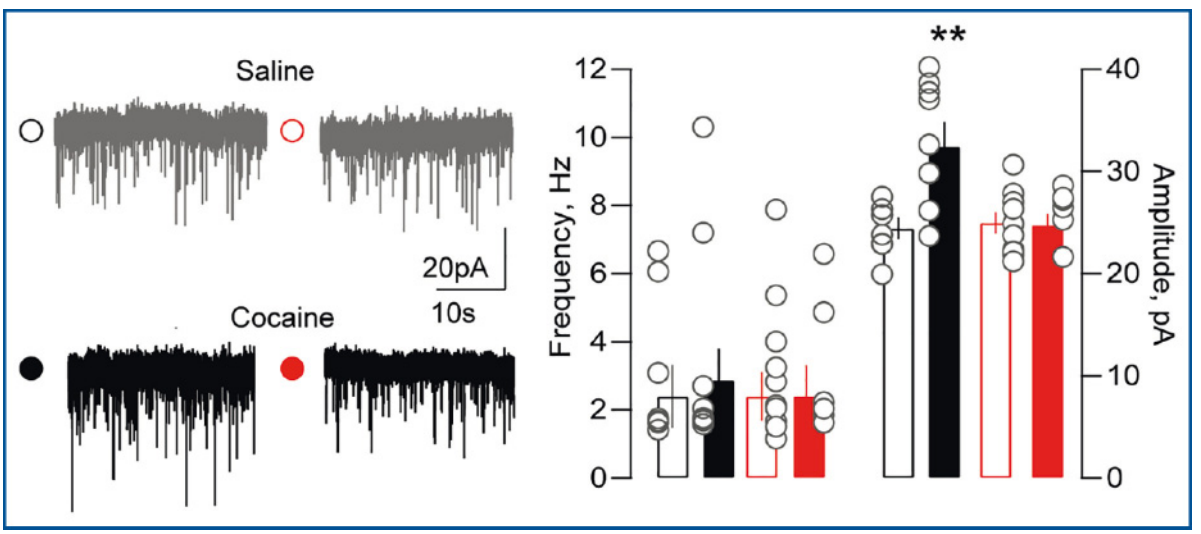


Figure 5 : Gauche : Enregistrements de la transmission glutamatergique dans les neurones LHb-> RMTG chez les souris traitées avec une solution saline (en haut), ou avec de la cocaïne (en bas), et avec un peptide GluA1-ct inactif (noir, à gauche) ou actif (rouge, à droite). À droite : Histogrammes montrant qu'il n'y a aucun changement dans l'une des conditions de la fréquence des signaux glutamatergiques sur les neurones LHb. Cependant, l'amplitude augmente pendant le sevrage de la cocaïne dans LHb neurones sans le peptide GluA1-ct (en noir). Cet effet était empêché dans des cellules exprimant le peptide GluA1-ct (en rouge).

neurones LHb-> RMTG avec le peptide inactif l'augmentation des signaux glutamatergiques était toujours présente. Au contraire, dans ces neurones LHb->RMTG contenant le peptide actif, il n'y avait pas de telle augmentation (**Fig. 5**). Ce résultat suggère que, lors du sevrage de la cocaïne, il y a une augmentation des récepteurs AMPA dans les neurones de la LHb qui projettent au RMTG, résultant d'une potentialisation des signaux glutamatergiques excitateurs dans ces neurones.

Partie 3 : Quelles sont les conséquences comportementales d'une transmission glutamatergique potentialisée dans les neurones LHb lors du sevrage ?

Contexte et Méthodes :

Pendant le syndrome de manque, un état similaire à l'état dépressif peut s'installer chez l'homme (Barr et al., 2002). Pour voir si le sevrage de la cocaïne produit des effets qui ressemblent aux états dépressifs, nous avons utilisé

un modèle animal couramment utilisé pour évaluer un comportement de type dépressif : le test de la nage forcée. Dans ce test, les animaux sont placés dans l'eau. Le temps d'immobilité dans l'eau est alors considéré comme un critère reflétant les symptômes négatifs (dans la mesure où cette terminologie est applicable chez les rongeurs) (Porsolt et al., 1977). Nous avons utilisé 4 groupes pour déterminer d'une part si le sevrage de la cocaïne induit un comportement dépressif, et d'autre part dans quelle mesure la modulation du transport des récepteurs AMPA empêche l'apparition de ces états. Les groupes expérimentaux ont été les suivants :

- Groupe 1 : 5x Saline + 14 jours de "sevrage" ; pas de GluA1-ct dans LHb
- Groupe 2 : 5x Saline + 14 jours de "sevrage" ; GluA1-ct dans LHb
- Groupe 3 : 5x Cocaïne + 14 jours de sevrage ; pas de GluA1-ct dans LHb
- Groupe 4 : 5x Cocaïne + 14 jours de sevrage ; GluA1-ct dans LHb

Résultats et Conclusion :

Les souris du groupe sevré après exposition à la cocaïne présentaient une nette augmentation de l'immobilité dans le test de la nage forcée. A l'inverse, cet effet était totalement absent lors de l'activation locale du peptide GluA1-ct au niveau des neurones de la LHb juste avant les injections de cocaïne (**Fig. 6**). Ainsi, l'augmentation de l'efficacité des récepteurs pour le glutamate dans le LHb, joue un rôle clé dans l'« humeur » négative au cours du sevrage de la cocaïne.

Partie 4 : Quelles régions du cerveau transmettent des informations aux neurones LHb pertinentes pour l'encodage du syndrome de manque ?

Contexte :

Nous avons observé que le sevrage à la cocaïne conduit à une augmentation de l'efficacité des signaux glutamatergiques au niveau de la LHb. Un progrès important serait de savoir où ces signaux sont générés dans le cerveau. Parmi les régions candidates, on trouve le noyau entopedunculaire (EPN). Cette région est connue pour transmettre les informations concernant les récompenses et les punitions à la LHb (Hong & Hikosaka, 2008). Nous avons donc étudié si la connexion entre EPN et LHb peut transmettre des informations importantes. Nous avons donc étudié si la projection de l'EPN sur LHb pourrait coder un état négatif semblable à celui du syndrome de manque.

Méthodes et Résultats :

Pour activer une projection spécifique (dans ce cas l'EPN) sur les neurones de la LHb, nous avons

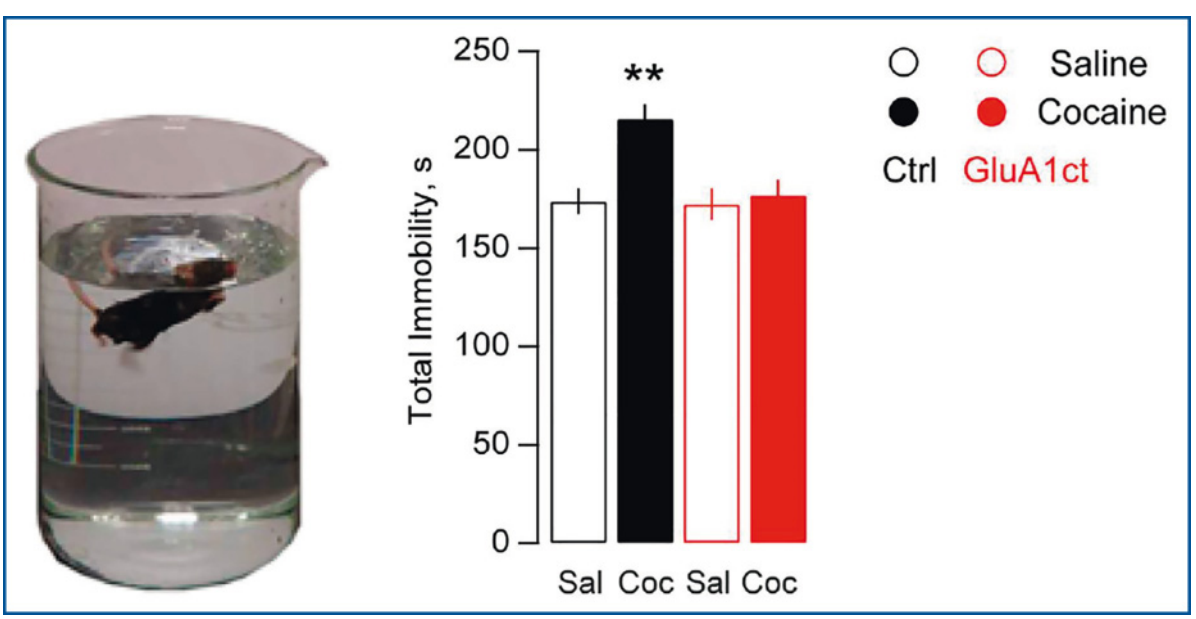


Figure 6 : À gauche : exemple de dispositif pour la nage forcée. À droite : Immobilité des souris prétraitées avec une solution saline ou de cocaïne, avec ou sans GluA1-ct dans la LHb.

utilisé une approche d'optogénétique : c'est-à-dire l'emploi de protéines (channelrhodopsin ; ChR2) qui agissent en tant que canaux cationiques, qui peuvent être exprimées dans les neurones. Ces canaux sont activés par la lumière, et conduisent ainsi à l'activation du neurone dans lequel elles sont incorporées. Nous avons injecté un virus codant pour la channelrhodopsin dans l'EPN et ainsi activé de manière spécifique la connexion EPN-LHb (**Fig. 7**).

Globalement, la connexion EPN-LHb est plus excitatrice qu'inhibitrice (**Fig. 7**). Nous nous sommes donc demandés si stimuler les afférences de l'EPN (excitant ainsi la LHb) suffisait à induire un état émotionnel négatif (comme dans le syndrome de manque). Dans ce but, nous avons injecté le virus channelrhodopsin dans l'EPN de souris, et implanté chirurgicalement une fibre optique juste au-dessus des terminaisons nerveuses de l'EPN projetant à la LHb. De cette façon, nous avons stimulé la connexion EPN-LHb pendant que la souris était libre de déambuler (**Fig. 8** ; dessus). Nous avons également utilisé un groupe témoin où la fibre optique était implantée, mais sans expression de ChR2 dans l'EPN.

Nous avons testé l'efficacité de la stimulation de cette projection pour induire un état négatif en utilisant un test de préférence/aversion de place. Dans cette expérience, la souris peut se déplacer dans 2 compartiments principaux. Chacun des compartiments présentait des motifs spécifiques permettant à l'animal de les distinguer. Nous avons permis à l'animal d'explorer l'environnement pendant un jour, sans aucune stimulation.

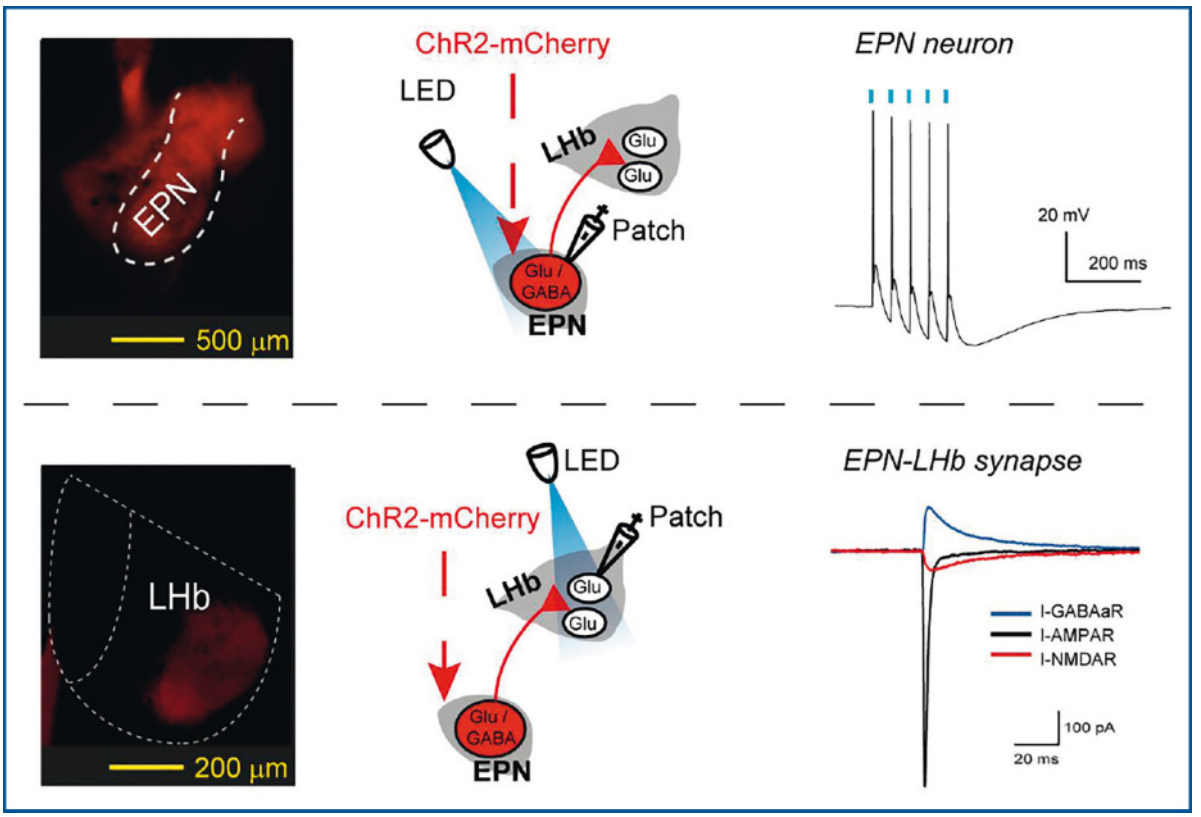


Figure 7 : Nous avons injecté un virus codant pour la channelrhodopsin (+ marqueur fluorescent de couleur rouge) dans l'EPN (en haut à gauche). Nous avons ensuite enregistré dans une tranche de cerveau un neurone fluorescent de l'EPN, et illuminé les canaux ioniques sensibles à la lumière (en haut au centre). Ceci entraîne la décharge du neurone EPN (en haut à droite ; les carrés bleus indiquent les impulsions de lumière délivrées). De plus l'injection de virus dans l'EPN résulte du transport de la channelrhodopsin dans les terminaisons nerveuses de l'EPN au niveau de la LHb (en bas à gauche). Lorsque nous avons enregistré les neurones de la LHb, et illuminé ces terminaisons nerveuses (milieu en bas), nous avons observé des courants soit inhibiteurs GABA (bleu) et / ou excitateurs AMPA (noir) ou NMDA (rouge) dépendants.

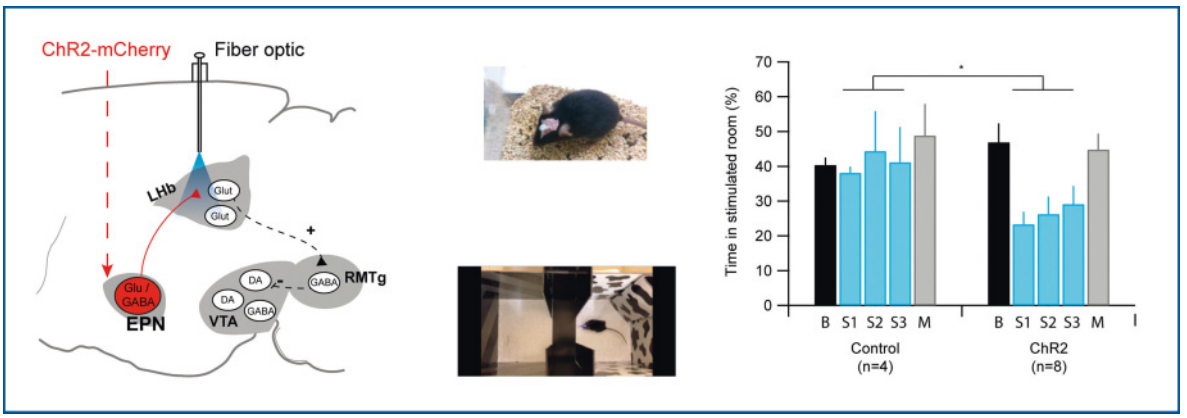


Figure 8 : À gauche et au milieu en haut : Implantation d'une souris avec une fibre optique afin de stimuler optiquement les terminaisons nerveuses de l'EPN sur la LHb. Au milieu, en bas : souris dans les dispositifs pour le test de préférence de place. À droite : mesure de la préférence pour la chambre stimulée avant (B) et après stimulation (S1-S3) et durant le test de mémoire (M, sans stimulation).

Du 2e au 4e jour, nous avons stimulé les afférences de l'EPN sur la LHb chaque fois que la souris se trouvait dans une chambre spécifique. Au 5e jour, nous avons laissé la souris explorer l'environnement, sans stimulation pour tester la mise en place d'une mémoire associée au contexte. Nous avons observé que dans le groupe ChR2 (mais pas dans le groupe témoin) les souris évitaient la chambre stimulée, sans néanmoins présenter une mémoire pour ce contexte (**Fig. 8**). Ceci suggère que la connexion EPN-LHb transmet des informations sur des événements négatifs.

Discussion générale et Conclusions

Chez les utilisateurs fréquents, les substances addictives sont souvent consommées pour soulager des effets négatifs. Dans cette étude, nous avons examiné l'implication de la LHb dans les symptômes de manque à la drogue. Nous avons vu que, pendant l'abstinence à la cocaïne il y avait une augmentation de la transmission glutamatergique vers les neurones de la LHb projetant sur le RMTG. Le mécanisme de cette potentialisation impliquait une augmentation des récepteurs glutamatergiques au niveau des neurones LHb. Nous avons établi que ce mécanisme contribue de manière décisive aux « ressentis » négatifs éprouvés pendant le sevrage à la drogue.

Enfin, nous avons montré que la LHb reçoit elle-même des informations importantes par le noyau entopedunculaire (EPN). La stimulation de la connexion EPN-> LHb entraîne un conditionnement aversif. Il reste à vérifier si : (a) le signal entre l'EPN-LHb est renforcé par une augmentation des récepteurs glutamatergiques ; (b) les changements induits par la cocaïne dans la liaison EPN-LHb sont liés aux symptômes négatifs lors de l'abstinence.

Dans l'ensemble, nos résultats fournissent des informations importantes dans la façon dont les symptômes de sevrage de la drogue sont codés dans le cerveau, et proposent des cibles thérapeutiques potentielles pour réduire le risque de rechute.

Remerciements

Je souhaiterais remercier la Fondation Fyssen pour le financement de mes recherches. Je remercie également Dr. Manuel Mameli pour son soutien ainsi que son aide. Enfin, je remercie les autres membres de l'équipe de Dr. Mameli : Salvatore Lecca, Kristina Valentinova et Anna Tchenio pour leurs contributions.

Bibliographie

- Barr, A. M., Markou, A., and Phillips, A. G. (2002). Trends Pharmacol Sci 23, 475-482
- Jhou, T. C., Good, C. H., et al. (2013). J. Neurosci 33, 7501-7512.
- Hong, S. and Hikosaka, O. (2008). Neuron, 26, 720-729.
- Koob, G. F., and Le Moal, M. (2008). Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 363, 3113-3123.
- Lecca, S., Meye, F. J., and Mameli, M. (2014). Eur J. Neurosci, 39, 1170-1178.
- Maroteaux, M., and Mameli, M. (2012). J. Neurosci 32, 12641-12646.

- Porsolt, R. D., Bertin, A., and Jalfre, M. (1977). Arch Int Pharmacodyn Ther 229, 327-336.
- Tye, K. M., Mirzabekov, et al (2013). Nature 493, 537-541.

Introduction

In the early stages of addiction, drugs are mainly taken because they make the user feel good (positive reinforcement). Instead, in the later stages, drugs are more and more consumed to alleviate negative withdrawal symptoms (negative reinforcement) (Koob et al., 2008). Brain regions that allow positive reinforcement are heavily studied. Instead, the brain regions involved in negative reinforcement are less clear, but it is important to know more about them, since they strongly contribute to drug relapse (Koob et al., 2008).

A candidate target region is the lateral habenula (LHb). This structure has been recently implicated in encoding negative emotional states. The LHb is hyperactive in depressed patients, and in rodent models for depression (Lecca et al., 2014). LHb overexcitation also occurs during withdrawal from drugs such as cocaine (Jhou et al., 2013; Maroteaux & Mameli, 2012).

Together, these findings suggest: (i) a relationship between lateral habenula activity and negative emotions, and (ii) an increase in lateral habenula activity after drug use. Consequently, we hypothesize that drug withdrawal symptoms are encoded by lateral habenula overactivity. In this study we aim to address this general question; by addressing the following points: i. How might LHb overactivity translate in changes downstream? ii. What happens in LHb neurons to make them overactive during drug withdrawal? iii. What is the behavioral consequence of this withdrawal-induced overactivity? Iv. Which brain regions convey withdrawal information to LHb neurons?

Part 1: How would LHb overactivity translate into changes downstream (i.e. what regions does LHb project to?)

Background:

The LHb is positioned roughly in the middle of the brain. It sends its information mainly to lower (ventral) parts of the brain, like the rostromedial tegmental area (RMTg), but also the ventral tegmental area (VTA) (**Fig. 1**).

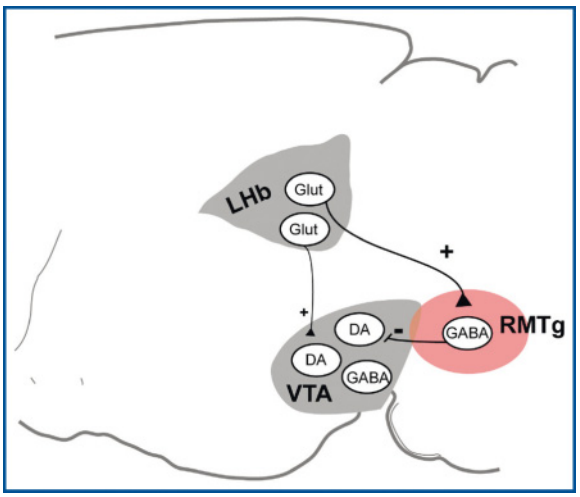


Figure 1: Schematic showing a section of the brain of a mouse as viewed from the side ('sagittal'). The Lateral Habenula (LHb) sends excitatory glutamatergic information to the rostromedial tegmental area (RMTg). In turn RMTg sends inhibitory 'inactivating' GABAergic signals to dopamine neurons (DA) in the ventral tegmental area (VTA). There is also a less strong direct excitatory projection from LHb to VTA (Lecca et al., 2014).

Based on previous anatomical and functional studies (see Lecca et al., 2014) we can predict that when the LHb gets excited, it in turn excites the rostromedial tegmental area (RMTg). Consequently, the RMTg inhibits the ventral tegmental area (VTA), and specifically dopamine neurons. In other words, (over)activation of the LHb would be expected to (via the RMTg) lead to silencing of VTA dopamine neurons. This could well stand at the basis of depressive-like behavior, which is also observed with direct inhibition of VTA dopamine neurons in mice (Tye et al., 2013).

In light of this we predicted that drug withdrawal would lead to overexcitation of LHb neurons that project to neurons in the RMTg (which would then in turn project to the VTA to silence dopamine neurons). We therefore set out to test the effect of cocaine withdrawal on these specific LHb neurons that project to the RMTg (LHb- > RMTg).

Methods:

Our first objective was to record the synaptic activity of neurons in the LHb. This is accom-

plished by making thin brain slices (containing the LHb) of a mouse. When properly stored in a salty solution that mimics the cerebrospinal fluid in the brain, neurons in these slices continue to communicate with each other for a limited period of time (around a day). To record the synaptic activity from these neurons, we placed a single slice in a recording chamber. We localized the LHb within the slice, and then placed a glass pipette in neurons in the LHb to record from them, by using the whole-cell patch clamp technique (with the aid of a microscope to visualize the cells).

Our second objective was to specifically record from LHb neurons that project to the RMTg. In order to accomplish this we previously performed surgery on the mouse, to inject a fluorescent retrograde tracer in the RMTg that would then travel back to all regions that project to that region. This allowed us to see and record from fluorescent (dye-labeled) neurons in the LHb within the brain slices, which we knew projected to the RMTg (**Fig. 2**).

Our third objective was to observe changes in these LHb->RMTg neurons after drug withdrawal. We compared two groups, one being a group in which multiple injections of cocaine were given, followed by a withdrawal period; the other group was a control group, which received saline rather than cocaine injections. Our main parameter of interest in the first part of the study was to look at glutamatergic inputs (which are excitatory) to the LHb neurons that project to the RMTg. These excitatory inputs to the LHb are coming from other brain regions of multiple origins (Lecca, et al., 2014).

Results and Conclusion

Using the strategy outlined above, we recorded from LHb neurons that project to the RMTg in mice that had either gone through cocaine withdrawal, or not (control saline group). We specifically recorded spontaneous glutamatergic transmission, mediated by postsynaptic AMPA receptors, onto LHb->RMTg neurons in both groups (blocking other kinds of inputs pharmacologically). We observed that the frequency with which these excitatory inputs occurred was not changed after cocaine withdrawal. Instead, the amplitude of the individual glutamatergic events was increased during cocaine withdrawal (**Fig. 3**). Together this suggests that LHb neurons that project to the RMTg (likely thereby silencing dopamine neurons in the VTA), receive stronger excitatory input after abstinence from cocaine. This likely contributes to overactivation of the LHb neurons during withdrawal. The fact that the change was in the amplitude, rather than frequency of glutamatergic events, suggests something about the underlying cause for this effect. It indicates that during cocaine withdrawal in the LHb, there is an increased functionality or number of receptors for the glutamatergic signal on the LHb neurons themselves (during cocaine withdrawal).

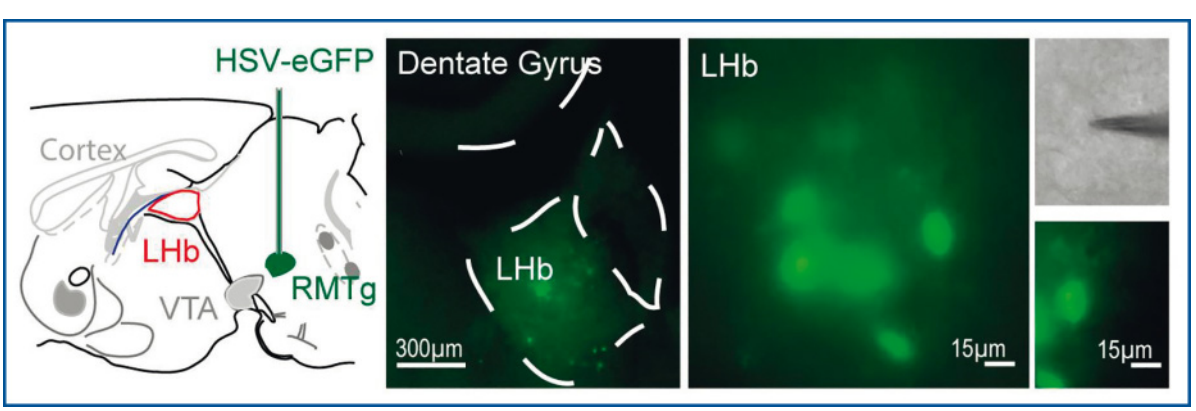


Figure 2 : First panel: a green fluorescent tracer (HSV-eGFP) is injected in the RMTg. Second and third panel: This leads to green-labeled neurons in the LHb that we know project to the RMTg. Fourth panel: This allows us to place the glass pipette (top) specifically in neurons that are green fluorescent (bottom; i.e. projecting to RMTg).

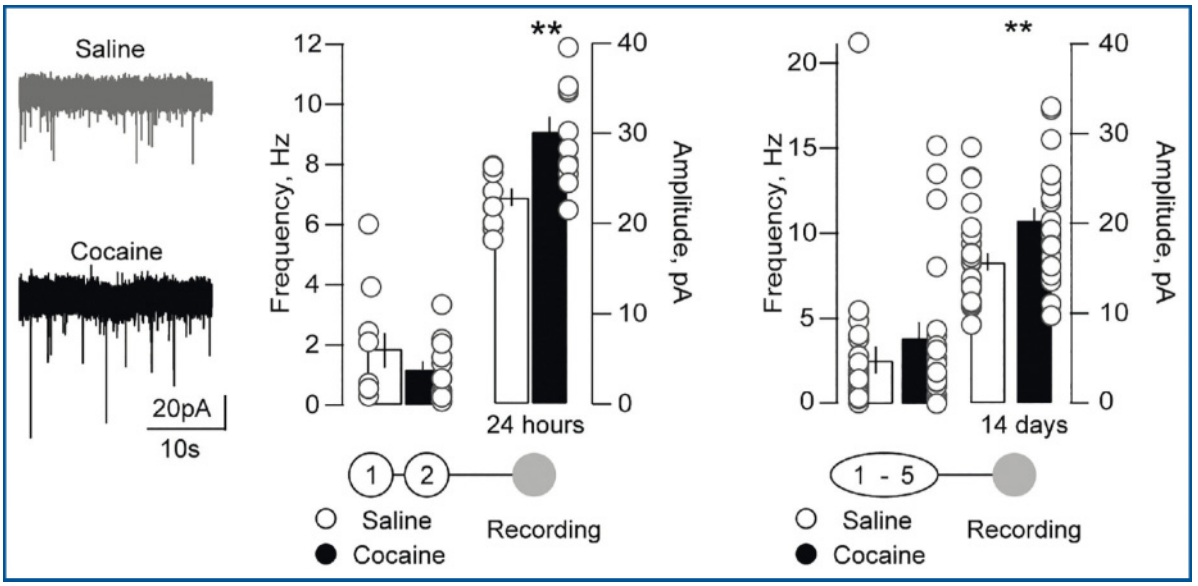


Figure 3: First panel: Examples of the recordings of glutamatergic signals (the downward deflections of current) in an LHb->RMTg neuron in a mouse treated with saline, and one treated with cocaine. Second panel: Recording 24 hours after two cocaine injections, this is enough to increase the amplitude of glutamatergic events, while their frequency remains unchanged. Third panel: Recording 14 days after five cocaine injections gives a similar effect of enhanced amplitude of glutamatergic events, with unchanged frequency.

Part 2: What happens in the LHb neurons to increase their excitatory input?

Background:

As stated above, the increase in amplitude of glutamatergic input suggests that some change may occur postsynaptically at the level of the glutamate receptors themselves in the LHb neurons during cocaine withdrawal. We hypothesized that there would be an increase in the trafficking (i.e. mobilization) of receptors for glutamate (AMPA receptors) during cocaine withdrawal. We set out to demonstrate that cocaine withdrawal indeed leads to enhanced AMPA receptor trafficking in LHb->RMTg neurons.

Methods:

We did the same kind of experiment as described in part 1, except with one added variable: prior to cocaine injections, we surgically infused a peptide into the LHb that, when activated, would prevent activity-dependent trafficking of AMPA receptors. We then activated this peptide just prior to when the cocaine (or saline) injections were given. Whenever the AMPAR-trafficking preventing peptide, called GluA1-ct, was active in an LHb neuron it would turn red (if not active it would be colorless). This allowed us to now record from LHb neurons that projected to the RMTg (green cells) in 4 conditions (**Fig. 4**):

- 2x Saline + 24 hours 'withdrawal'; no active GluA1ct peptide [green cell]
- 2x Saline + 24 hours 'withdrawal'; active GluA1ct peptide [green + red cell]
- 2x Cocaine + 24 hours withdrawal; no active GluA1ct peptide [green cell]
- 2x Cocaine + 24 hours withdrawal; active GluA1ct peptide [green + red cell]

Results and Conclusion

We assessed whether the increase in amplitude of glutamatergic signals in LHb->RMTg neurons during cocaine withdrawal, was due to trafficking of AMPA receptors. If so, this increase would be blocked by the GluA1-ct peptide infused in the LHb, which prevents AMPA receptor trafficking. We observed that in cocaine pretreated mice, the increase in glutamatergic signals was still there in LHb->RMTg neurons without an active GluA1-ct peptide. However, in those LHb->RMTg neurons with an active peptide, there was no such increase. On its own the peptide did not exert an effect, as there was no change in the amplitude in saline conditions with or without the peptide (**Fig. 5**). This suggests that during

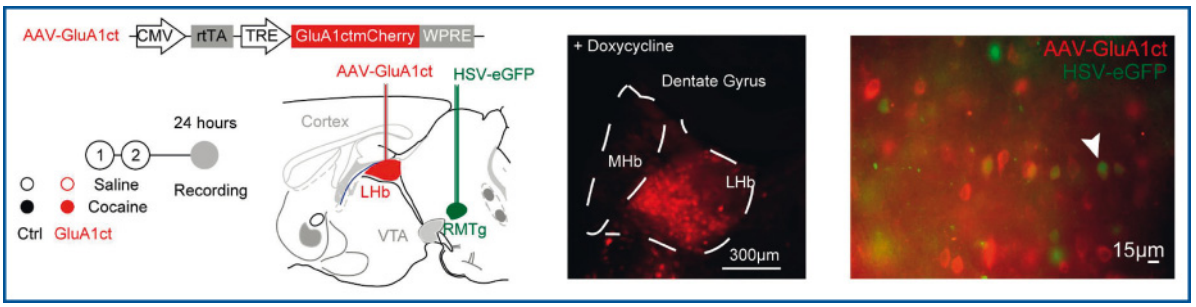


Figure 4: Left panel: Schematic of injection of green dye in RMTg, and red (activated) GluA1-ct peptide in LHb. Middle panel: Activation of GluA1-ct results in red LHb cells. Third panel: In the LHb both red cells (active GluA1-ct, but not RMTg-projecting), green cells (RMTg projecting, but no active GluA1-ct), and dual labeled (yellowish) cells (active GluA1-ct and RMTg-projecting) are observed. This allows us to record cells under different conditions (GluA1-ct or not) both for saline and cocaine conditions.

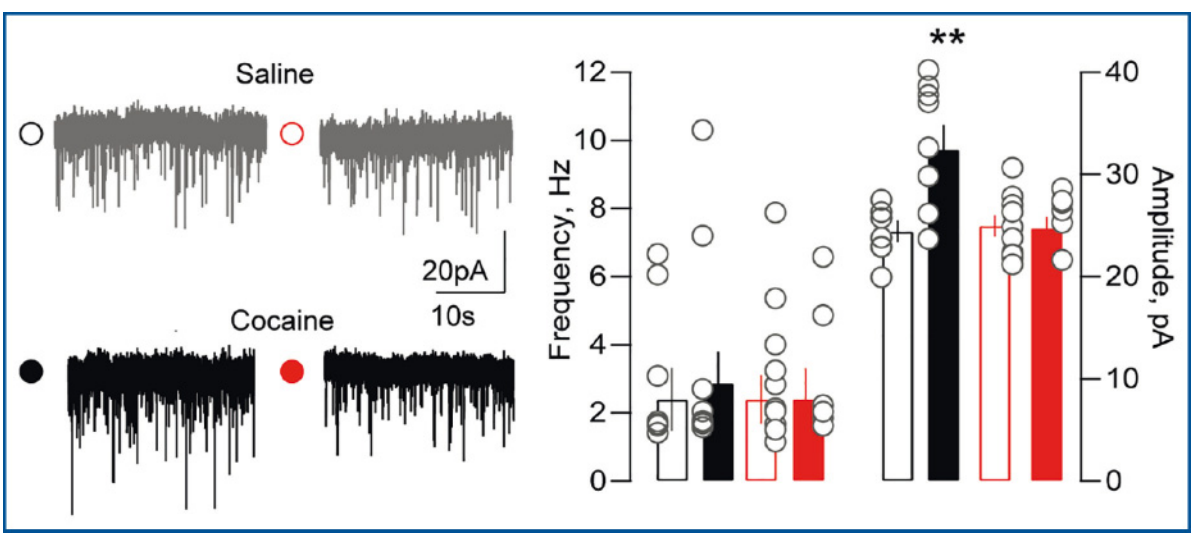


Figure 5: Left panel: Recordings of glutamatergic transmission in LHb- > RMTg neurons in mice treated with saline (top), or with cocaine (bottom), and with an inactive GluA1-ct peptide (black, left) or with an active peptide (red, right). Right panel: Bar graphs showing that there are no changes in any of the conditions in the frequency of glutamatergic signals onto LHb neurons. However, there was the previously observed increase in event amplitude in cocaine withdrawal in LHb neurons without the GluA1-ct peptide (solid black bar). Importantly, this effect was prevented in cells with the GluA1-ct peptide (solid red bar).

cocaine withdrawal, there is an increase in AMPA receptors in LHb neurons that project to the RMTg, resulting in enhanced excitatory glutamatergic signals to these neurons.

Part 3: What is the behavioral consequence of enhanced glutamatergic input to LHb neurons during withdrawal?

Background and Methods

During drug withdrawal a behavioral state can arise that in some aspects is similar to a depression (Barr et al., 2002). To see if the cocaine withdrawal in our hands produced anything resembling that, we made use of a well-accepted animal model for depressive-like behavior: the forced swim test. In this test animals are placed in water. The degree to which they stay helpless and immobile in the water is considered a measure that reflects negative symptoms of mood (to the extent this terminology is applicable in rodents) (Porsolt et al., 1977). We used 4 groups to determine whether cocaine withdrawal would induce depressive-like beha-

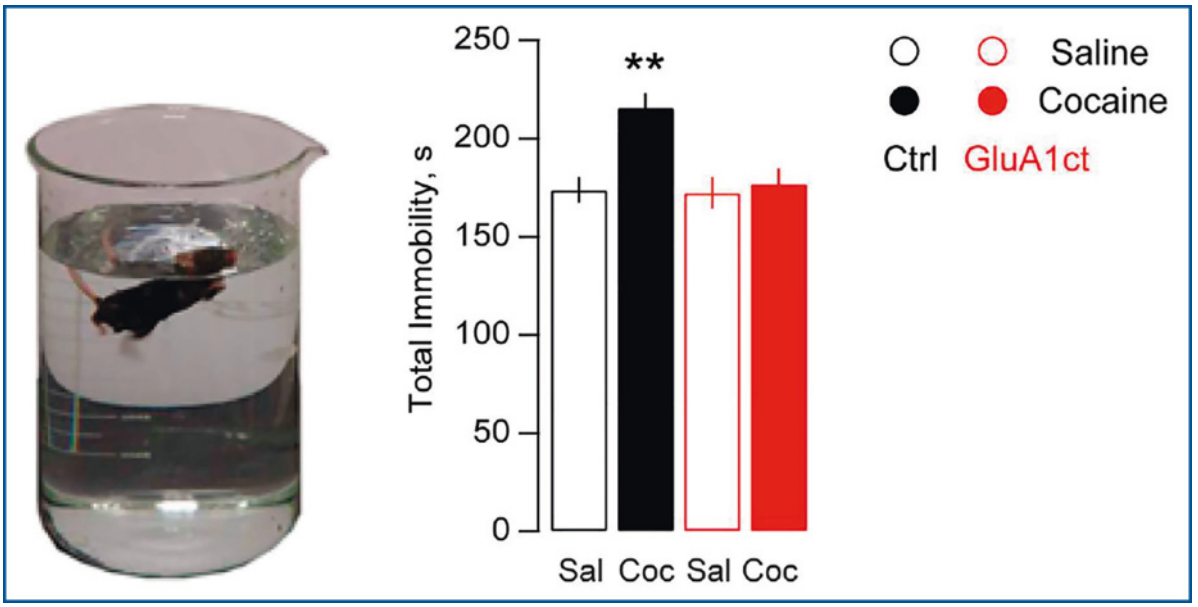


Figure 6: Left: example of the forced swim set-up. Right: Total immobility of mice pretreated with saline or cocaine, with or without active GluA1-ct in the LHb.

vior, and to what extent local impairment of AMPAR trafficking in the LHb would prevent this:

- Group 1: 5x Saline + 14 days 'withdrawal'; no GluA1-ct in LHb
- Group 2: 5x Saline+ 14 days 'withdrawal'; GluA1-ct in LHb
- Group 3: 5x Cocaine+ 14 days withdrawal; no GluA1-ct in LHb
- Group 4: 5x Cocaine+ 14 days withdrawal; GluA1-ct in LHb

Results and Conclusion

Mice from the cocaine withdrawal group showed a clear increase in immobility in the forced swim test. This effect however, was entirely absent in a cocaine withdrawal group in which the GluA1-ct had been activated locally in the LHb just prior to the cocaine injections (**Fig. 6**). Thus, the increase in receptors for excitatory glutamate in the LHb, plays a key role in the negative 'mood' during cocaine withdrawal.

Part 4: Which brain regions communicate important withdrawal-like aversive information to LHb neurons?

Background:

We have thus far observed that cocaine withdrawal leads to an increase in the strength of glutamatergic signals to the LHb. An important advance would be to know where in the brain these signals actually come from. Among the candidate regions, a particularly prominent one is the entopeduncular nucleus (EPN). This region is known to convey information about rewards and punishment to the LHb (Hong & Hikosaka, 2008). We therefore wanted to address whether the projection from the EPN to the LHb could encode a negative state similar to that of drug withdrawal.

Methods and Results:

In order to activate a specific input (in this case the EPN) to LHb neurons, we made use of 'optogenetics': the employment of proteins (channelrhodopsin; ChR2) that act as cation channels and that can be expressed by a neuron, can be activated by light, and then lead to activation of the neuron in which they are embedded. We injected the channelrhodopsin-encoding virus in the EPN and specifically activated the EPN->LHb connection (**Fig. 7**).

Overall the EPN-LHb connection is more dominantly excitatory than inhibitory (**Fig. 7**). We therefore asked whether stimulating the EPN input (thereby exciting the LHb) would be sufficient to induce a negative emotional state, like in withdrawal. To this end we injected the channel-

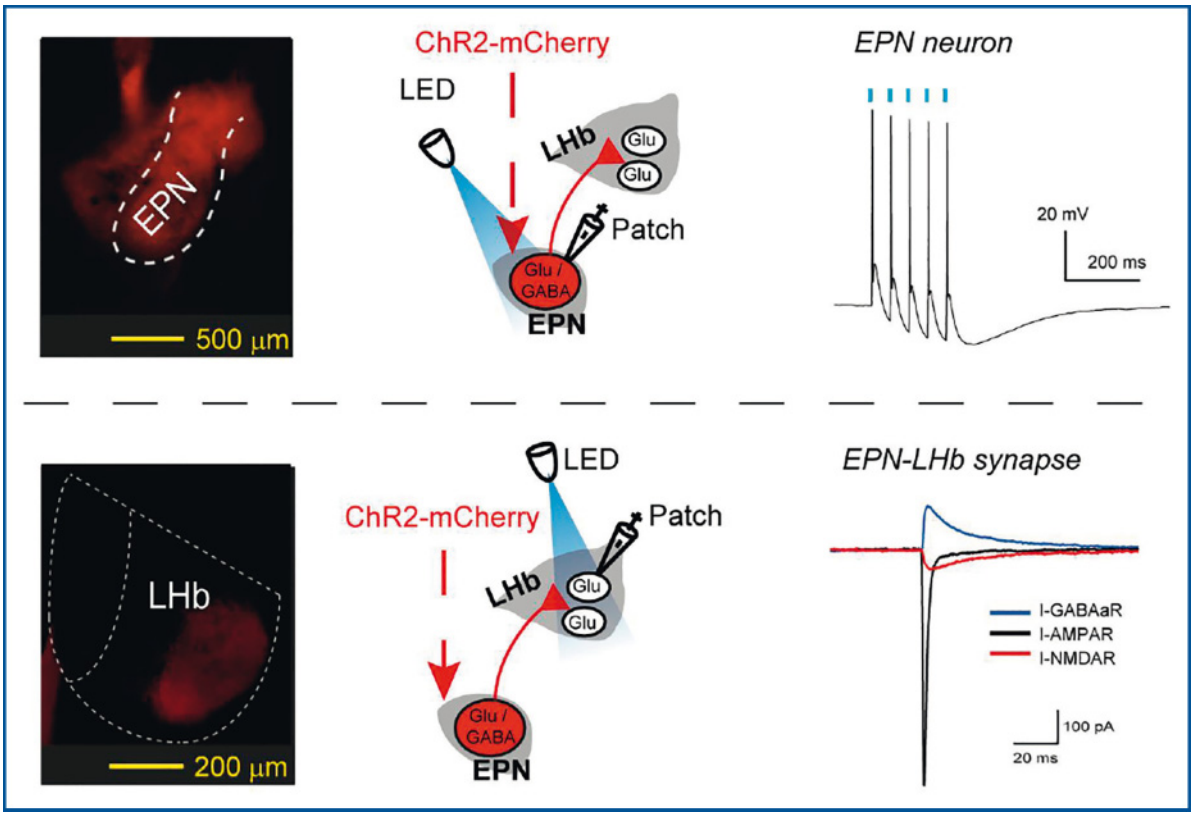


Figure 7: We injected the virus encoding channelrhodopsin (+red fluorescent marker) in the EPN (top left). When we then recorded in a brain slice from a fluorescent neuron in the EPN, and illuminated the light-sensitive channel (top middle), this resulted in firing of the EPN neuron (top right; blue squares indicate light pulses delivered). Moreover, having placed the virus in the EPN, this resulted in transport of the (red fluorescent) channelrhodopsin to nerve endings from the EPN in the LHb (bottom left). When we recorded from LHb neurons and illuminated these EPN nerve endings (bottom middle), we observed currents that were either inhibitory GABAergic (blue) signals mediated by $GABA_A$ receptors, and/or excitatory glutamatergic signals mediated by AMPA (black) or NMDA (red) receptors.

rhodopsin virus in the EPN of mice, and surgically implanted an optic fiber just above the EPN nerve endings that projected to the LHb. In this way we stimulated the EPN->LHb connection in freely moving mice (**Fig. 8**; top). We also had a control group where the fiber optic was implanted, but where no ChR2 was in the EPN.

We tested the capability of stimulating this projection to induce a negative state by using a place preference/aversion test. In this test there are 2 main compartments where the mouse can go. The compartments are distinguishable for the animal. On day 1 we let the animal explore the environment freely, without stimulation. On days 2-4 we stimulated the EPN->LHb fibers whenever the mouse got in one particular room. On day 5 we let the mouse explore the environment, without stimulating to see if any memory had been formed. We observed that in the ChR2 group (but not the control group) mice avoided the stimulated room, but did not form a memory for this (**Fig. 8**). This suggests that the EPN->LHb projection sends information about negative events.

Overall discussion and conclusions

In experienced users, addictive drugs are often taken to relieve withdrawal symptoms, including negative emotional states. In the current study we looked at the involvement of the LHb in negative drug withdrawal symptoms. We saw that during cocaine withdrawal there was an increase in excitatory glutamatergic inputs to LHb neurons that project to the RMTg. The

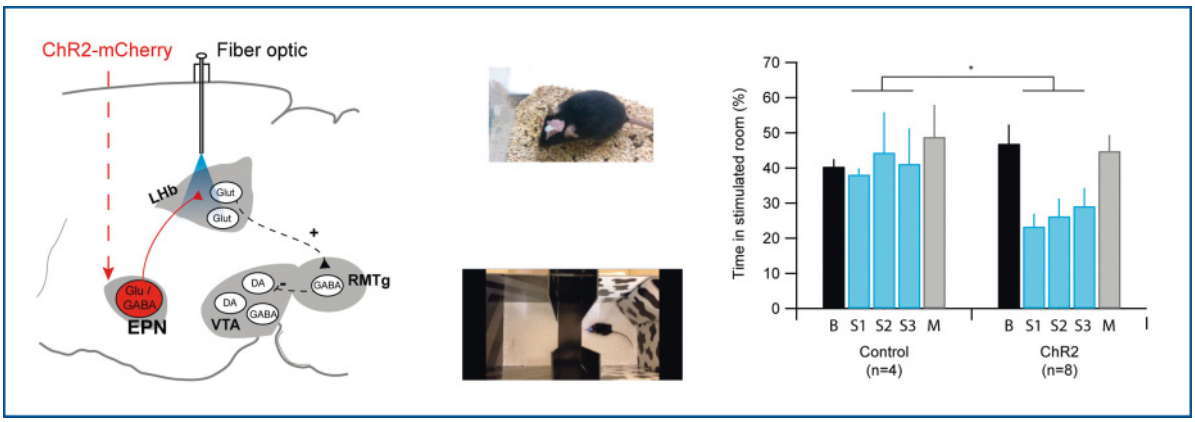


Figure 8: Left and top middle: Implantation of a mouse with a fiber optic to light-stimulate EPN nerve endings in the LHb. Bottom middle: mouse in a place preference box. Right: Preference for stimulated room during baseline (B), stimulation days (S1-S3) and a non-stimulated memory test (M).

mechanism for this was an increase in glutamatergic receptors in these LHb->RMTg neurons. We established that this critically contributed to the negative 'feelings' experienced during drug withdrawal. Finally, we showed that the LHb itself receives important information from the entopeduncular nucleus (EPN) in this regard. Stimulation of the EPN->LHb caused negative feelings. It remains to be verified whether: (a) the EPN->LHb connection is enhanced during withdrawal through an increase in glutamatergic receptors. (b) If cocaine-induced changes in the EPN->LHb connection cause withdrawal symptoms. Overall our findings provide important insights in how drug withdrawal symptoms are encoded in the brain, and suggest therapeutic targets to counteract this, potentially reducing the risk for drug relapse.

Acknowledgements

I am grateful to the Fyssen Foundation for financially supporting this research. I thank Dr. Manuel Mameli for his support and his help. Finally, I thank all members of Dr. Mameli's laboratory: Salvatore Lecca, Kristina Valentinova and Anna Tchenio for their contributions.

Dynamiques intracellulaires sous-tendant l'émergence des oscillations gamma au niveau des interneurones corticaux exprimant la parvalbumine

Quentin PERRENOUD

Chercheur post-doctorant à l'École de médecine de l'Université de Yale, USA

Résumé

Les oscillations gamma (30-80Hz) sont altérées chez les patients schizophrènes et il est supposé qu'elles jouent un rôle important dans le traitement de l'information au niveau du cortex cérébral. Des études récentes ont démontré que la genèse des oscillations gamma dépend de manière cruciale de l'activité des interneurones corticaux exprimant la parvalbumine (interneurones PV). Cependant, les mécanismes précis sous-tendant les oscillations gamma restent peu clairs. Dans cette étude, nous avons réalisé des enregistrements intracellulaires d'interneurones PV sur des souris éveillées de manière à caractériser leur activité pendant l'émergence des oscillations gamma. Pris dans leur ensemble, nos données indiquent que les oscillations gamma émergent de la synchronisation des neurones PV en réponse à une activité synaptique reflétant le niveau général d'activation du cortex cérébral.

Mots-clés

Néocortex, LFP, Oscillations gamma, Interneurones, Parvalbumine, Patch-clamp, Microscopie bi-photonique

Intracellular dynamics underlying the emergence of gamma oscillations in parvalbumin expressing cortical interneurons

Abstract

Gamma oscillations (30-80Hz) are impaired in schizophrenic patients and are believed to play an important role in cortical processing. Recent studies have demonstrated that the generation of gamma oscillations depends crucially on the activity of parvalbumin expressing cortical interneurons (PV interneurons). However the precise mechanisms underlying gamma oscillations remain unclear. Here we performed intracellular recordings of PV interneurons in awake mice to characterize their activity during the emergence of gamma oscillations. Taken together our data indicate that gamma oscillations arise from the synchronization of PV neurons as a response to a recurrent synaptic input reflecting the level of activation of the cortex as a whole.

Keywords

Neocortex, LFP, Gamma oscillations, Interneurons, Parvalbumin, Patch-clamp, Two-photon Microscopy

Introduction

Le premier électroencéphalogramme (EEG) du cerveau humain a été enregistré en 1928 par Hans Berger, un psychiatre allemand, lors d'une tentative visant à identifier des signaux télépathiques. Si cette tentative fut, de manière prévisible, infructueuse, Berger découvrit la première preuve que le cerveau génère une activité électrique oscillante que nous désignons de nos

jours sous le nom d'ondes cérébrales. L'EEG est depuis devenu un outil populaire en psychologie et en neurosciences et de nombreuses années de recherches ont révélé que notre cerveau génère différents types d'ondes cérébrales en fonction de notre niveau d'activité mentale. Les ondes cérébrales peuvent être enregistrées chez l'ensemble des mammifères et il est supposé qu'elles émergent de l'activité collective des neurones du cortex cérébral : la partie la plus superficielle de notre cerveau (Buzsáki et al., 2013). Il est généralement admis que différents types d'ondes cérébrales reflètent différents schémas d'activité corticale. Cependant les mécanismes sous-tendant ces schémas d'activation ne sont pas complètement compris.

Les oscillations gamma (30-80Hz) sont l'un des types d'ondes cérébrales ayant attiré le plus d'attention ces dernières années. Elles sont généralement observées durant l'éveil attentif et il a été supposé qu'elles jouent un rôle important dans la synchronisation des neurones corticaux requis dans le traitement de l'information entre des aires corticales distantes (Fries et al., 2001). Conformément à cette hypothèse, les oscillations gamma sont altérées chez les patients schizophrènes (Lewis et al., 2012). Les oscillations gamma peuvent être évoquées dans les aires visuelles du cortex grâce à des stimulations visuelles, ce qui s'est avéré un outil de choix pour étudier leur dynamique sur des modèles animaux (Gray et al., 1989). Des études récentes ont montré que les oscillations gamma sont générées par des interneurones particuliers dont la caractéristique est d'exprimer la parvalbumine (PV interneurones ; Cardin et al., 2009 ; Sohal et al., 2009). Cependant la façon dont l'activité des interneurones PV génère les oscillations gamma reste sujette à débat.

Les neurones établissent des connexions au moyen de structures appelées synapses. Les synapses inhibitrices et excitatrices reçues par un neurone donné affectent la valeur de son potentiel de membrane et le neurone devient actif quand cette valeur dépasse un seuil. Cette activation se traduit par la génération d'un signal bref appelé potentiel d'action qui active à son tour les connections synaptiques au moyen desquelles le neurone contacte son entourage. Dans cette étude, nous avons réalisé des enregistrements intracellulaires d'interneurones PV chez des souris éveillées pour comprendre comment ces dernières utilisent leurs afférences synaptiques pour générer les oscillations gamma. Nos résultats indiquent que les interneurones PV agissent ainsi lorsqu'ils sont activés collectivement par une activité synaptique excitatrice reflétant l'état général d'activation du réseau cortical. Les données représentées ici, font part d'un set d'analyses plus large soumis à un journal scientifique comportant un processus éditorial de révision par les pairs.

Méthodes

Les interneurones PV sont rares dans le réseau cortical. Pour les cibler avec des enregistrements intracellulaires, nous avons utilisé des souris transgéniques où les interneurones PV expriment une protéine fluorescente dont les propriétés sont appropriées à l'imagerie *in vivo*. Les interneurones PV ont ensuite été visualisés par microscopie bi-photonique (Denk et al., 1990). Cette technique diffère de la microscopie à fluorescence traditionnelle en ce que les échantillons sont illuminés par des photons ayant seulement la moitié de l'énergie requise pour activer la molécule fluorescente cible (dans notre cas tdTomato). De cette manière, la fluorescence ne peut survenir que si deux photons combinent leurs énergies. Cet évènement est très peu probable et survient uniquement quand les photons d'un laser pulsé sont concentrés au point focal d'une lentille puissante. En orientant le rayon du laser grâce à des miroirs, il est possible de balayer l'échantillon et de collecter les photons émis de manière à reconstituer une image. Les photons d'énergies basses pénètrent mieux dans les tissus vivants et causent relativement peu de dommages. Ainsi, cette technique de balayage laser est devenue une méthode de choix pour l'imagerie de la fluorescence in vivo.

Cette technique requiert que les souris soient placées la tête fixée sous le microscope. Pour minimiser leur inconfort, les souris sujettes à l'expérience ont été habituées à la fixation une heure par jour pendant au moins cinq jours avant l'enregistrement. Durant ce temps des récompenses régulières ont été délivrées sous forme d'eau sucrée. Le jour de l'enregistrement les souris ont été anesthésiées (isoflurane 2 %) et ont reçu une dose de buprenorphine : un analgésique à longue durée d'action (0.005 mg/kg de masse corporelle). Une craniotomie a ensuite été

réalisée de manière à permettre la visualisation du réseau et l'insertion d'électrodes. Les souris se sont vues accorder une période de deux heures de récupération avant l'enregistrement.

L'enregistrement intracellulaire des neurones PV a été réalisé grâce au patch-clamp : une technique reposant sur l'utilisation d'une pipette de verre ayant une ouverture de quelques microns de diamètre à son extrémité la plus fine. L'extrémité de l'électrode est appliquée sur la membrane du neurone cible et le 'patch' de membrane situé à l'intérieur est rompu de manière à ce que le potentiel intracellulaire devienne mesurable. Les oscillations gamma ont été détectées grâce à des enregistrements du potentiel de champ local (LFP) réalisés à l'aide d'une seconde électrode. Le LFP est une technique d'enregistrement similaire à l'EEG mais réalisée directement à l'intérieur du cerveau. Les enregistrements ont été restreints aux couches superficielles du cortex (couches 2/3) et dirigés vers le cortex visuel. Des grilles sinusoïdales défilant dans une direction déterminée ont été projetées sur un écran placé en face de l'œil de l'animal pendant l'enregistrement (**Fig. 1**). Ces signaux visuels sont bien caractérisés dans le champ de la recherche visuelle et permettent de faire la distinction entre les oscillations gamma spontanées et visuellement évoquées.

Résultats

Des enregistrements intracellulaires ont été réalisés sur un total de 10 interneurones PV. Dans les cas où l'accès intracellulaire n'a pas pu être obtenu, les interneurones PV ont été enregistrés de manière juxtacellulaire. Cette configuration ne donne pas accès au potentiel de membrane mais permet néanmoins l'enregistrement des potentiels d'actions. Cette approche a été réalisée sur 13 interneurones PV additionnels résultant à un total de 23 enregistrements.

Dans un premier temps, nous avons examiné comment le potentiel de membrane des interneurones PV variait en fonction de l'intensité des oscillations gamma détectées dans les LFP. Pour mesurer la force des oscillations en fonction du temps, nous avons divisé le LFP en courts segments (0,5s) et décomposé leurs composantes oscillatoires à des fréquences spécifiques grâce à

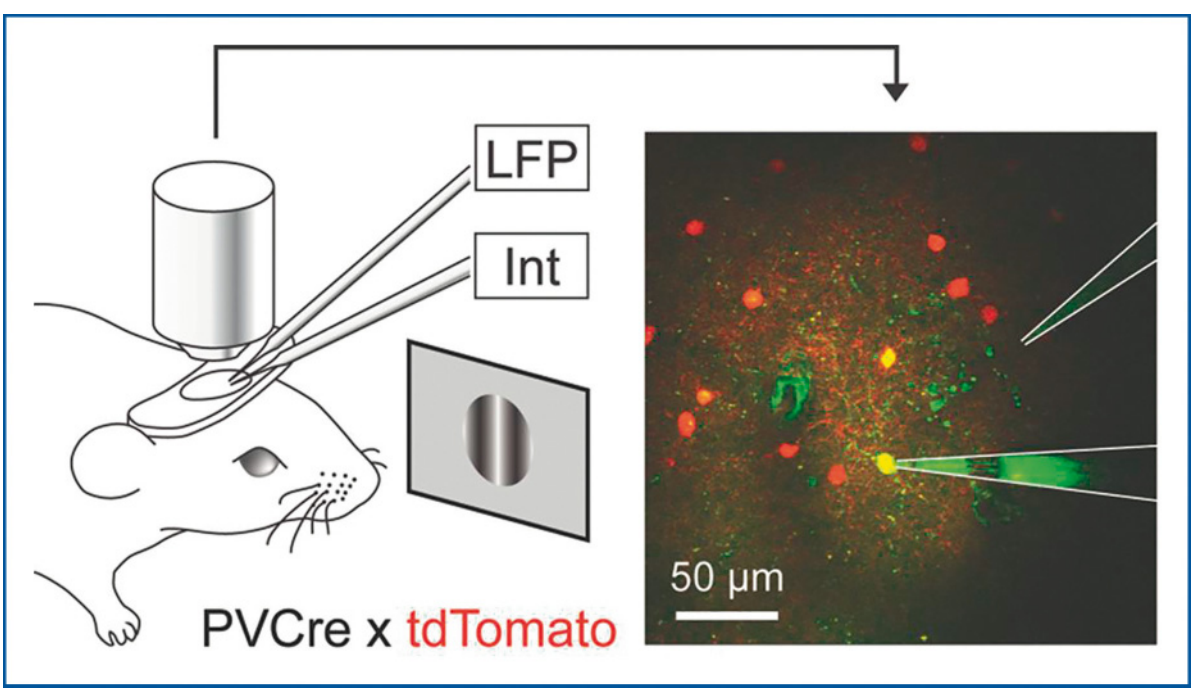


Figure 1 : Protocole expérimental : des enregistrements de LFP et des enregistrements intracellulaires (Int) ciblés par microscopie bi-photonique des interneurones PV des couches 2/3 du cortex visuel sont réalisés chez la souris éveillée lors de stimulations visuelles par des grilles défilantes. A droite : un micrographe pris durant un enregistrement.

la transformée de Fourier. Cet outil d'analyse considère le signal comme une addition infinie d'oscillations sinusoïdales. Les éléments d'une transformée de Fourier sont des nombres complexes qui représentent chacun l'amplitude et la phase des oscillations présentes dans le signal pour une fréquence donnée. L'intensité de l'oscillation peut être mesurée en prenant le carré de leur module : une mesure appelée puissance oscillatoire. La puissance des oscillations gamma a ensuite été calculée en faisant la somme de la puissance des éléments de la transformée de Fourier de fréquences comprises entre 30 et 80Hz.

Nous avons trouvé que des oscillations gamma de forte amplitude étaient évoquées par les stimulations visuelles, mais que ces oscillations survenaient également de manière spontanée. De manière remarquable, la puissance des oscillations gamma nous a paru augmenter durant les périodes où les interneurones PV étaient dépolarisés comme on peut l'observer sur la **figure 2a**. Pour quantifier ce phénomène, nous avons calculé la corrélation entre la puissance à gamma et le potentiel de membrane des interneurones PV (**Fig. 2b**). Nous avons trouvé une forte corrélation entre la puissance des oscillations gamma et la dépolarisation des interneurones pendant mais aussi en dehors des stimulations visuelles. Ceci indique que dans les deux cas, les interneurones PV génèrent les oscillations gamma en réponse à leurs afférences synaptiques excitatrices.

Pour mieux comprendre ce phénomène, nous avons filtré le LFP entre 30 et 80 Hz de manière à isoler les cycles individuels des oscillations gamma et avons trié ces cycles en 5 groupes en fonction de leur amplitude (**Fig. 3a**). Puis, nous avons aligné les segments du potentiel de membrane des interneurones PV enregistrés simultanément (n=10) et calculé leur moyenne (**Fig. 3b**). Nous avons trouvé que le potentiel de membrane des interneurones PV était décroissant durant les cycles des oscillations gamma d'amplitudes faibles et croissant durant les oscillations d'amplitudes fortes (**Fig. 3c**). Ainsi, les oscillations gamma apparaissent quand l'activité des afférences excitatrices des neurones PV croit en intensité. De plus, nous avons observé que le potentiel de membrane moyen des interneurones PV se synchronisait aux oscillations gamma durant les oscillations de forte amplitude. Ceci indique que les oscillations gamma apparaissent quand les interneurones synchronisent les dynamiques de leur potentiel de membrane.

Nous nous sommes ensuite demandés comment ce phénomène se traduisait au niveau de l'activité efférente des interneurones PV.

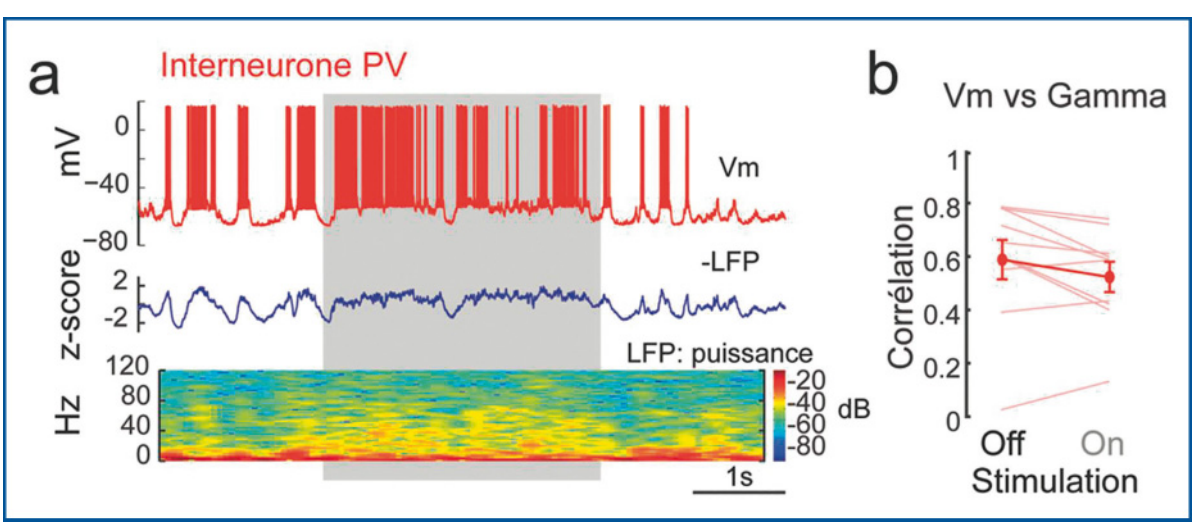


Figure 2 (a) : Enregistrement simultané du LFP et du potentiel de membrane (Vm) d'un interneurone PV (en haut : enregistrement intracellulaire ; au milieu : LFP inversé ; en bas : représentation spectro-temporelle du LFP ; rectangle gris : période de stimulation visuelle). **(b)** Le potentiel de membrane est corrélé à la puissance des oscillations gamma chez les interneurones PV (n= 10), (lignes fines : neurones individuels ; ligne épaisse et disques pleins avec barres d'erreur : moyenne +/- erreur standard).

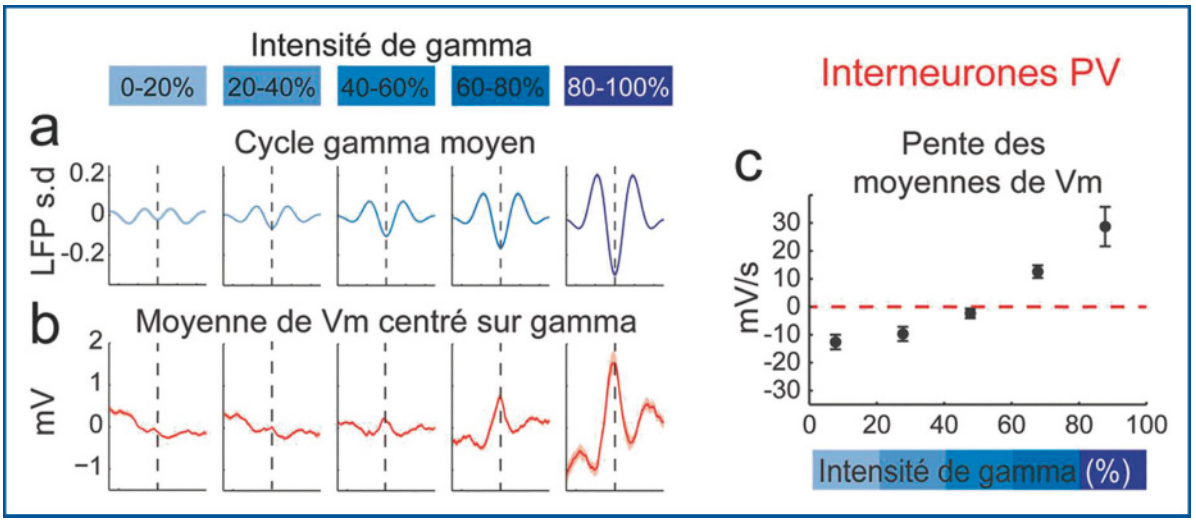


Figure 3 (a) : Moyenne générale de segments du LFP filtrés à gamma en fonction de l'amplitude de gamma au minimum de l'oscillation (n=10 ; aire ombrée : +/- erreur standard). **(b)** Moyenne générale des segments du potentiel de membrane des interneurones PV enregistrés simultanément (n=10 ; aire ombrée : +/- erreur standard). **(c)** Moyenne générale de la pente d'une approximation linéaire des segments du potentiel de membrane des interneurones PV centrés sur gamma (n=10 ; barres d'erreur : erreur standard).

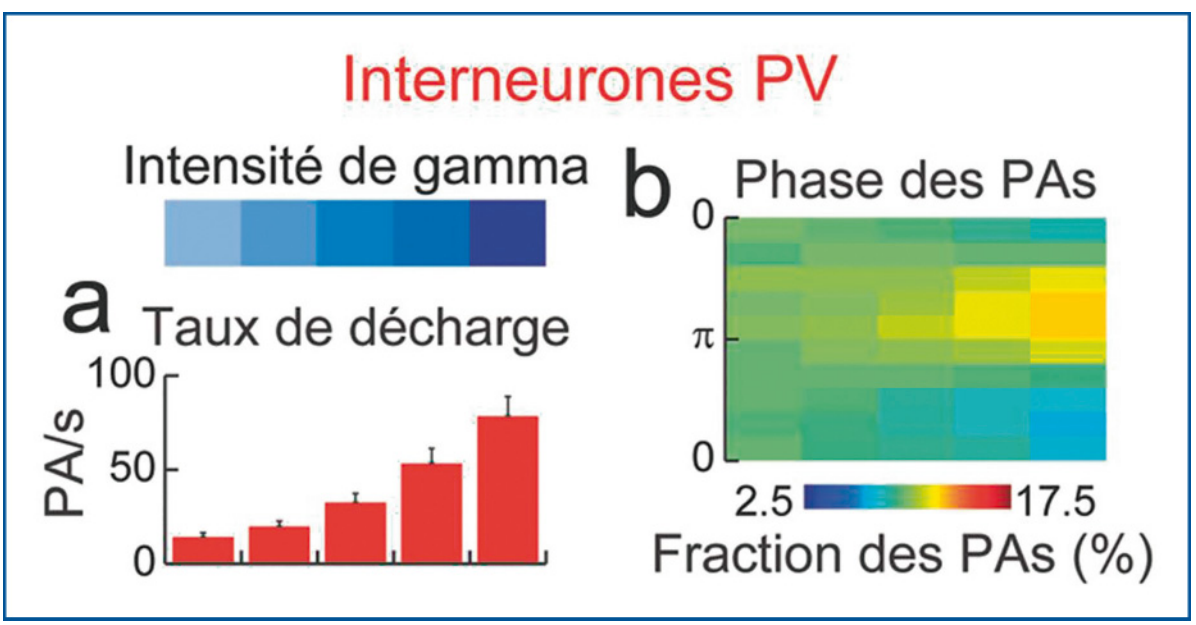


Figure 4 (a) : Moyenne générale du taux de décharge des interneurones PV en fonction de l'amplitude de gamma au moment du potentiel d'action (n=23 ; barres d'erreur : erreur standard). **(b)** Les potentiels d'action (PA) des interneurones PV surviennent majoritairement au minimum de gamma lors des oscillations gamma d'amplitude forte (code couleur (bas) : proportion des potentiels d'actions dans 10 sous-divisions de la phase de gamma en fonction de l'amplitude des oscillations gamma au moment de leur émission).

Pour cela, nous avons trié les potentiels d'actions des interneurones PV (n=23) en cinq groupes en fonction de l'amplitude des oscillations gamma au moment de leur émission. Nous avons trouvé que les interneurones PV émettaient plus de potentiels d'actions durant les oscillations gamma de forte intensité **(Fig. 4a)** ce qui nous confirme que les oscillations gamma surviennent quand

ces derniers sont fortement activés. Nous avons ensuite trié les potentiels d'actions en fonction de la phase des oscillations gamma à laquelle ils étaient survenus (**Fig. 4b**). Il est apparu que pendant les cycles d'intensité faible, les potentiels d'actions ne présentent pas de préférence de phase ce qui indique qu'ils ne sont pas entraînés rythmiquement. Par contre, nous avons trouvé que les potentiels d'action survenaient préférentiellement en phase avec gamma durant les oscillations fortes. Ainsi nos données montrent que les oscillations gamma surviennent quand les interneurones PV synchronisent leur activité efférente.

Discussion

Les oscillations gamma (30-80Hz) sont habituellement observées dans l'EEG pendant l'éveil attentif et il a été supposé qu'elles jouent un rôle important dans le traitement des informations au niveau du cortex ainsi que dans la synchronisation des assemblées cérébrales (Buszáki et Wang, 2012 ; Fries, 2009). Des études récentes ont montré que les oscillations gamma émergent de l'activité des interneurones PV (Cardin et al., 2009 ; Sohal et al., 2009). Cependant, la nature des afférences qui stimulent les interneurones PV durant l'émergence des oscillations gamma reste peu claire.

Pour répondre à cette question, nous avons caractérisé l'activité intracellulaire des interneurones PV durant les oscillations gamma. En effet, les dynamiques du potentiel de membrane sont une réflexion de l'activité synaptique reçue par un neurone et ces dernières conditionnent à leur tour sa décharge de potentiels d'action. Nous avons trouvé que la puissance des oscillations gamma était corrélée aux valeurs du potentiel de membrane des neurones PV et que les oscillations gamma de forte amplitude surviennent lorsque ces valeurs augmentent. Ainsi nos données montrent que les oscillations gamma émergent en réponse à l'activité synaptique excitatrice reçue par les interneurones PV.

On peut dès lors, se poser la question de la provenance de cette activité excitatrice. Dans les couches superficielles du cortex où nos enregistrements ont été effectués, des études ont montré que les interneurones PV reçoivent un afflux synaptique convergeant provenant des couches corticales plus profondes (Atallah et al., 2012 ; Pfeffer et al., 2013). L'activité de ces synapses est fortement corrélée et reflète le niveau d'activation général du cortex (Petersen et Crochet, 2013). Ainsi nos données indiquent que les interneurones PV génèrent les oscillations gamma lorsque le niveau d'activation du cortex devient suffisamment fort.

Si nos enregistrements ne permettent pas une observation directe des mécanismes sous-tendant la génération des oscillations gamma, nos données concordent avec un modèle d'oscillations gamma particulier appelé 'Pyramidal Interneuron Gamma Network' (PING), (Tiesinga et Sejnowski, 2009). Ceci, nous amène à proposer le mécanisme suivant. Premièrement, le niveau d'activité corticale devient suffisant pour qu'un nombre important d'interneurones PV soit activé au même moment. Comme les interneurones PV sont inhibiteurs et fortement connectés (Pfeffer et al., 2013), cette activation est suivie par une inhibition synchrone qui abaisse les valeurs de leur potentiel de membrane. Les interneurones PV récupèrent ensuite de cette inhibition et leur activation collective déclenche un nouveau cycle (comme observé sur les figures 3 et 4).

L'activité synchrone des interneurones PV que nous avons caractérisée ici, synchronise les neurones excitateurs durant les oscillations gamma de manière à optimiser le transfert d'information aux structures avales (Knoblich et al., 2010 ; Siegle et al., 2014). Ce processus est altéré chez les patients schizophrènes ce qui est supposé compter pour une part importante de leurs symptômes (Lewis et al. 2012). En conséquence, les interneurones PV représentent une cible thérapeutique intéressante pour le traitement de leur maladie. Ainsi, nous espérons que nos résultats, bénéficieront aux études futures pointant dans cette direction.

Remerciements

Je voudrais remercier la Fondation Fyssen de m'avoir donné la chance d'effectuer ma recherche post-doctorale à l'Université d'Amsterdam ainsi que Luc Gentet qui m'a supervisé et m'a appris comment effectuer des enregistrements chez la souris éveillée pendant les deux dernières années. Finalement, je voudrais remercier Cyriel Pennartz pour le soutien qu'il a apporté à notre projet.

Bibliographie

- Atallah, B.V., Bruns, W., Carandini, M., and Scanziani, M. (2012). Parvalbumin-expressing interneurons linearly transform cortical responses to visual stimuli. Neuron *73*, 159–170.
- Buzsáki, G., and Wang, X.-J. (2012). Mechanisms of gamma oscillations. Annu. Rev. Neurosci. *35*, 203–225.
- Buzsáki, G., Logothetis, N., and Singer, W. (2013). Scaling brain size, keeping timing: evolutionary preservation of brain rhythms. Neuron *80*, 751–764.
- Cardin, J.A., Carlén, M., Meletis, K., Knoblich, U., Zhang, F., Deisseroth, K., Tsai, L.-H., and Moore, C.I. (2009). Driving fast-spiking cells induces gamma rhythm and controls sensory responses. Nature *459*, 663–667.
- Denk, W., Strickler, J.H., and Webb, W.W. (1990). Two-photon laser scanning fluorescence microscopy. Science *248*, 73–76.
- Fries, P. (2009). Neuronal gamma-band synchronization as a fundamental process in cortical computation. Annu. Rev. Neurosci. *32*, 209–224.
- Fries, P., Reynolds, J.H., Rorie, A.E., and Desimone, R. (2001). Modulation of oscillatory neuronal synchronization by selective visual attention. Science *291*, 1560–1563.
- Gray, C.M., König, P., Engel, A.K., and Singer, W. (1989). Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties. Nature *338*, 334–337.
- Knoblich, U., Siegle, J.H., Pritchett, D.L., and Moore, C.I. (2010). What do we gain from gamma ? Local dynamic gain modulation drives enhanced efficacy and efficiency of signal transmission. Front. Hum. Neurosci. *4*, 185.
- Lewis, D.A., Curley, A.A., Glausier, J.R., and Volk, D.W. (2012). Cortical parvalbumin interneurons and cognitive dysfunction in schizophrenia. Trends Neurosci. *35*, 57–67.
- Petersen, C.C.H., and Crochet, S. (2013). Synaptic computation and sensory processing in neocortical layer 2/3. Neuron *78*, 28–48.
- Pfeffer, C.K., Xue, M., He, M., Huang, Z.J., and Scanziani, M. (2013). Inhibition of inhibition in visual cortex: the logic of connections between molecularly distinct interneurons. Nat. Neurosci. *16*, 1068–1076.
- Siegle, J.H., Pritchett, D.L., and Moore, C.I. (2014). Gamma-range synchronization of fast-spiking interneurons can enhance detection of tactile stimuli. Nat. Neurosci. *17*, 1371–1379.
- Sohal, V.S., Zhang, F., Yizhar, O., and Deisseroth, K. (2009). Parvalbumin neurons and gamma rhythms enhance cortical circuit performance. Nature *459*, 698–702.
- Tiesinga, P., and Sejnowski, T.J. (2009). Cortical enlightenment: are attentional gamma oscillations driven by ING or PING? Neuron *63*, 727–732.

Introduction

The first electroencephalogram (EEG) of the human brain was recorded in 1928 by Hans Berger, a German psychiatrist, as an attempt to identify telepathic signals. While this proved predictably unsuccessful, Berger discovered the first evidence that the brain generates an oscillatory electrical activity that we now call brain waves. EEG has since become a popular tool in psychology and neuroscience and years of research have revealed that our brain generates different kinds of brain waves as a function of our mental state. Brain waves can also be recorded in other mammals and are believed to arise from the collective activity of the neurons of the cerebral cortex, the most superficial part of our brain (Buzsáki et al., 2013). Different types of brain waves are believed to reflect different patterns of cortical activity. However, the mechanisms underlying these activation patterns are not fully understood.

Gamma oscillations (30-80Hz) are one of the types of brain waves having attracted the most attention in the latest years. They are generally observed during attentive wakefulness and are believed to play an important role in the synchronization of cortical neurons required for long range cortical processing (Fries et al., 2001). Accordingly, gamma oscillations are impaired in schizophrenic patients (Lewis et al., 2012). Gamma oscillations can be evoked in the visual areas of the cortex using visual stimulation which has proved a valuable tool to study their dynamics in model animals (Gray et al., 1989). Recent studies have shown that gamma oscillations are generated by particular inhibitory neurons expressing parvalbumin (PV interneurons; Cardin et al., 2009; Sohal et al., 2009). However, the

way the activity of PV interneurons generates gamma oscillation remains a subject of debate.

Cortical neurons contact each other by means of structures called synapses. The excitatory and inhibitory synapses received by a neuron affect the value of its membrane potential and the neuron becomes active when this value reaches a threshold. This activation translates in the generation of a brief signal called action potential which in turn activates the synaptic connections that the neuron makes with its surrounding. In this study, we performed intracellular recordings of PV interneurons in awake mice to understand how they use their synaptic input to generate gamma oscillations. Our results indicate that PV interneurons do so when they are collectively excited by a common excitatory input reflecting the general level of cortical activity. The data represented here are part of larger set of analyses which is submitted to a peer-reviewed journal.

Methods

PV interneurons are rare in the cortical network. In order to target them with intracellular recordings we used transgenic mice where PV interneurons express tdTomato: a red fluorescent protein whose properties are suited for *in vivo* imaging. PV interneurons were then visualized using two-photon microscopy (Denk et al., 1990). This technique differs from traditional fluorescence microscopy in that samples are illuminated with photons having only half the energy required to activate the desired fluorescent molecule (in our case tdTomato). Thus fluorescence can only occur when two photons combine their energies. This event is very improbable and only occurs when the photons of a pulsed laser source are concentrated into the focal point of a powerful lens. By orienting the laser beam with mirrors it is then possible to scan the sample and collect emitted photons to reconstitute an image. Photons of lower energy penetrate better into living tissues and cause relatively little damage. Thus, this laser-scanning technique has become the method of choice to image fluorescence in living animals.

This technique requires that mice be head fixed under the microscope. In order to minimize their discomfort mice were habituated to head fixation 1 hour per day while being given regular rewards in the form of sweet water. This habituation was performed for at least five days prior to recording. On the day of recording, animals were anesthetized (isoflurane 2%) and administered with the long-lasting analgesic buprenorphine (0.005 mg /kg bodyweight). Then a small craniotomy was performed to allow the insertion of recording electrodes. Mice were allowed to wake up for 2 hours before recording.

Intracellular recordings were performed with patch-clamp: a technique relying on fine glass electrodes whose aperture is a few microns in diameter. The tip of the electrode was applied to the membrane of targeted neurons and the small patch of membrane situated inside the tip was ruptured so that the intracellular potential of the cells become measurable. In order to detect gamma oscillations, local field potentials (LFP) were recorded with a second electrode. LFPs are recordings which are similar to EEGs but are performed directly inside the brain (**Fig. 1**). Recordings were restricted to the superficial layers of the cortex (layer 2/3) and targeted to the visual cortex. Drifting gratings were displayed on a small screen placed in front of the eye of the animal while recordings were performed. These stimuli are well characterized in visual research and allow us to make a distinction between spontaneous and visually evoked gamma oscillations (**Fig. 1**).

Results

Intracellular recordings were performed on a total of 10 PV interneurons. When intracellular access could not be achieved, PV interneurons were recorded juxtacellularly, which does not give access to the membrane potential but still allows to record action potentials. This approach was performed on 13 additional PV interneurons yielding a total of 23 recordings.

We first examined how the membrane potential of PV interneurons co-varied with the strength of gamma oscillations recorded in the LFP (**Fig. 2a**). In order to measure the oscillatory strength over time, we divided LFPs into short overlapping segments (0.5s) and decomposed individual frequency components in each using a Fourier transform. This analytical tool considers the signal as a sum of sinusoidal oscillations. The elements of a Fourier transform are complex numbers each representing the amplitude and the phase of oscillations in the signal for a given frequency. Oscillatory strength can be measured by taking the square of their modulus: a measure

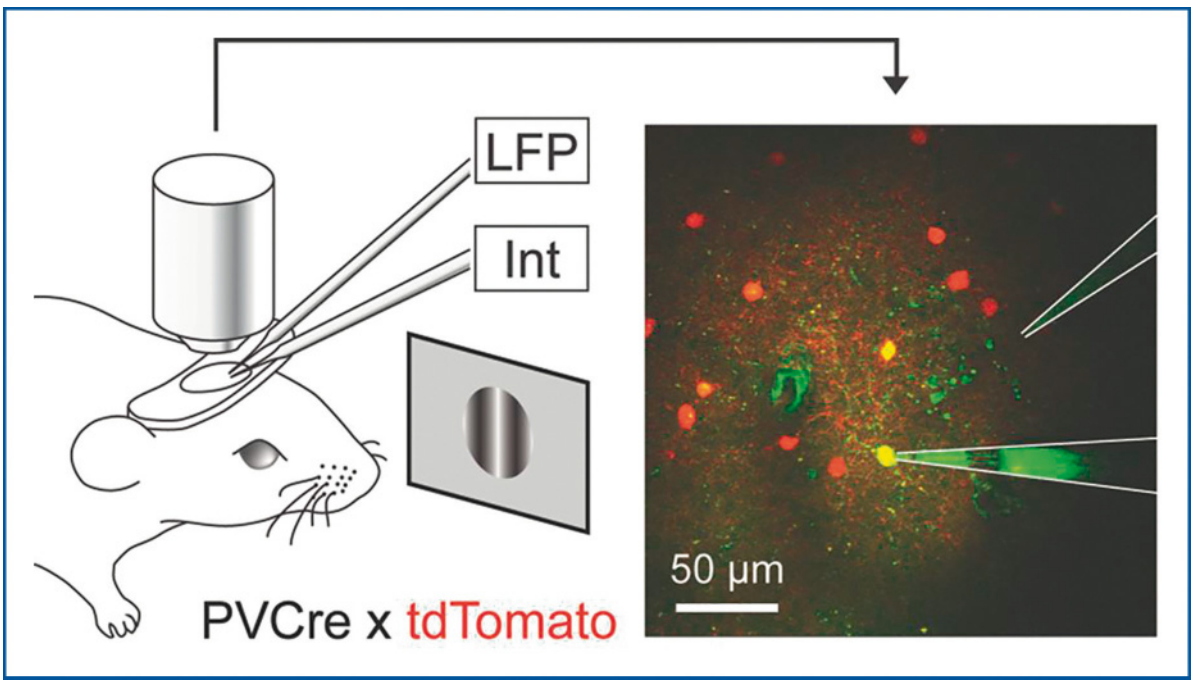


Figure 1 : Experimental design: LFP and two-photon targeted intracellular (Int) recordings of PV interneurons from layer 2/3 of the visual cortex are performed in awake mice visually stimulated with drifting gratings. Right: micrograph taken during an example PV whole-cell recording.

called oscillatory power. Gamma power was then computed as the sum of power values for the element of the Fourier series situated between 30 and 80Hz.

Strong gamma oscillations were evoked by visual stimulation but also occurred spontaneously. Most importantly, as can be seen on **figure 2a**, gamma power increased when the membrane potential of PV interneurons depolarized. In order to quantify this phenomenon we calculated the correlation between gamma power and the membrane potential of PV interneurons (**Fig. 2b**). Gamma power was correlated with the values of the membrane potentials in most neurons (n=10) during and outside visual stimulation. This indicated that in both cases, PV interneurons generate gamma oscillations as a response to their excitatory synaptic input.

In order to understand this, we filtered the LFP between 30 and 80Hz in order to isolate single gamma oscillatory cycles and sorted these cycles in five groups as a function of their amplitude (**Fig. 3a**). Then, we aligned segments of the membrane potential of PV interneurons recorded synchronously (n=10) and computed their average (**Fig. 3b**). The membrane potential was decreasing during weak gamma cycles and increasing during strong gamma cycles (**Fig. 3c**). Thus, gamma oscillations emerged when the excitatory input of PV neurons increased in strength. In addition, during strong gamma oscillations, the average membrane potential of PV interneurons became synchronized to the gamma cycle (**Fig. 3b**). Thus our result indicate that gamma oscillations arise when PV interneurons synchronize the oscillation of their membrane potentials.

We next asked how this was translated at the level of the output of PV interneurons. Therefore, we sorted the action potentials of PV interneurons (n=23) in five groups as a function of the strength of gamma cycles at the time they occurred. PV interneurons emitted more spikes during strong gamma cycles (**Fig. 4a**) which confirms that gamma oscillations occur when they are strongly activated. We then ordered action potentials as a function of the phase of gamma cycles at the time of their peak (**Fig. 4b**).

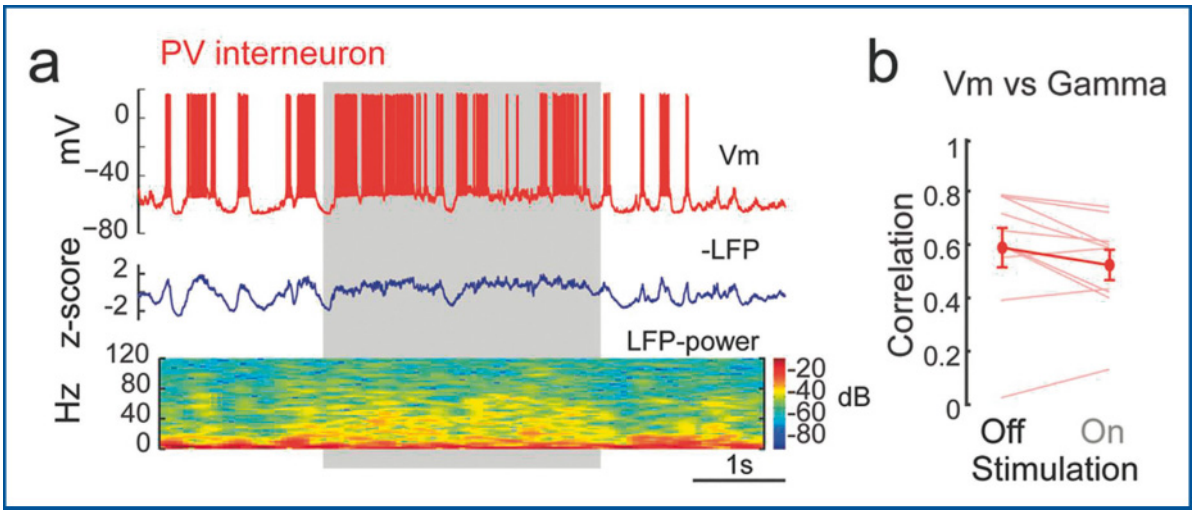


Figure 2 (a) : Simultaneous LFP and intracellular recordings of a PV (Top: intracellular recording; Middle: inverted LFP recording; Bottom: spectro-temporal representation of the LFP; grey rectangle: visual stimulation period). **(b)** Membrane potential is correlated with gamma power in PV interneurons (n=10) (thin lines: individual neurons; thick line and filled circles with error bars: mean +/- s.e.m).

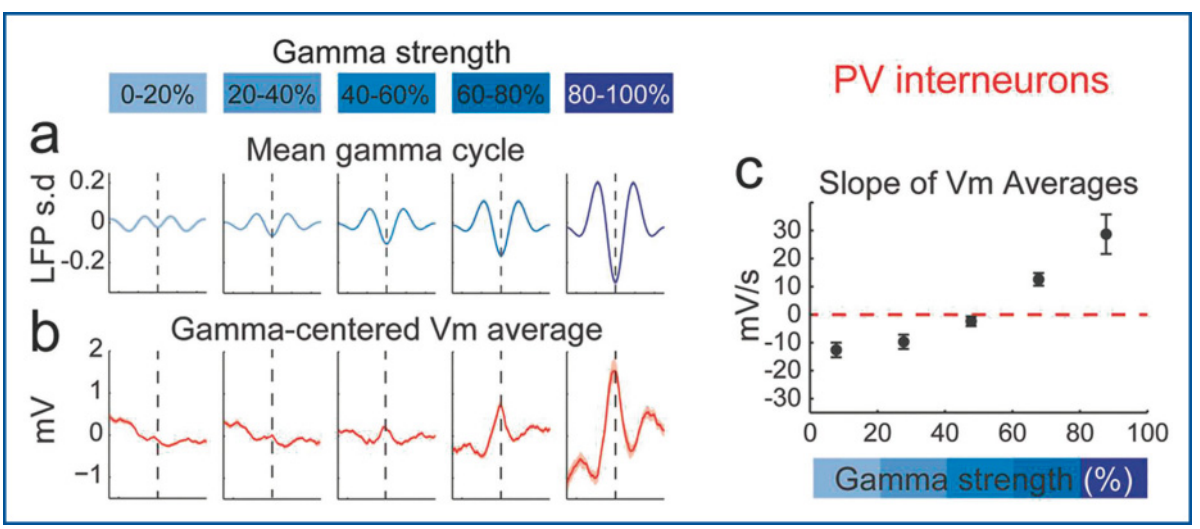


Figure 3 (a) : Grand mean of trough-centered segments of the gamma-filtered LFP, (a) as a function of gamma strength at trough time (n=10; shaded areas: +/- s.e.m.). **(b)** Grand mean of simultaneously recorded segments of the membrane potential of PV interneurons (n=10; shaded areas: +/- s.e.m.). **(c)** Grand mean slope of linear fits to gamma-centered Vm averages (n=10; error bars: s.e.m.).

During weak gamma cycles, action potentials did not show a preference of phase which indicates that they were not entrained rhythmically. However the action potentials of PV interneurons accumulated just before the trough of cycles during strong gamma oscillations. Thus our data show that strong gamma activity synchronizes the output of PV interneurons.

Discussion

Gamma oscillations (30-80Hz) are usually observed in the EEG during attentive wakefulness and are believed to play an important role in cortical processing by synchronizing neuronal ensembles (Buzsáki and Wang, 2012; Fries, 2009). Recent studies have shown that gamma

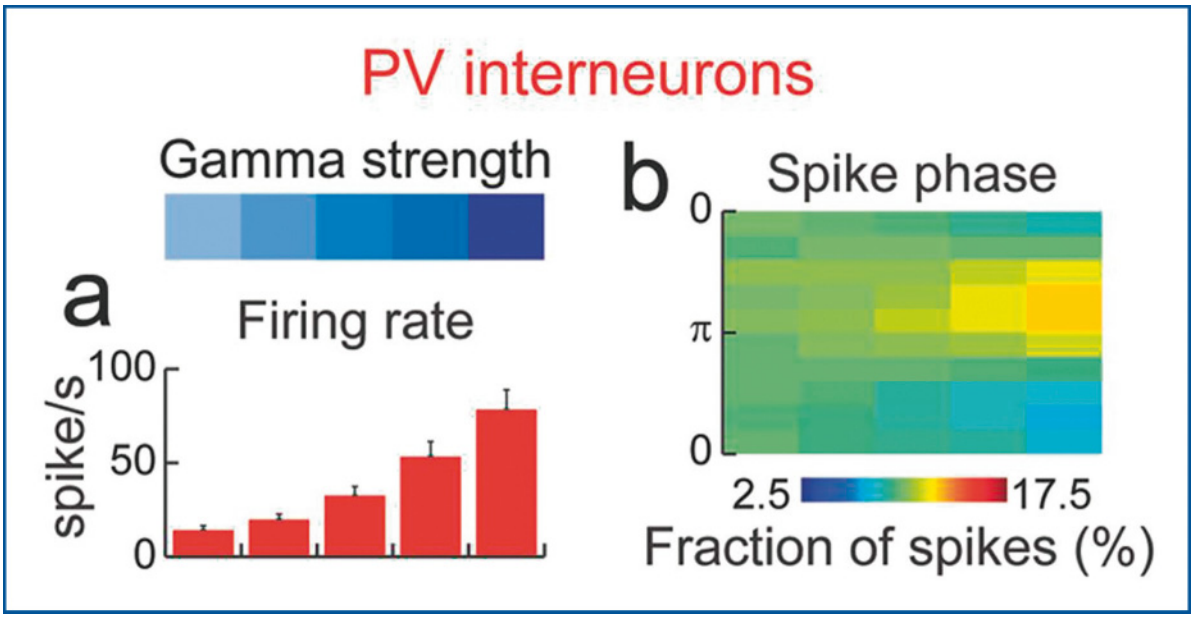


Figure 4 (a) : Grand mean firing rate of PV interneurons as a function of gamma amplitude at spike time (n=23; error bars: s.e.m.). **(b)** PV spikes occur preferentially before the trough of strong gamma outside visual stimulation (color-code (bottom): fraction of spikes falling in one of ten bins of gamma phase as a function of gamma strength at spike time).

oscillations arise from the activity of PV interneurons (Cardin et al., 2009; Sohal et al., 2009). However the nature of the input driving PV interneurons during the emergence of gamma oscillations is currently unclear.

To address this question, we characterized the intracellular correlates of gamma oscillations in PV interneurons. Indeed intracellular dynamics are a reflection of the synaptic input of a neuron, which in turn conditions its output. We found that the power of gamma oscillations was correlated with the values of the membrane potential of PV interneurons and that strong gamma oscillations occurred when these values were increasing. Thus our data indicate that gamma oscillations emerge as a response to the excitatory synaptic input received by PV interneurons.

Where then does this excitatory input come from? In the superficial layers of the cortex, where our recordings were performed, previous studies have shown that PV interneurons receive a strong convergent excitatory input coming from deeper cortical layers (Atallah et al., 2012; Pfeffer et al., 2013). This input is highly correlated between PV interneurons and reflects the activation of the cortical network as a whole (Petersen and Crochet, 2013). Thus our data indicate that PV interneurons generate gamma oscillations when the level of activation of the cortex becomes sufficiently strong.

While our recordings did not provide a direct observation of the mechanisms underlying the generation of gamma oscillations by PV interneurons, our data are strongly consistent with a model of gamma oscillation called a Pyramidal Interneuron Network Gamma (PING), (Tiesinga and Sejnowski, 2009). This leads us to propose the following mechanisms. First, cortical activity becomes strong enough to activate a sufficient number of PV interneurons at the same time. As PV interneurons are inhibitory and make strong connections with one another (Pfeffer et al., 2013), this activation results in a synchronous inhibitory synaptic potential which deflects the membrane potential of PV interneurons downward. PV interneurons then recover from inhibition collectively which activates them synchronously and triggers another cycles (as we observed in figure 3 and 4).

The rhythmic activity of PV interneurons which we have characterized here synchronizes excitatory neurons during gamma oscillations so as to

optimize the transfer of information to receiving structures (Knoblich et al., 2010; Siegle et al., 2014). This process is impaired in schizophrenic patients which is believed to account for an important part of their symptoms (Lewis et al., 2012). As a consequence PV interneuron represent attractive therapeutic targets for the treatment of their disease. We thus hope that our results will benefit future studies aiming in this direction.

Acknowledgement

I would like to thank the Fyssen Foundation for giving me the chance to perform post-doctoral research at the University of Amsterdam as well as Luc Gentet who has supervised me and taught me how to perform awake recordings during the last two years. Finally I would like to thank Cyriel Pennartz for the support he brought to our project.

L'origine du menton des hommes modernes revisitée via la comparaison des changements ontogénétiques entre les primates humains et non-humains

Michael COQUERELLE

Department of Stomatology, University Rey Juan Carlos, Alcorcon, Spain.

Résumé

Au cours de l'évolution humaine, la dimension horizontale de l'appareil vocal s'est réduite mais pas la taille relative de la langue, ce qui implique un réarrangement de l'espace postérieur de l'appareil vocal afin de permettre la respiration et la déglutition. Cela peut avoir laissé une signature morphologique comme un menton (proéminence mentonnière), qui peut potentiellement être interprété chez les individus fossiles ou actuels du genre *Homo*. Cette étude teste l'hypothèse selon laquelle les changements dans le développement de la zone du menton chez les fœtus et les nourrissons chimpanzés humains sont liés à la restriction de l'espace postérieur de l'appareil vocal. Les résultats soutiennent cette hypothèse, montrant la proéminence mentonnière comme un sous-produit de contraintes de développement corrélées avec une langue élargie. Les différentes formes de proéminence de la région mentonnière vue chez les hominidés fossiles sont probablement liées à des contraintes ontogénétiques équivalentes.

Mots-clés

Ontogénie, menton, langue, squelette cervico-craniofaciale, évolution humaine

The origin of the human chin revisited through comparison of ontogenetic changes between human and non-human primates

Abstract

During the course of human evolution, the horizontal dimension of the vocal tract has reduced but not the relative size of the tongue, implying a rearrangement of the space at the back of the vocal tract to allow breathing and swallowing. This may have left a morphological signature such as a chin (mental prominence) that can potentially be interpreted in extinct and extant *Homo*. The study tests the hypothesis that developmental changes of the chin area in chimpanzee fetuses and modern human infants are driven by the space restriction at the back of the vocal tract. The results support this hypothesis, showing the mental prominence as a by-product of developmental constraints correlated with an enlarged tongue. The different forms of protrusions seen in extinct hominids likely originate from equivalent ontogenetic constraints.

Keywords

Ontogeny, chin, tongue, cervico-craniofacial skeleton, human evolution

Introduction

Pour comprendre comment nous, les humains, arrivons à avoir une face orthognathe (c'est-à-dire, une face placée sous la base antérieure du crâne) avec une mandibule affichant une région mentonnière proéminente (le menton) en comparaison avec d'autres primates, il est vital de pouvoir adéquatement interpréter les fossiles de

notre propre évolution. A ces fins, nous devons être en mesure de tirer des conclusions sur la croissance et le développement de restes fossilisés en comparant leur anatomie avec celle de nos proches parents. Chez les primates, les aspects de la morphologie externe du squelette de la face sont souvent utilisés pour définir les espèces et présentent donc un intérêt particulier. La comparaison des changements ontogénétiques entre les primates humains et non-humains est fondamentale pour interpréter la valeur évolutive et taxonomique des variations observées chez certains hominidés fossiles.

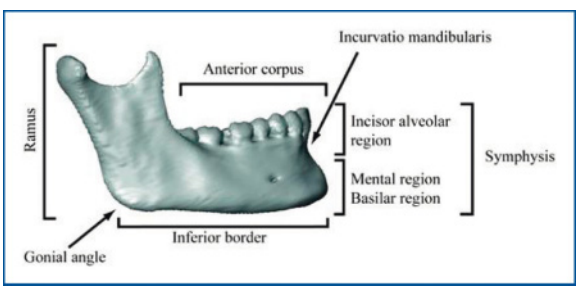


Figure 1 : Le menton humain (proéminence mentonnière). Mandibule d'un homme moderne adulte avec l'appellation des régions anatomiques.

L'origine de la proéminence mentonnière de la symphyse mandibulaire des hommes modernes (**Fig. 1**) a été longuement débattue au regard de la réduction de la taille des dents (Hrdlicka 1911 ; Riesenfeld 1969), du langage articulé (Walkhoff 1904 ; Dubrul & Sicher 1954 ; Ichim *et al.* 2007), et des contraintes masticatrices (Deagling 1993 ; Dobson & Trinkaus 2002 ; Ichim et al. 2006 ; Gröning *et al.* 2011). Cependant, aucune de ces études n'a fourni d'arguments évolutifs et développementaux convaincants pour comprendre pourquoi les hommes modernes ont une région mentonnière proéminente. De plus, le menton a longtemps été considéré comme un caractère définissant seulement les humains modernes (Stringer et al. 1984). Pourtant, différentes formes de protrusion de la région mentonnière ont été identifiées chez différents hominidés fossiles autres qu'*Homo sapiens*, par exemple les Néandertaliens adultes Guattari 3, La Quina 9, Saint Césaire, Vindja 206, ainsi que les spécimens d'Atapuerca AT605 et AT300 (Ascenzi & Sergi 1971a-b ; Wolpoff 1980 ; Wolpoff *et al.* 1981 ; Smith 1984 ; Frayer *et al.* 1993 ; Lieberman 1995 ; Rosas 1995 ; Lam *et al.* 1996 ; Mallegni & Tinkaus 1997 ; Rosas & Bastir 2004). En conséquence, la proéminence de la région mentonnière reste une caractéristique confuse d'un point de vue évolutif et développemental. Pour interpréter ces différentes formes de protubérance dans le registre fossile humain, on peut se demander si elles peuvent être considérées comme des caractéristiques morphologiques ontogénétiquement équivalentes ou non. Est-ce que la proéminence mentonnière aurait émergée d'une voie commune de développement liée à des changements identiques de la configuration cervico-cranio-faciale ? Si cela est vrai, cela peut impliquer que la proéminence mentonnière a une faible valeur taxonomique parce que, durant l'évolution humaine, nos ancêtres et nous-mêmes avons fait face à des contraintes identiques de développement, surtout la capacité à respirer et à avaler.

Évolution

Ces contraintes peuvent être suggérées parce qu'au cours de l'évolution humaine, avec l'introduction de la viande dans le régime alimentaire et l'invention de la cuisine (Milton 1999 ; Wrangham *et al.* 1999 ; Wrangham & Carmody 2010), des changements radicaux eurent lieu au niveau de la base du crâne, en raison de l'élargissement du cerveau, et au niveau de la face et des dents, caractérisés par la réduction du prognathisme et de la taille (Enlow 1990 ; Bastir *et al.* 2011, Lierberman *et al.* 2001 ; Bastir & Rosas 2004 ; Lieberman 2011). Parce que la face repositionne sous la base antérieure du crâne et plus proche des vertèbres cervicales, la dimension antéro-postérieure de l'appareil vocal réduit de manière relative et absolue. En revanche, la taille relative de la langue humaine n'a pas été réduite (Lieberman 2011 ; Negus 1949). Comme chez les chimpanzés, la langue humaine est longue et plate à la naissance, occupant presque toute la bouche, et laissant peu de place pour les voies aériennes entre le fond de la cavité buccale et les vertèbres cervicales. La forme de la langue néonatale est également associée à un larynx haut placé. Fonctionnellement, une telle configuration est vraisemblablement liée à l'allaitement maternel (Lieberman 2011). Mais par la suite, lors du début de la croissance postnatale, comment l'homme moderne adapte -t-il sa grande langue aux contraintes d'espace ? Poussé par le besoin de respirer et d'avaler en toute sécurité,

l'importance de la région mentonnière peut résulter de la nécessité d'espace à l'arrière de l'appareil vocal lié à la configuration spatiale et à la taille de la langue (Dubrul & Sicher 1954). Cette étude vise à tester cette hypothèse via l'analyse comparative du début du développement chez les hommes modernes et chez les chimpanzés.

Chez les hominidés fossiles avec une région mentonnière proéminente, la croissance mandibulaire peut avoir été associée à des contraintes spatiales semblables à celles qui caractérisent les humains modernes. La préservation du registre d'hominidé fossile ne permet pas d'aborder cette question de façon empirique. Néanmoins, l'étude de l'ontogenèse pré- et postnatale des humains et des chimpanzés permet d'identifier les similitudes morphologiques et les sources de variation soulignant leurs changements phylogénétiques (Debeer 1958 ; Gould 1977 ; Wagner 1989 ; Lierberman 1999 ; Laubicher 2000). De plus, les crânes de singes africains et des hommes modernes ont des schémas similaires d'intégration du développement, ce qui implique que les effets des facteurs communs sont assez conservés parmi les hominoïdes (Mitteroecker & Bookstein 2008 ; Ackermann 2002, 2005 ; Coquerelle *et al.* 2010). Nous émettons l'hypothèse que les schémas de l'intégration du développement de la cavité buccale sont également conservés parce que tous les primates sont sujets à la même pression de sélection pour maintenir une cavité orale suffisamment ouverte pour respirer et avaler.

Développement

Chez les hommes modernes et les chimpanzés, le développement de la symphyse mandibulaire passe par des étapes semblables mais à des moments différents. Cela comprend le déplacement antérieur de la région mentonnière conduisant à une symphyse verticale avec une protubérance mentonnière chez les fœtus chimpanzés, mais conduisant à une proéminence mentonnière chez les nourrissons humains (Coquerelle *et al.* 2010). Chez les nourrissons humains modernes et en regardant la région symphysaire seule, il a été démontré que la projection antérieure de la région mentonnière est corrélée avec le repositionnement de la langue et les insertions musculaires supra-hyoïdiennes de la face linguale de la région mentonnière (Coquerelle *et al.* 2013). Lorsque l'ensemble du complexe cervico-craniofacial est pris en considération, les changements de la conformation symphysaire paraissent répondre à la restriction de l'espace horizontal de la région postérieure de l'appareil vocal. La restriction de cet espace est causée à la fois par le positionnement postérieur de la face moyenne et supérieure concomitant avec la flexion de la base du crâne, et le positionnement antérieur de la colonne cervicale et de l'os hyoïde dû au développement de la posture verticale (Coquerelle *et al.* 2013). Dans un tel contexte développemental, il est encore plus frappant de constater que la large langue doit tenir dans la petite cavité buccale et elle le fait en remodelant sa forme néonatale. Cela est susceptible de modifier en même temps la position et l'orientation des muscles supra-hyoïdiens et l'os hyoïde situé en dessous de la langue tout en maintenant la capacité à respirer et à avaler en toute sécurité.

Chez les fœtus chimpanzés, les changements de conformations semblables à ceux observés à la symphyse pendant le développement se produisent dans un environnement différent, l'utérus. Au cours de la vie fœtale, le tractus aérodigestif est rempli de liquide amniotique et les fonctions pharyngées et laryngées commencent à la fin du premier trimestre. La respiration fœtale du liquide amniotique à faible débit et les mouvements de basses fréquences de la langue lors de la déglutition contribuent à façonner et à maintenir la forme du tractus aérodigestif (Pritchard 1966 ; Moss 1968 ; Duenhoelter & Pritchard 1976 ; Miller *et al.* 2003). Chez les fœtus chimpanzés, la flexion de la tête vers le thorax, caractérisant la position du fœtus, est susceptible de modifier la position de la colonne cervicale, du pharynx et du larynx, y compris l'os hyoïde par rapport à celle de la symphyse mandibulaire. Cela peut provoquer des ajustements spatiaux et des contraintes à l'arrière de l'appareil vocal, similaires à ceux des nourrissons humains modernes mais pour des raisons développementales différentes, afin de maintenir la respiration et la déglutition fœtale. Les changements anatomiques à l'arrière de l'appareil vocal n'ont pas encore été documentés chez les fœtus de chimpanzés et ainsi restent à être exploré en fonction des changements de conformation de la symphyse mandibulaire.

Objectif de l'étude

Cette étude teste l'hypothèse que les changements développementaux de la symphyse communs chez les fœtus de chimpanzés et les

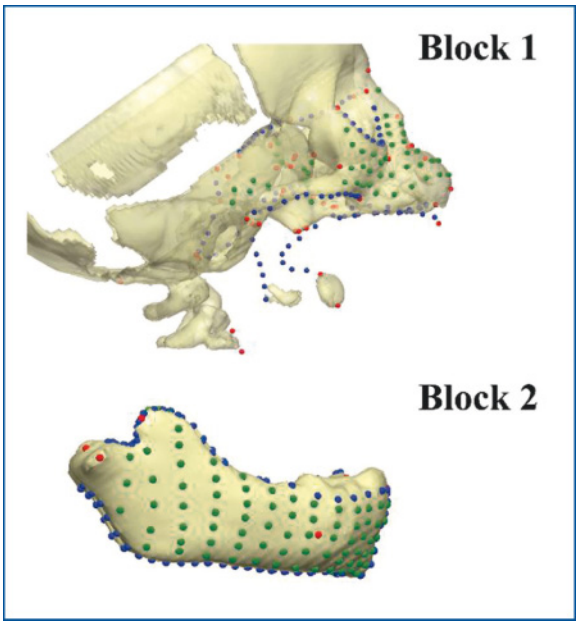


Figure 2 : Patron des 686 repères anatomiques capturant la géométrie du bloc 1 constitué par la face moyenne et supérieure, la base du crâne, la colonne cervicale, l'os hyoïde et la langue ; de même que le bloc 2 formé par la mandibule. Points rouges : repères anatomiques, points verts et bleus : repères de courbe et de surface anatomiques.

nourrissons humains modernes sont entraînés par le même facteur (Coquerelle *et al.* 2010) – la restriction de l'espace à l'arrière de l'appareil vocal et l'agencement associé de la langue et de l'os hyoïde. L'échantillon comprend 686 points de repère anatomique géométriquement homologues capturant la forme tridimensionnelle (3D) du complexe cervico-cranio-facial incluant l'os hyoïde, la langue et la mandibule (**Fig. 2**).

Les points de repère sont mesurés sur une surface numérique extraite à partir d'images tomographiques de chimpanzés (n = 8), âgés de la semaine de gestation (GW) 18 à la naissance, et d'humains (n = 34), âgés de la naissance à 5,5 ans. Après le calcul des variables de conformation du complexe cervico-cranio-facial (bloc 1) et ceux de la mandibule (bloc 2) par superposition Procrustes séparée (Rohlf & Slice 1990 ; Bookstein 1997 ; Gunz *et al.* 2005), les trajectoires ontogénétiques des humains et des chimpanzés de la variation moyenne de la forme sont comparées en utilisant l'analyse en composantes principales (ACP, **Fig. 3**) (Mitteroecker et al. 2004). Par la suite, une séquence de morphes de surface est reconstruite pour visualiser la variation allométrique de la forme tout au long de l'ontogenèse chez les deux espèces via l'analyse de régression linéaire compartimentée. Les estimations de régression montrent l'association moyenne entre les deux blocs anatomiques et ce dans les stades d'âge de chaque espèce (**Fig. 4**). Cependant cette analyse ne signifie pas nécessairement une relation de cause à effet ou une intégration de développement réelle. Par conséquent, après avoir soustrait la variation allométrique (Mitteroecker & Bookstein 2008 ; Bookstein 1991), l'analyse PLS des deux blocs par la méthode des

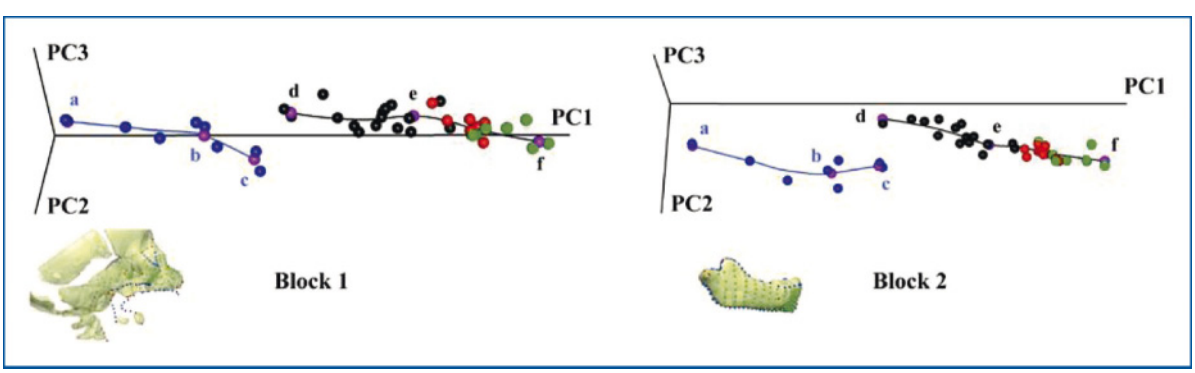


Figure 3 : Analyse en composantes principales dans un espace de forme. Chimpanzés (courbe bleue) et humains (courbe noire) ont des trajectoires ontogénétiques distinctes. Points bleus : fœtus chimpanzés (a, b) à néonatals (c). Points noirs : humains âgés de la naissance (d) à ~ 1 an (e), points rouges : de 1 à ~ 2.5 ans, points verts : de 2.5 à 5.5 ans (f). Points roses : estimateurs de régression pour les âges a, b, c, d, e et f vu dans la Figure 4. À noter l'orientation parallèle des trajectoires entre a) et b) chez les chimpanzés et entre d) et e) chez les humains, démontrant des chemins similaires de développement dans un contexte anatomique différent.

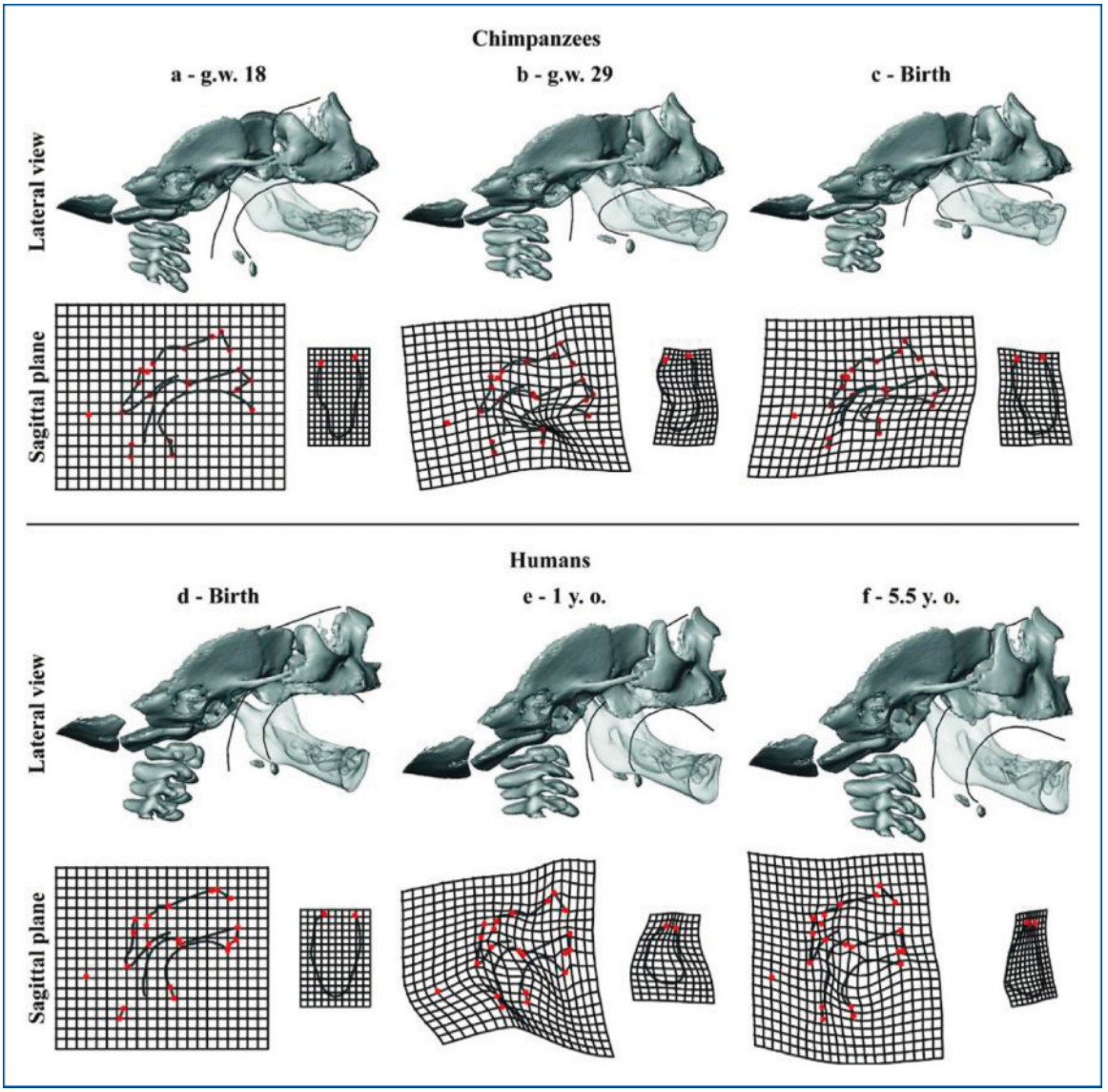


Figure 4 : Changements ontogénétiques de conformations. Vue latérales : changement de conformations le long des trajectoires ontogénétiques des chimpanzés (a-c) et des humains (d-f) vues dans la Figure 3. Plan sagittal : grilles de déformation illustrant les changements de conformations des structures sagittales du bloc 1 (à gauche) et de la symphyse du bloc 2 (à droite) de chaque stade d'âge au stade d'âge suivant (amplifiés par un factor 1,5). Points rouges : points de repère (comme vus dans la Figure 2).

Les changements similaires de conformation chez les chimpanzés et les humains incluent simultanément : 1) la projection antérieure de la région mentonnière ; 2) la réduction horizontale relative de la cavité buccale et de la langue ; 3) la flexion de la base du crâne ; 4) le raccourcissement relatif de la base du crâne antérieure ; 5) la rotation dans le sens des aiguilles d'une montre de la région postérieure de la face moyenne et supérieure ; et 6) le positionnement antérieur de la colonne cervicale et de l'os hyoïde.

Divergence de croissance chez les chimpanzés (b-c) et les humains (e-f). Chez les humains : 1) la croissance verticale de la face moyenne et supérieure ; 2) la rotation de la branche montante de la mandibule vers le corps mandibulaire ; 3) la descente de la base de la langue et de l'os hyoide ; 4) et le relatif rétrécissement antéro-postérieur du pharynx. Chez les chimpanzés : 1) le torus transverse inférieur commence à grandir postérieurement ; 2) la rétroflexion de la base du crâne ; 3) la face moyenne et supérieure effectue une rotation vers l'avant ; et 4) la colonne cervicale, l'os hyoïde et la partie inférieure du pharynx se déplacent postérieurement.

moindres carrés partiels (Mitteroecker & Bookstein 2008 ; Mitteroecker *et al.* 2012) est utilisée dans le but de tester notre hypothèse (**Fig. 5**).

Résultats

Pour chaque bloc, la figure 3 illustre les trajectoires ontogénétiques des humains et des chimpanzés dans une projection en deux dimensions des trois premières composantes principales (PC) de l'espace de forme Procustes. Les chimpanzés et les humains ont des trajectoires ontogénétiques distinctes. Pourtant, de la position *a* (GW 18) à *b* (~ GW 29) chez les fœtus de chimpanzés et de la position *d* (la naissance) à *e* (~ 1 an) chez les humains, les trajectoires sont très similaires, indiquant des voies de développement similaires entre les deux espèces.

La figure 4 illustre les changements de forme des deux blocs le long des trajectoires ontogénétiques des humains et des chimpanzés (**Fig. 3**). Chez les chimpanzés de GW 18 à environ GW 29 (**Fig. 4a-b**) et chez les humains de la naissance à environ 1 an (**Fig. 4d-e**), la projection antérieure de la région mentonnière est coordonnée avec la réduction de la taille horizontale de la langue par rapport à la taille de la cavité buccale. Cela se produit lorsque la base crânienne antérieure raccourcit antéropostérieurement et la face moyenne et supérieure effectue une rotation postérieure tandis que la colonne cervicale et l'os hyoïde se déplacent antérieurement.

Par la suite, la croissance commence à diverger entre les deux espèces. Chez les humains de 1 an à 5,5 ans (**Fig. 4e-f**), la région mentonnière devient encore plus importante avec l'abaissement de la base de la langue et de l'os hyoïde d'une part et d'autre part avec la différence entre la croissance verticale de la face moyenne et supérieure et la croissance horizontale du pharynx. Chez les chimpanzés de GW 29 à la naissance (**Fig. 4b-c**), la symphyse reste encore verticale mais du côté lingual de la région mentonnière le torus transverse inférieur commence à se développer postérieurement. Cela se produit lorsque la face commence à effectuer une rotation antérieure tandis que la colonne cervicale, l'os hyoïde et la partie inférieure du pharynx se déplacent postérieurement. Chez les humains modernes après 1 an (**Fig. 4e-f**), la ligne médiane de la symphyse évolue en forme de larme, avec un os alvéolaire incisif relativement étroit et une large région mentonnière (Le Cabec *et al.* 2012).

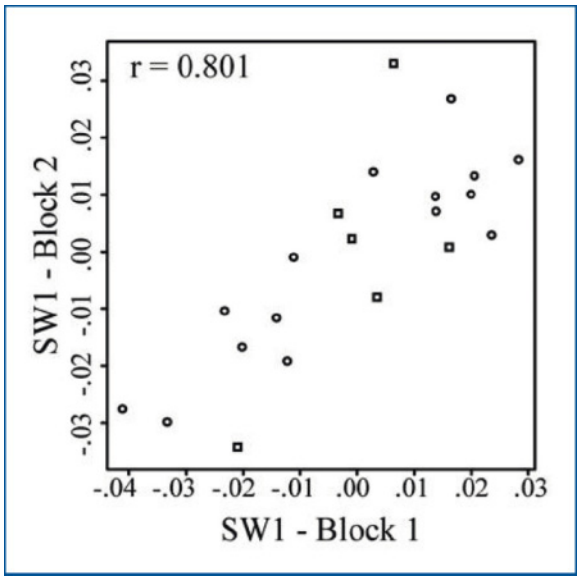


Figure 5 : Analyse PLS. Projection de la première paire de *singular warps* (SW1) quantifiant la covariance entre les coordonnées Procrustes 3D des blocs 1 et 2. Les humains (cercles) et les chimpanzés (carrés) forment un groupe unique indiquant que les deux partagent le même schéma de covariation entre la symphyse et l'espace postérieur du tract vocal.

Le côté labial est caractérisé par une *incurvatio mandibularis* bien marquée (Hublin et Tillier 1981) – une courbe convexe postérieurement au-dessous du bord alvéolaire incisif. Le côté lingual présente également un profil convexe postérieurement qui, à son maximum, correspond au site d'insertion de la langue.

L'analyse de PLS (**Fig. 5**) a été effectuée sur les coordonnées Procrustes 3D des blocs 1 et 2 d'un sous-échantillon composé de nourrissons humains âgés de la naissance à 1 an et de fœtus chimpanzés avant la naissance parce qu'ils montrent des variations équivalentes de la conformation (**Fig. 4a-b, 4d-e**). La corrélation significative ($r = 0{,}801$, $p = 0{,}005$) entre le positionnement antérieur de la région mentonnière, un pharynx rétréci et une langue globulaire démontre que le changement de conformation de la symphyse répond à des ajustements spatiaux et à des contraintes à l'arrière de l'appareil vocal chez les deux espèces (hypothèse).

Discussion

Cette étude confirme l'hypothèse que le développement d'une symphyse verticale avec une

protubérance mentonnière chez les fœtus chimpanzés, et le développement d'une région mentonnière proéminente chez les humains âgés de la naissance à environ 1 an, résultent d'une voie commune du développement, en relation avec les changements de conformation du tractus vocal et l'agencement associé de la langue et de l'os hyoïde. Chez les deux espèces, la réduction relative de la cavité buccale horizontale provient du positionnement antérieur de la colonne cervicale et de l'os hyoïde et simultanément du positionnement postérieur de la face moyenne et supérieure, et du raccourcissement de la base du crâne antérieur **(Fig. 4)**.

Chez les fœtus chimpanzés, le positionnement antérieur de la colonne cervicale et de l'os hyoïde est une conséquence de la flexion de la tête vers la gorge liée à la position du fœtus dans l'utérus. Chez les humains modernes, il existe un déplacement semblable de la colonne cervicale et de l'os hyoïde mais ce déplacement est lié au développement de la position verticale (Aiello & Dean, 1990). Chez les deux espèces, le positionnement postérieur de la face moyenne et supérieure résulte de la flexion de la base du crâne (Lieberman, 2011 ; McCarthy & Lieberman, 2001), et de la réduction relative de la dimension horizontale de la cavité buccale ainsi que de celle de la face moyenne et supérieure et de la base crânienne antérieure, car ceux-ci sont des compartiments jouxtes de croissance (Enlow 1990). Par conséquent, le pharynx, la mandibule, l'os hyoïde et la langue sont pris en étau, au carrefour entre le développement de la face moyenne et supérieure et celui de la colonne cervicale. Ceci est bien illustré par le changement marqué de la conformation de la langue et le repositionnement de l'os hyoïde vers la région antérieure de la cavité buccale.

Les résultats fournissent la preuve que la proéminence mentonnière des hommes modernes est un sous-produit de contraintes d'espace à l'arrière de l'appareil vocal, via le changement de conformation de la langue qui est aux prises avec la rétraction du visage et le développement de la posture verticale (Dubrul & Sicher 1990 ; Enlow, 1990). La ligne médiane symphysaire en forme de larme caractérisant les humains modernes (Le Cabec *et al.* 2012) se forme dès que la base de la langue et l'os hyoïde descendent dans la gorge. Cette descente accompagne le déplacement vers le bas du larynx et est étroitement liée aux forces contraires de la croissance horizontale et verticale de l'appareil vocal. La forte augmentation de la taille de la langue ne peut pas être contenue horizontalement dans l'appareil vocal. La croissance horizontale de la partie inférieure de l'espace oro-pharyngé est limitée par la croissance et le déplacement des unités qui l'entourent. Poussée par sa grande augmentation de taille et gardant son rythme de croissance par rapport à la croissance verticale de la face humaine rétractée, la descente de la base de la langue dans la gorge permet donc d'éviter l'obstruction et permet de maintenir les capacités pharyngées et laryngées lors de la respiration et de la déglutition plutôt que pour les besoins du langage (Lieberman *et al.* 2001 ; Lieberman, 2011, Clegg, 2012). Par conséquent, comme pour la proéminence de la région mentonnière, la large gamme de sons acoustiquement différentiables permise par un larynx bas et les propriétés mécaniques d'une langue avec une base postérieure basse (Lieberman 1984), semblent être un sous-produit provenant de l'arrangement spatial à l'arrière de l'appareil vocal contraint par la rétraction du visage et le développement de la station debout.

Enfin, les résultats portant sur l'intégration du développement de l'appareil vocal des fœtus chimpanzés et des nourrissons humains complémentent des études antérieures de singes africains et d'hommes modernes, indiquant que les effets des facteurs communs sont relativement conservés parmi les hominoïdes (Mitteroecker & Bookstein 2008 ; Ackermann 2002, 2005). L'intégration du développement partagé de l'appareil vocal chez les humains et les chimpanzés constitue un argument fort prouvant que les différents types de protrusion de la région mentonnière observée chez différents hominidés fossiles ont probablement vu le jour à partir d'une voie de développement commune visant à répondre à des ajustements et des contraintes de l'espace à l'arrière de l'appareil vocal, via une mécanique similaire du développement. Par conséquent, les spécimens Néandertaliens et d'Aterpuerca, qui présentent une région mentonnière quelque peu proéminente et dont la conformation de la mandibule se positionne à l'intérieur ou à proximité de la variation humaine (Rosas & Bastir 2004), ont probablement connu un ajustement

équivalent de l'espace à l'arrière de l'appareil vocal au cours de leur ontogenèse.

Remerciements

Cette recherche a été financée par la Fondation Fyssen (Paris). Je remercie J. Treil (Clinique Pasteur, Toulouse) ; J Braga (Université Paul Sabatier, Toulouse) ; F. Brunelle, N. Boddaert, J.-M. Debaets, C. Leroy and D. Gustave (AP-HP Necker, Paris) ; et V. Dousset, C. Douws, C. Thibaut and E. Gatuing (C.H.U. Pellegrin, Bordeaux) pour l'accès à leurs données CT d'humains. Je remercie également J. Braga pour le prêt des données CT chimpanzés provenant du Musée de l'Homme (Paris). Enfin, je remercie mes collaborateurs Markus Bastir, Philipp Mitteroecker, Juan Carlos Prados Frutos et Rosa Rojo pour les discussions et conseils sur ce travail.

Bibliographie

- Ackermann RR (2005) Ontogenetic integration of the hominoid face. J Hum Evol 48:175–97.
- Ackermann RR (2002) Patterns of covariation in the hominoid craniofacial skeleton: implication for paleoanthropological models. J Hum Evol 42 :147–187.
- Aiello L, Dean C (1990) An introduction to human evolutionary anatomy. New York: Academic Press.
- Ascenzi A, Sergi A (1971a) Il giacimento con mandibola neandertaliana di Archi (Reggio Calabria). Accd Naz Lincei 50:763–771.
- Ascenzi A, Sergi A (1971b) A new Neanderthal child mandible from an Upper Pleistocene site in southern Italy. Nature 233:280–283.
- Bastir M, Rosas A (2004) Facial heights : evolutionary relevance of postnatal ontogeny for facial orientation and skull morphology in humans and chimpanzees. J Hum Evol 47:359–381.
- Bastir M, Rosas A, Gunz P, Pena-Melian A, Manzi G, Harvati K, Kruszynski R, Stringer C, and Hublin J-J (2011) Evolution of the base of the brain in highly encephalized human species. Nat Commun 2 :588.
- Bookstein FL (1997) Landmark methods for forms without landmarks: morphometrics of group differences in outline shape. Med Image Anal 1:225–243.
- Bookstein FL (1991) Morphometric tools for landmark data: geometry ad biology. Cambridge: Cambridge University Press.
- Clegg M (2012) The evolution of human vocal tract : Specialized for speech ? In : Bannan N, editor. Music, language & human evolution. Oxford. pp 58–80.
- Coquerelle M, Bookstein FL, Braga J, Halazonetis DJ, Weber GW (2010) Fetal and infant growth patterns of the mandibular symphysis in modern humans and chimpanzees. J Anat 217:507–520
- Coquerelle M, Prados-Frutos JC, Benazzi S, Bookstein FL, Senck S et al. (2013) Infant growth patterns of the mandible in modern humans: a closer exploration of the developmental interactions between the symphyseal bone, the teeth, and the suprahyoid and tongue muscle insertion sites. J Anat 222:178–192.
- Daegling DJ (1993) Functional morphology of the human chin. Evol Anthropol 1:170–177.
- Debeer (1958) Embryos and ancestors, revised edition. Oxford: Clarendon Press.
- Dobson SD, Trinkaus E (2002) Cross-sectional geometry and morphology of the mandibular symphysis in Middle and Late Pleistocene Homo. J Hum Evol 43: 67–87.
- Dubrul LE, Sicher H (1954) The adaptive chin. Springfield: Charles.
- Duenhoelter Jh, Pritchard JA (1976) Fetal respiration : qualitative measurements of amniotic fluid inspired near term by human and rhesus fetuses. Am J Obstet Gynecol 125:306–309.
- Enlow DH (1990) Facial growth, 3rd edition. Philadelphia: Saunders.
- Gould S J (1977) Ontogeny and Phylogeny. Cambridge: Belknap Press.
- Gröning F, Liu J, Fagan MJ, O'Higgins P (2011) Why do humans have chins? Testing the mechanical significance of modern human symphyseal morphology with finite element analysis. Am J Phys Anthropol 144:593–606.
- Hublin J-J, Tillier A-M (1981) The Mousterian juvenile mandible from Irhoud (Morocco): a phylogenetic interpretation. In : Stringer CB, editor. Aspects of Human Evolution. London. pp 167–185.

• Hrdlicka A (1911) Human dentition and teeth from the evolutionary and racial standpoint. Dominion Dent J 23: 403–417.

• Gunz P, Mitteroecker P, Bookstein FL (2005) Semilandmarks in three dimensions. In : SliceD, editor. Modern morphometrics in physical anthropology.NewYork. pp 73–98.

• Ichim I, Kieser J, Swain M (2007) Tongue contractions during speech may have led to the development of the bony geometry of the chin following the evolution of human language: a mechanobiological hypothesis for the development of the human chin. Med Hypotheses 69:20–24.

• Ichim I, Swain VM, Kieser J (2006) Mandibular stiffness in humans : numerical predictions. J Biomech 39 :1903–1913.

• Lam YM, Pearson OM, Smith CM (1996) Chin morphology and sexual dimorphism in the fossil hominid mandible sample from Klasies River Mouth. Am J Phys Anthropol 100:545–577.

• Laubichler MD (2000) Homology in development and development of the homology concept. Amer Zool 40:777–788.

• Le Cabec A, Kupczik K, Gunz P, Braga J, Hublin J-J (2012) Long anterior mandibular tooth roots in Neanderthals are not the result of their large jaws. J Hum Evol 63:667–681.

• Lieberman DE (2011) The evolution of the human head. Cambridge : Harvard University.

• Lieberman DE (1999) Homology and hominid phylogeny: problems and potential solutions. Evol Anthropol 7:142–151.

• Lieberman DE (1995) Testing hypotheses about recent human evolution from skulls : integrating morphology, function, development and phylogeny. Curr Anthropol 36:159–197.

• Lieberman DE, McCarthy RC, Hiiemae KM, Palmer JB (2001) Ontogeny of postnatal hyoid and larynx descent in humans. Arch Oral Biol 46:117–128.

• Lierberman P (1984) The biology and evolution of language. Cambridge: Havard University Press.

• Mallegni F, Trinkaus E (1997) A reconsideration of the Archi 1 Neanderthal mandible. J Hum Evol 33:651–668.

• McCarthy RC, Lieberman DE (2001) Posterior maxillary (PM) plane and anterior cranial architecture in primates. Anat Rec A 264:247–260.

• Miller JL, Sonies BC, Macedonia C (2003) Emergence of oropharyngeal, laryngeal and swallowing activity in the developing fetal upper aerodigestive tract: an ultrasound evaluation. Early Hum Dev 71:61–87.

• Milton K (1999) A hypothesis to explain the role of meat-eating in human evolution. Evol Anthropol 8:11–21.

• Mitteroecker P, Bookstein FL (2008) The evolutionary role of modularity and integration in the hominoid cranium. Evolution 62:943–958.

• Mitteroecker P, Bookstein FL (2007) The conceptual and statistical relationship between modularity and morphological integration. Syst Biol 56:818–836.

• Mitteroecker P, Gunz P, Neubauer S, Müller G (2012) How to explore morphological integration in human evolution and development ? Evol Biol 39:536– 553.

• Mitteroecker P, Gunz P, Bernhard M, Schaefer K, Bookstein FL (2004) Comparison of cranial ontogenetic trajectories among great apes and humans. J Hum Evol 46:679–698.

• Moss ML (1968) The primacy of functional matrices in orofacial growth. Dental Practitioner 19:65–73.

• Negus VE (1949) The comparative anatomy and physiology of the larynx. New York: Hafner.

• Pritchard JA (1966) Fetal swallowing and amniotic fluid volume. Obstet Gynecol 28:606–610.

• Riesenfeld A(1969) The adaptative mandible: an experimental study. Acta Anat (Basel) 72:246–262.

• Rohlf FJ, Slice DE (1990) Extensions of the procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. Syst Zool 39:40–59.

• Rosas A (1995) Seventeen new mandibular specimens from Atapuerca/Ibeas Middle Pleistocene hominids sample (1985–1992). J Hum Evol 28:533–559.

• Rosas A, Bastir M (2004) Geometric morphometric analysis of allometric variation in the mandibular morphology of hominids of

Atapuerca, Sima de los Huesos site. Anat Rec A 278:551–560.

• Smith FH (1984) Fossil hominids from the Upper Pleistocene of Central Europe and the origin of modern Europeans. In: Smith FH and Spencer, editors. The origins of modern humans : a world survey of the fossil evidence. New York. pp 137–209.

• Stringer CB, Hublin J-J, Vandermeersch B (1984) The origin of anatomically modern humans in western Europe. In : Smith FH and Spencer F, editors. The origins of modern humans: a world survey from the fossil evidence. New York. pp. 51–135.

• Wagner GP (1989) The biological homology concept. Ann Rev Ecol Syst 20:51–69.

• Walkhoff O(1904) Die menschliche Sprache in ihrer Bedeutung für die funktionelle Gestalt des Unterkiefers. Anat Anz 24:129.

• Wolpoff MH (1980) Paleoanthropology, New York : Knopf.

• Wolpoff MH, Smith F, Malez M, Radovcic J, Rukavina D (1981) Upper Pleistocene hominid remains from Vindija Cave, Croatia, Yugoslavia. Am J Phys Anthropol 54 :499–545.

• Wrangham R, Jones JH, Laden G, Pilbeam D, Conklin-Brittain NL (1999) The raw and the stolen: cooking and the ecology of human origins. Curr Anthropol 40:567–594.

• Wrangham R, Carmody R (2010) Human adaptation to the control of fire. Evol Anthropol 19 :187–199.

Introduction

In understanding how we as humans come to have an orthognathic face (*i.e.*, a face positioned underneath the anterior cranial base) with a mandible displaying a prominent mental region (chin) as compared to other primates, it is vital that we can adequately interpret the fossil record of our own evolution. To these ends we need to be able to make inferences about growth and development from fossilised remains by comparing their anatomy with that of our near relatives. In primates, aspects of external skeletal morphology of the face are frequently used to define species and hence of a particular interest. Comparison of ontogenetic changes between human and non-human primates is fundamental to interpret evolutionary and taxonomic significance of variations observed in some extinct hominoids.

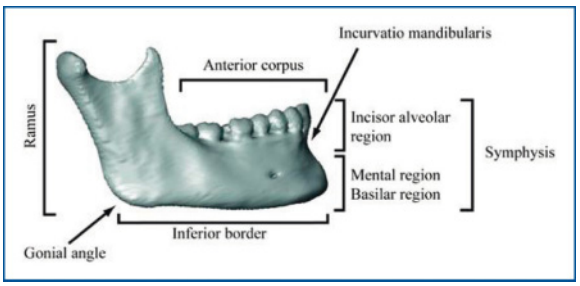


Figure 1: The human chin (prominent mental region). Mandible of an adult modern human labelled with the name of the anatomical regions.

The origin of the human prominent mental region at the mandibular symphysis (**Fig. 1**) has long been debated with regard to tooth size reduction (Hrdlicka 1911; Riesenfeld 1969), speech articulation (Walkhoff 1904; Dubrul & Sicher 1954; Ichim *et al.* 2007) and masticatory stresses (Deagling 1993; Dobson &Trinkaus 2002; Ichim *et al.* 2006; Gröning *et al.* 2011). However, none of these studies have provided compelling evolutionary and developmental arguments to understand why modern humans have a prominent mental region. Furthermore, the chin has long been considered a character defining modern humans only (Stringer *et al.* 1984). Yet, different forms of protrusion of the mental region were identified in various extinct hominids other than *Homo sapiens*, for instance the adult Neanderthals Guattari 3, La Quina 9, Saint Césaire, Vindja 206, as well as the Atapuerca specimens AT605 and AT300 (Ascenzi & Sergi 1971a-b; Wolpoff 1980; Wolpoff *et al.* 1981; Smith 1984; Frayer *et al.* 1993; Lieberman 1995; Rosas 1995; Lam *et al.*1996; Mallegni & Tinkaus 1997; Rosas & Bastir 2004). As a result the prominence of the mental region remains a confusing feature from an evolutionary and developmental perspective. In order to interpret these different forms of protrusion in the human fossil record, one has to question whether they can be seen as ontogenetically equivalent morphological features or not. Could the mental prominence have emerged from a common developmental pathway linked to identical changes of the cervico-craniofacial configuration? If this is true, it may imply that the prominence of the mental region has a low taxonomic significance because, throughout human evolution, we and our ancestors faced identical

developmental constraints, most importantly the ability to breathe and swallow.

Evolution

These constraints can be assumed because during the course of human evolution, with the introduction of meat into the diet and the invention of cooking (Milton 1999; Wrangham *et al.* 1999; Wrangham & Carmody 2010), dramatic changes occurred to the cranial base, due to brain enlargement, and to the face and teeth, characterized by the reduction of prognathism and size (Enlow 1990; Bastir *et al.* 2011, Lierberman *et al.* 2001; Bastir & Rosas 2004; Lieberman 2011). Because the face repositions beneath the anterior cranial base and closer to the cervical vertebrae, the anteroposterior dimension of the vocal tract reduces relatively and absolutely. By contrast, the relative size of the human tongue has not been reduced (Lieberman 2011; Negus 1949). As in chimpanzees, the human tongue is long and flat at birth, occupying almost the entire mouth, and leaving little space for the airway between the back of the oral cavity and the cervical vertebrae. The form of the neonatal tongue is also associated with a high positioned larynx. Functionally, such an arrangement is presumably related to breastfeeding (Lieberman 2011). But afterwards, during early postnatal growth, how do modern humans cope with a large tongue? Driven by the need to breathe and swallow safely, the prominence of the mental region may result from the need for space at the back of the vocal tract related to the spatial arrangement and size of the tongue (Dubrul & Sicher 1954). This study sets out to test this hypothesis via comparative early development of the modern human and chimpanzee cervico-craniofacial anatomy.

In extinct hominids with a prominent mental region, mandibular growth may have been associated with spatial constraints similar to those characterizing modern humans. The preservation of the hominid fossil record does not allow this question to be addressed empirically. Nevertheless, investigating pre- and early postnatal ontogeny of humans and chimpanzees helps identify morphological similarities and sources of variation underlying their phylogenetic changes (Debeer 1958; Gould 1977; Wagner 1989; Lierberman 1999; Laubicher 2000). In addition, the crania of African apes and modern humans have similar patterns of developmental integration, implying that the effects of common factors are fairly conserved among hominoids (Mitteroecker & Bookstein 2008; Ackermann 2002, 2005; Coquerelle *et al.* 2010). We hypothesize that patterns of developmental integration in the oral cavity are also conserved because all primates experience the same selection pressure to maintain an open oral cavity sufficient for breathing and swallowing.

Development

In modern humans and chimpanzees, development of the mandibular symphysis passes through similar stages albeit at different times. This includes the forward shift of the mental region leading to a vertical symphysis with a mental protuberance in chimpanzee fetuses, but a mental prominence in human infants (Coquerelle *et al.* 2010). In infant modern humans, looking at the symphyseal region alone, it has been demonstrated that the forward projection of the mental region is correlated with the relocation of the tongue and suprahyoid muscle insertions at the lingual side of the mental region (Coquerelle *et al.* 2013). When the entire cervico-craniofacial complex is taken into consideration, the symphyseal shape changes seem to be a response to the horizontal space restriction at the back of the vocal tract. This space restriction is caused by both the backward positioning of the upper mid-face concomitant with the flexion of the cranial base, and the forward positioning of the cervical column and hyoid bone due to the development of upright posture (Coquerelle *et al.* 2013). In such a developmental context, it is even more striking that the large tongue needs to fit in the small oral cavity and does so by remodelling its neonatal shape. At the same time, this is likely to alter the position and orientation of the suprahyoid muscles and the hyoid bone located below the tongue while maintaining the ability to breathe and swallow safely.

In chimpanzee fetuses, the similar shape changes observed at the symphysis during development occur in a different environment, the womb. During fetal life, the aerodigestive tract is full of amniotic fluids and the pharyngeal and laryngeal functions begins by the end of the first trimester. Fetal breathing of amniotic fluids at a tidal flow and low-frequency movements of the tongue during swallowing contribute to shaping and maintaining the form of the aerodigestive

tract (Pritchard 1966; Moss 1968; Duenhoelter & Pritchard 1976; Miller *et al.* 2003). In chimpanzee fetuses, the flexion of the head towards the thorax, characterising fetal position, is likely to modify the position of the cervical column, the pharynx and the larynx including the hyoid bone relative to the mandibular symphysis. This may cause spatial adjustments and constraints at the back of the vocal tract, similar to those of infant modern humans though related to different developmental reasons, in order to maintain fetal breathing and swallowing. The anatomical changes at the back of the vocal tract have not yet been documented in chimpanzee fetuses and so remain to be explored in relation to the shape changes of the mandibular symphysis.

Aim of the study

This study tests the hypothesis that the shared developmental changes of the symphysis observed in chimpanzee fetuses and modern human infants (Coquerelle *et al.* 2010) are driven by the same factor – the space restriction at the back of the vocal tract and the associated arrangement of the tongue and hyoid bone. The sample includes 686 geometrically homologous anatomical landmarks and semilandmarks capturing the three-dimensional (3D) geometry of the cervico-craniofacial complex including the hyoid bone, tongue muscle and the mandible (**Fig. 2**).

The (semi)landmarks are measured on a digital surface rendered from computer tomography scans of chimpanzees (n = 8), aged from the 18th gestational week (g.w.) to birth, and humans (n = 34), aged from birth to 5.5 years old. After computing the shape variables of the cervico-craniofacial complex (block 1) and those of the mandible (block 2) separately by Procrustes superimposition (Rohlf & Slice 1990; Bookstein 1997; Gunz *et al.* 2005), the chimpanzee and human ontogenetic trajectories of the average form variation are compared using principal component analysis (PCA, Fig 3) (Mitteroecker *et al.* 2004). Thereafter, a sequence of surface morphs is reconstructed to visualize the allometric shape variation throughout ontogeny in both species via piecewise linear regression analyses. The regression estimates visualize the average association between the anatomical blocks in the age stages in each species (**Fig. 4**). However this analysis does not necessarily imply a causal relationship or actual developmental integration. Therefore,

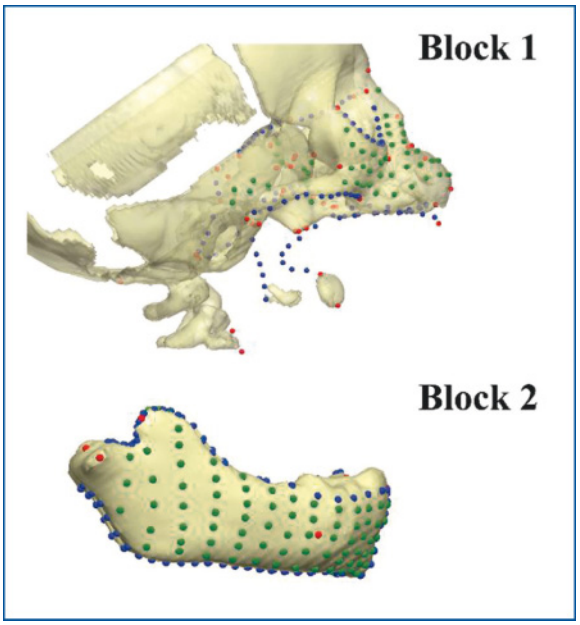


Figure 2: Template of 686 (semi)landmarks, capturing the geometry of block 1 formed by the upper mid-face, basicranium, the cervical column, the hyoid bone and the tongue, as well as the geometry of block 2 formed by the mandible. Red: landmarks, green and blue: curve and surface semilandmarks

after removing the allometric variation (Mitteroecker & Bookstein 2008; Bookstein 1991), two-block Partial Least Squares (PLS) analysis (Mitteroecker & Bookstein 2008; Mitteroecker *et al.* 2012) is used in order to test our hypothesis (**Fig. 5**).

Results

For each block, Figure 3 illustrates the human and chimpanzee ontogenetic trajectories in two-dimensional projections of the first three principal components (PCs) of Procrustes form space. Chimpanzees and humans have distinct ontogenetic trajectories. Yet from position *a* (g.w. 18) to *b* (~ g.w. 29) in chimpanzee fetuses and from position *d* (birth) to *e* (~ 1 y.o.) in humans, the trajectories are very similar, indicating similar developmental pathways between the two species.

Figure 4 illustrates the shape changes of the two blocks along the human and chimpanzee ontogenetic trajectories (Fig. 3). In chimpanzees from g.w. 18 to approximately g.w. 29 (**Fig. 4a-b**) and in humans from birth to about 1 y.o. (**Fig. 4d-e**), the

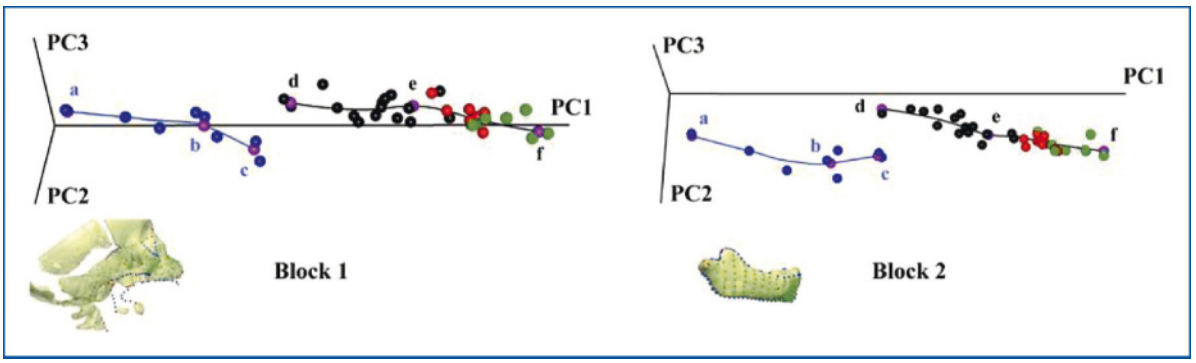


Figure 3: Form space principal component analysis. Chimpanzees (blue trajectory) and humans (black trajectory) have distinct curvilinear ontogenetic trajectories. Blue dots: chimpanzee fetuses (a, b) to neonates (c). Black dots: humans from birth (d) to ~1 y.o. (e), red dots: from ~1 to ~2.5 y.o., green dots: from 2.5 to 5.5 y.o (f). Pink dots: regression estimates at age a, b, c, d, e and f visualized in Fig. 4. Note the parallel orientations of trajectories between a) and b) in chimps and between d) and e) in humans demonstrates similar developmental pathways within a different anatomical context.

forward projection of the mental region is coordinated with the horizontal reduction of the size of the tongue relative to the size of the oral cavity. This occurs when the anterior cranial base shortens anteroposteriorly and the upper mid-face rotates backwards while the cervical column and the hyoid bone move forwards.

Thereafter, growth starts to diverge between the two species. In humans from 1 y. o. to 5.5 y. o. (Fig. 4e-f), the mental region becomes even more prominent along with the lowering of the base of the tongue and hyoid bone and the discrepancy between vertical growth of the upper mid-face and horizontal growth of the pharynx. In chimpanzees from g.w. 29 to birth (**Fig. 4b-c**), the symphysis still remains vertical but at the lingual side of the mental region the inferior transverse torus starts to grow posteriorly. This occurs when the face begins to rotate forwards while the cervical column, the hyoid bone and the lower part of the pharynx displace backwards. In modern humans after 1 y.o. (**Fig. 4e-f**), the symphyseal midline becomes tear-drop shaped, with a relatively narrow incisor alveolar bone and a broad mental region (Le Cabec *et al.* 2012). The labial side is characterized by a well distinguished *incurvatio mandibularis* (Hublin & Tillier 1981) –a curve posteriorly convex below the incisor alveolar border. The lingual side also has a posteriorly convex profile which, at its maximum, is the tongue insertion site.

The PLS analysis (**Fig. 5**) was carried out on the 3D Procrustes coordinates of blocks 1 and 2 of a subsample composed of infant humans from birth to 1 y. o. and chimpanzee fetuses prior to birth because they show equivalent shape variations (**Fig. 4a-b, 4d-e**). The significant correlation (r = 0.801, p-value=0.005) between the forward positioning of the mental region, a narrowed pharynx and a globular tongue demonstrates that the reshaping of the symphysis responds to spatial adjustments and constraints at the back of the vocal tract in the two species (hypothesis).

Discussion

This study validates the hypothesis, demonstrating that development of a vertical symphysis with a mental protuberance in chimpanzee fetuses, and the development of a prominent mental region in humans from birth to approximately 1 y.o. results from a common developmental pathway, related to the shape changes of the vocal tract and the associated arrangement of the tongue and the hyoid bone. In both species, the relative horizontal reduction of the oral cavity originates from the simultaneous forward positioning of the cervical column and the hyoid bone, the backward positioning of the upper mid-face, and the shortening of the anterior cranial base (**Fig. 4**).

In chimpanzee fetuses, the forward positioning of the cervical column and hyoid bone is a consequence of the head flexion towards the throat related to fetal positioning within the womb. In modern humans there is a similar displacement of the cervical column and hyoid

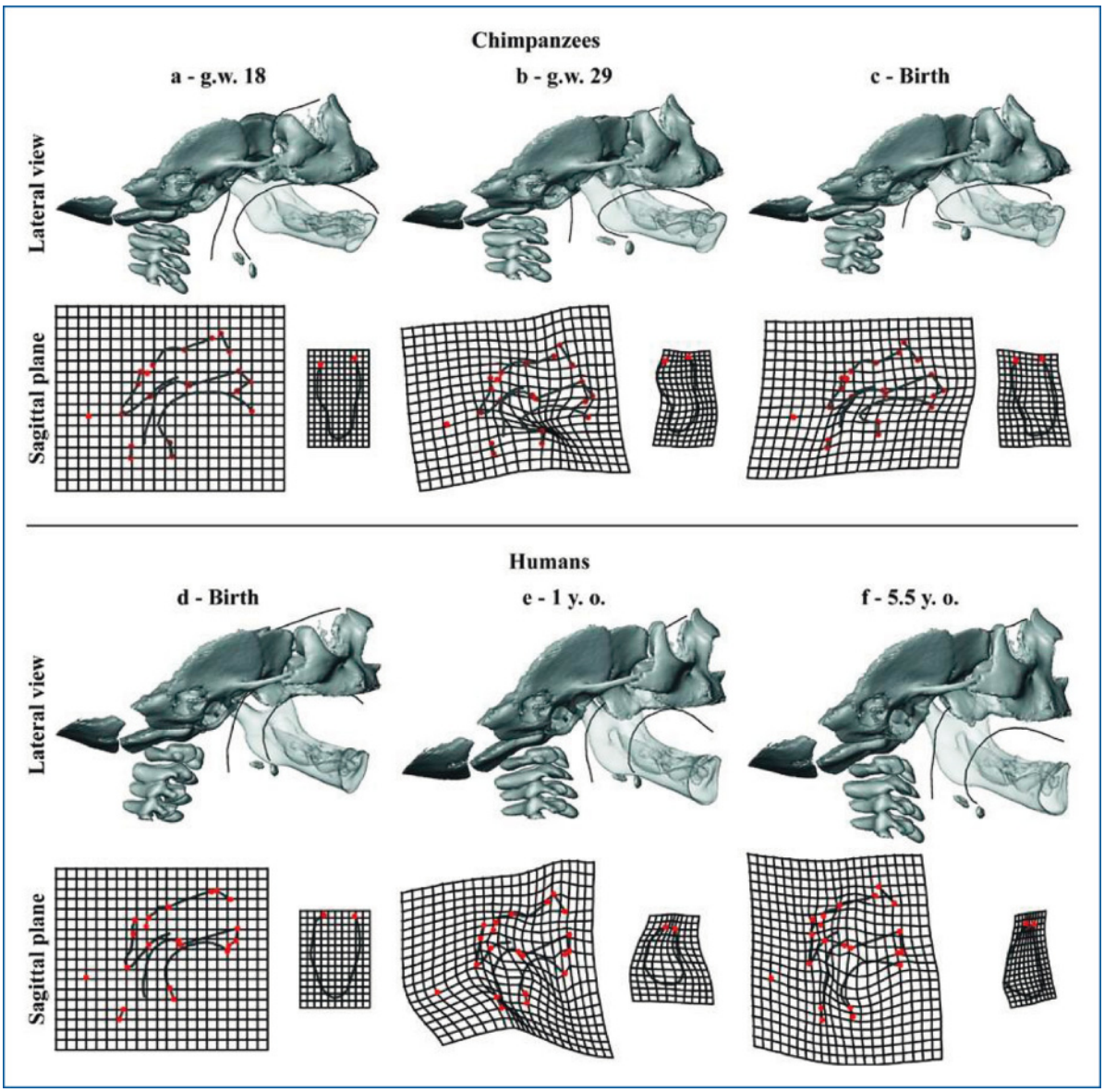


Figure 4 Ontogenetic shape changes. Lateral view: shape changes along the ontogenetic trajectories of chimpanzees (a-c) and humans (d-f) seen in Figure 3. Sagittal plane: the thin plate spline deformation grids illustrate the shape changes of the sagittal structures of block 1 (left) and the symphysis of block 2 (right) from each age stage to its next older stage (exaggerated by factor of 1.5). Red dots: landmarks (as seen in Figure 2).

Similar shape changes in chimpanzees (a-b) and humans (d-e) simultaneously include: 1) the forward projection of the mental region; 2) the relative horizontal reduction of the tongue and that of the oral cavity; 3) the cranial base flexion; 4) the relative shortening of the anterior cranial base; 5) the clockwise rotation of the posterior region of the upper mid-face; and 6) the forward positioning of the cervical column and the hyoid bone.

Growth divergence in chimpanzees (b-c) and in humans (e-f). In humans: 1) vertical growth of the upper mid-face; 2) the rotation of the ramus towards the corpus; 3) lowering of the base of the tongue and the hyoid bone; 4) and the relative anteroposterior narrowing of the pharynx. In chimpanzees: 1) the inferior transverse torus starts to grow posteriorly; 2) the cranial base retroflexes; 3) the upper midface rotates forwards; and 4) the cervical column, the hyoid bone and lower part of the pharynx displace backwards.

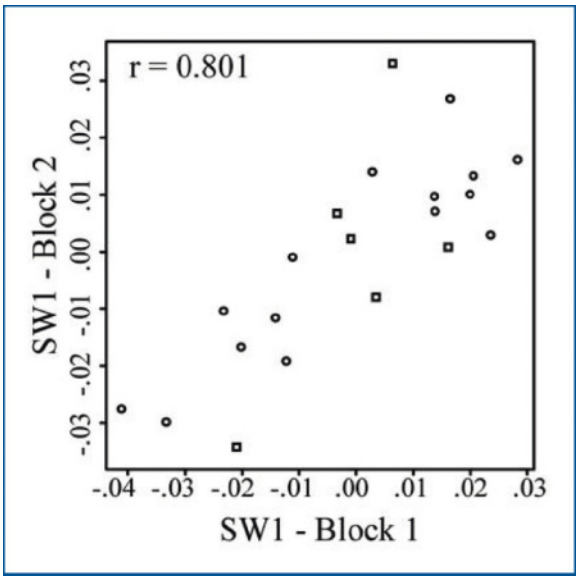


Figure 5: Partial least square analysis. Plot of the first pair of singular warps (SW1) accounting for the covariance between the 3D Procrustes coordinates of blocks 1 and 2. Humans (dots) and chimpanzees (squares) form a unique group indicating that both share the same pattern of covariation between the symphysis and the space at the back of the vocal tract.

bone but it is related to the development of the upright posture (Aiello & Dean 1990). In both species, the backward positioning of the upper mid-face results from the flexion of the cranial base (Lieberman 2011; McCarthy & Lieberman 2001), and the relative reduction of the horizontal dimension of the oral cavity along with that of the upper-midface and the anterior cranial base, as they are growth counterparts (Enlow 1990). Therefore, the pharynx, the mandible, the hyoid bone and the tongue are tightly packed together by the crossroads of the development of the upper mid-face and the cervical column. This is illustrated well by the dramatic reshaping of the tongue and the repositioning of the hyoid bone towards the anterior region of the oral cavity.

The results provide the evidence that the mental prominence of modern humans is a by-product of space constraints at the back of the vocal tract, via the reshaping of the tongue which is coping with the retraction of the face and the development of upright posture (Dubrul & Sicher 1990; Enlow, 1990). The tear-drop shaped symphyseal midline characterizing modern humans (Le Cabec *et al.* 2012) forms as soon as the base of the tongue and the hyoid bone descent down the throat. This descent accompanies the downward displacement of the larynx and is tightly linked to the contrasting forces of horizontal and vertical growth of the vocal tract. The large size increase of the tongue cannot fit within the horizontal dimension of the vocal tract. The horizontal growth of the lower part of the oropharyngeal space is constrained by growth and displacement of the units surrounding it. Driven by its large size increase and keeping pace with vertical growth of the human retracted face, the descent of the base of the tongue down the throat is thus to avoid obstruction and maintain the pharyngeal and laryngeal abilities of breathing and swallowing rather than for the needs of speech (Lieberman *et al.* 2001; Lieberman 2011, Clegg 2012). Therefore, as for the prominence of the mental region, the large range of acoustically differentiable sounds allowed by a low larynx and the mechanic properties of a tongue with a low posterior base (Lieberman 1984), appear to be a by-product derived from the spatial arrangement at the back of the vocal tract compelled by the facial retraction and the development of upright posture.

Finally, the results on developmental integration of the vocal tract in chimpanzee fetuses and infant humans supplement previous studies on African apes and modern humans, implying that the effects of common factors are relatively conserved among hominoids (Mitteroecker & Bookstein 2008; Ackermann 2002, 2005). The shared developmental integration of the vocal tract in humans and chimpanzees constitute a strong argument that the different sorts of protrusion of the mental region observed in various extinct hominids have likely emerged from a common developmental pathway responding to adjustments and constraints from the space at the back of vocal tract, in a similar developmentally mechanistic way. Therefore, Neanderthal and Aterpuerca specimens, who exhibit a somewhat prominent mental region and who cluster within or close to the range of human variation with respect to their mandibular shape (Rosas & Bastir 2004), have likely experienced an equivalent space adjustment at the back of the vocal tract during their ontogeny.

Acknowledgments

This research has been supported by the Fondation Fyssen (Paris). I thank J. Treil (Clinique Pasteur, Toulouse); J Braga (University Paul Sabatier, Toulouse); F. Brunelle, N. Boddaert, J.-M. Debaets, C. Leroy and D. Gustave (AP-HP Necker, Paris); and V. Dousset, C. Douws, C. Thibaut and E. Gatuing (C.H.U. Pellegrin, Bordeaux) for access to their CT datasets of humans. I also thank J. Braga for the loan of the CT datasets of chimpanzees originated from the Musée de l'Homme (Paris). I finally thank my collaborators Markus Bastir, Philipp Mitteroecker, Juan Carlos Prados Frutos and Rosa Rojo for the discussions and feedback on this work.

Quels facteurs d'émergence du premier Néolithique d'Europe tempérée ? Apports de l'approche anthropologique d'assemblages céramiques du Néolithique ancien et moyen de Hongrie

Louise GOMART

Post-doctorante à l' UMR 8215 « Trajectoires. De la sédentarisation à l'état »
Maison de l'Archéologie & de l'Ethnologie, Nanterre, France

Résumé

Cet article aborde sous l'angle des traditions techniques et des savoir-faire céramiques une période de mutation culturelle majeure pour le Néolithique ancien européen : le passage, dans le Bassin des Carpates, du Néolithique ancien balkanique (Starčevo et Körös) à la Céramique Linéaire, cette dernière marquant l'émergence du premier Néolithique en Europe tempérée ainsi qu'un bouleversement des modes de vie des communautés agro-pastorales venues des Balkans. Quatre assemblages céramiques provenant de sites localisés dans cette zone culturellement contrastée ont fait l'objet d'une analyse technologique centrée sur les techniques et méthodes de façonnage. Les résultats préliminaires de cette étude suggèrent que cette aire de transition culturelle constitue une zone de forte interaction entre différentes communautés de pratique et révèlent une importante stabilité des savoir-faire techniques entre les Balkans et l'Europe centrale. La répartition spatiale des six méthodes de façonnage identifiées au sein de la zone d'étude permet en outre de supposer la coexistence de différentes communautés de pratique au moment de l'émergence de la Céramique Linéaire.

Mots-clés

Néolithique, Europe, Starčevo, Körös, Céramique Linéaire, céramique, savoir-faire technique, communautés de pratique, interactions

What factors of emergence of the first Neolithic in temperate Europe? Contribution of the anthropological approach of ceramic assemblages from the early and middle Neolithic in Hungary

Abstract

This article discusses, from the perspective of technical traditions and ceramic know-how, a period of major cultural change for the European Neolithic: the transition, in the Carpathian Basin, from the Balkan early Neolithic (Starčevo and Körös) to the Linear Pottery, the latter marking the emergence of the first Neolithic in temperate Europe and profound changes in the ways of life of agro-pastoral communities. Four ceramic assemblages from sites located in this culturally contrasting area have been analysed according to techniques and methods of forming. The preliminary results of this study suggest that this zone of cultural mutation constitutes an area of interactions between different communities of practice and reveal a high stability of technical know-how between the Balkans and Central Europe. Moreover, the spatial distribution of the six identified forming methods within the study area enables to suppose the coexistence of several communities of practices at the time of emergence of the Linear Pottery.

Keywords

Neolithic, Europe, Starčevo, Körös, Linear Pottery, ceramic, technical know-how, communities of practice, interactions

1. Introduction et problématiques

En Hongrie, le milieu du VIe millénaire marque une période de mutation culturelle majeure pour le Néolithique ancien européen : le passage du Néolithique ancien balkanique à la Céramique Linéaire (ou *Linearbandkeramik*, abrégé Lbk). L'émergence de cette culture, qui définit le premier Néolithique d'Europe tempérée et qui se diffusera en moins de cinq siècles jusqu'au Bassin parisien, s'accompagne d'un profond bouleversement des modes de vie des communautés agro-pastorales venues des Balkans, qu'il s'agisse de leur économie agricole ou de leurs structures d'habitat (Raczky *et al.* 2010). Les communautés agro-pastorales vont notamment exploiter de nouveaux terroirs et construire de longues maisons sur poteaux de bois regroupées en hameaux (Raczky et Anders 2009 ; Bánffy et Oróss 2010).

Cette période de transition se caractérise par une double dynamique, faisant l'objet de nombreux débats (**Figure 1**) :

- D'une part, une dichotomie est-ouest se dessine. Les dernières manifestations du Néolithique ancien balkanique se particularisent en effet par la présence en Hongrie de deux entités, le Starčevo à l'ouest (en Transdanubie, aux abords du lac Balaton) et le Körös à l'est (dans la vallée de la Tisza), qui se différencient notamment par leurs styles céramiques (Kalicz 2000) et leurs systèmes d'implantation (Raczky 2012 ; Bánffy 2013). Les modes de subsistance des communautés appartenant à ces deux entités étant encore peu connus à large échelle, les archéologues hésitent à les réunir en une seule et même culture archéologique comprenant deux groupes culturels ou à les individualiser en deux entités culturelles bien distinctes, bien que toutes deux de tradition balkanique. En outre, l'origine de ces deux variantes locales du Néolithique ancien balkanique demeure difficile à interpréter : leur émergence est-elle liée à des conditions environnementales spécifiques ou est-ce que des différences existaient antérieurement dans les Balkans ? (Bánffy 2013, p. 41).
- D'autre part, une dichotomie nord-sud est observée.

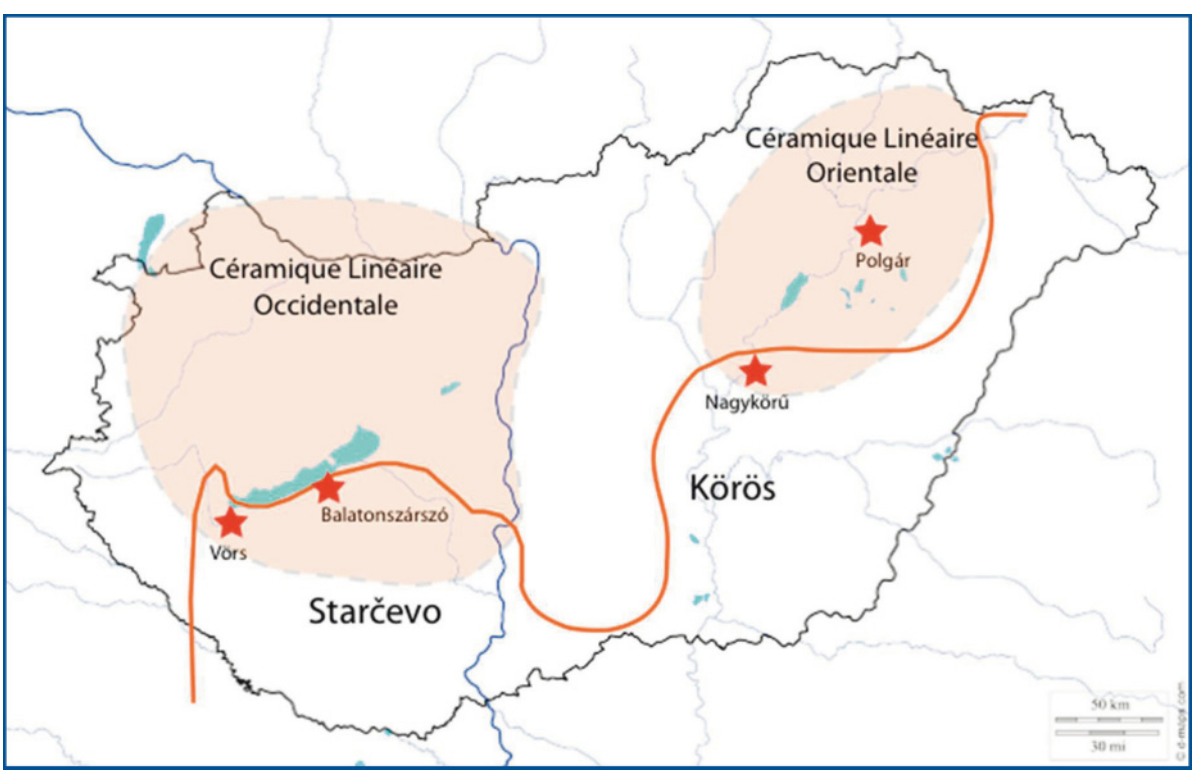


Figure 1 : Les différentes entités individualisés en Hongrie au milieu du VIe millénaire et les sites sélectionnés dans le cadre de cette étude.

Vers le milieu du VIème millénaire avant notre ère, une apparente « pause » dans le processus de diffusion du Néolithique ancien balkanique est observée en Hongrie. À ce moment, les derniers sites du Néolithique ancien Balkanique côtoient les tout premiers sites de la Céramique Linéaire. Aux abords du lac Balaton, à l'ouest, les sites du Starčevo les plus récents sont mis au jour aux côtés de sites de la Céramique Linéaire Occidentale la plus ancienne (Transdanubian LBK). Dans la vallée de la Tisza, à l'est, les sites du Körös les plus récents sont retrouvés aux côtés de sites de la Céramique Linéaire orientale la plus ancienne (Alföld LBK). Cet arrêt dans le processus de diffusion du Néolithique ancien balkanique serait lié à l'existence d'une frontière agro-écologique dans cette zone de l'Europe, qui nécessiterait une adaptation des communautés agro-pastorales à un nouvel environnement et à de nouvelles conditions climatiques, pédologiques et géologiques (voir par exemple Kertész et Sümegi 2001 ; Bánffy et Sümegi 2012). Proposant le concept de « *mental marginal zone* », les chercheurs travaillant sur l'est de la Hongrie estiment que cette zone de réadaptation nécessaire amènerait à des changements cognitifs conduisant à l'émergence d'une nouvelle culture matérielle (voir par exemple Raczky *et al.* 2010 ; Kozłowski et Raczky 2010). Pour les chercheurs travaillant sur l'ouest de la Hongrie, l'émergence de la Céramique Linéaire serait liée à l'intégration de populations mésolithiques autochtones au sein des communautés agro-pastorales migrantes venues des Balkans (voir par exemple : Bánffy *et al.* 2007 ; Bánffy et Oróss 2010). Cette hypothèse est notamment avancée en raison d'influences mésolithiques dans les industries lithiques de la Céramique Linéaire occidentale, mais aussi de données environnementales attestant d'une activité humaine pré-néolithique en Transdanubie (Bánffy *et al.* 2007 ; Bánffy et Oróss 2010).

Afin de prendre part à ces questionnements, une « approche anthropologique » (Latour et Lemonnier 1994 ; Roux 2010) d'assemblages céramiques provenant de cette zone culturellement contrastée a été développée. Visant à restituer les gestes opérés par les producteurs au moment de la fabrication des poteries, cette approche permet de dépasser la seule caractérisation stylistique des céramiques, pour les envisager en termes de traditions techniques, de transmission de savoir-faire et donc de liens sociaux. Dans ce cadre, la restitution des techniques et méthodes de façonnage est primordiale, car il semble que cette étape, plus que toute autre étape de la chaîne opératoire, soit relativement résistante au changement (Gosselain 2002 ; Gelbert 2003 ; Mayor 2011). Cette stabilité serait liée au processus d'incorporation des habiletés à l'issue de l'apprentissage qui implique des automatismes difficilement modifiables chez les producteurs, mais aussi au fait que les traces de façonnage ne sont que peu ou pas visibles sur le vase terminé (Gosselain 2002). Une fois l'apprentissage achevé, l'individu a du mal à modifier ses conceptions et façons de faire, avant de les transmettre à son tour (Roux 2010). La restitution des techniques de façonnage permet donc de mettre en évidence des « manières de faire » transmises sur le long terme, au sein de « communautés de pratique » et, par conséquent, d'identifier et de distinguer des groupes de producteurs, dont il est possible de suivre les trajectoires sur le long terme (Roux et Courty 2007).

Ce cadre méthodologique, donnant accès à l'individu via ses habitudes motrices et permettant par conséquent de repérer des trajectoires individuelles et collectives, a permis de poser un certain nombre de questions sur les dynamiques en œuvre lors du passage du Néolithique ancien Balkanique à la Céramique Linéaire. D'un point de vue synchronique, deux principales questions se posaient : d'abord, observe-t-on des liens entre les manières de faire du Starčevo et du Körös, qui pourraient suggérer que ces deux entités de tradition balkanique correspondent à une même communauté de pratique ? Ensuite, peut-on relier ces façons de faire aux traditions de fabrication identifiées plus au sud, dans le Néolithique ancien balkanique ?

D'un point de vue diachronique, les questions suivantes se posaient : peut-on mettre en évidence une continuité technique entre les deux entités issues du Néolithique ancien balkanique (le Starčevo et le Körös) et les deux groupes de la Céramique Linéaire (Occidentale et Orientale), qui pourrait indiquer que ces cultures successives correspondent aux mêmes groupes sociaux et donc à une même vague de Néolithisation ?

Au contraire, peut-on déceler une rupture technique importante qui suggèrerait que l'émergence de la Céramique Linéaire résulte d'apports de populations, autochtones ou exogènes, au sein des communautés agro-pastorales issues des Balkans ?

2. Matériel et Méthode

Pour répondre à ces questions, quatre sites d'habitat attribuables aux différentes entités culturelles identifiées ont été sélectionnés (**Figure 1**).

Deux des sites étudiés sont localisés aux abords du lac Balaton en Transdanubie (ouest de la Hongrie). Le premier, Vörs Máriaasszony-sziget (Aradi 1992 ; Kalicz *et al.* 1998, 2002), comprend plusieurs structures d'habitations attribuables au Starčevo. Au sein de l'assemblage, 178 vases présentaient des macrotraces diagnostiques des opérations de façonnage. Parmi ceux-ci, 90 ont pu être rattachés à une méthode de façonnage. Le second site, Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo (Oróss 2004, 2010 ; Marton 2004, 2008) a livré de nombreux plans de maisons. Il se caractérise par une longue séquence d'occupation, de la phase la plus ancienne à la plus récente de la Céramique Linéaire de Transdanubie. Pour ce site, l'ensemble des vases et tessons provenant des structures les plus anciennes a été examiné. Un total de 168 vases diagnostiques a été enregistré, parmi lesquels 86 ont pu être rattachés à une méthode de façonnage.

Les deux autres sites sélectionnés sont situés dans la Haute vallée de la Tisza (est de la Hongrie). Le premier, Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös (Raczky *et al.* 2010 ; Raczky 2012), est attribuable au Körös. Il est caractérisé par la présence d'une fosse détritique contenant un riche assemblage archéologique, ainsi qu'une sépulture orientée nord-est/sud-ouest. Après examen de l'ensemble du corpus, 233 vases présentant des traces techniques diagnostiques ont été enregistrés. Parmi eux, 60 ont pu être associés à une méthode de façonnage. Le second site, Polgár-Ferenczi-hát (Anders et Raczky 2009), a livré plusieurs structures d'habitation assignables à la Céramique Linéaire Orientale. Lors de l'examen de la série, 201 vases et tessons diagnostiques ont été enregistrés, parmi lesquels 73 ont pu être rattachés à une méthode de façonnage. Dans le cadre de cet article, les quatre corpus ont été appréhendés dans leur ensemble. Ils seront analysés selon leur chronologie interne en collaboration avec les fouilleurs des quatre sites respectifs.

Un total de 780 vases a été enregistré. L'ensemble des macrotraces techniques visibles sur les vases en surface et en tranche a été pris en compte. L'examen s'est concentré sur les caractéristiques de la topographie de surface, l'orientation des réseaux de cassures et de fracturations, les variations d'épaisseur des parois, les variations de texture des surfaces et sur l'orientation des particules et porosités de l'argile en section (Livingstone-Smith 2001). Chaque macrotrace a été relevée, codée, photographiée et replacée sur le profil du vase enregistré. Les macrotraces identifiées ont été interprétées en termes de techniques et méthodes de façonnage grâce à plusieurs travaux de référence ethnographiques et expérimentaux (voir par exemple Shepard 1956 ; Rye 1981 ; Livingstone-Smith 2001 ; Gosselain 2002 ; Gelbert 2003).

3. Résultats

3.1. Les méthodes de façonnage identifiées

Parmi les quatre assemblages étudiés dans le cadre du Néolithique ancien et moyen de Hongrie, six méthodes de façonnage ont été identifiées (**Figure 2**).

La première méthode de façonnage (**Figure 2a**) englobe les vaisselles dont la base présente, en tranche, des sections de colombins de forme sub-circulaire permettant d'envisager un ébauchage de la base grâce à la technique du colombin fin en spirale (Livingstone Smith 2001). Des dépressions longitudinales visibles sur la surface interne évoquent une mise en forme de la base par pressage contre un support. La panse et le bord des récipients associés à cette première méthode montrent, en tranche, des sections de colombins de forme sub-circulaire indiquant un façonnage de la panse et du bord par superposition de colombins fins, peu ou pas déformés lors de leur pose ou de leur régularisation.

La seconde méthode de façonnage (**Figure 2b**) réunit les vases caractérisés par une base ébauchée à l'aide de colombins fins enroulés en spirale. Des dépressions longitudinales identifiées sur la surface interne des bases évoquent une mise en forme par pressage contre un support à l'aide de pressions digitales palmaires. La section de la panse et du bord de ces vases est caractérisée par une structure feuilletée. Sur la surface

externe de la panse et du bord, des réseaux d'aplats sub-circulaires sont observés. L'association de ces macrotraces révèle un ébauchage de la panse par superposition de colombins fins, puis une mise en forme par battage.

La troisième méthode de façonnage (**Figure 2c**) rassemble les poteries dont la base est façonnée à l'aide de deux plaques d'argile superposées. La panse et le bord de ces vases présentent en tranche des sections de colombins de forme sub-circulaire évoquant un façonnage par superposition de colombins fins, peu ou pas déformés lors de leur pose ou de leur régularisation.

Dans le cadre de la quatrième méthode de façonnage (**Figure 2d**), la base des pots est caractérisée par un large faisceau de macrotraces techniques, qui permettent de supposer un façonnage en plusieurs étapes. Premièrement, une plaque d'argile est formée grâce à la technique du colombin fin en spirale. Deuxièmement, un colombin, toujours visible en tranche, est collé sur le pourtour de l'assise à la jonction entre base et panse, formant un pied annulaire. Troisièmement, une plaque est collée au centre de l'assise, afin de remplir le pied annulaire précédemment formé. La panse et le bord de ces vases présentent

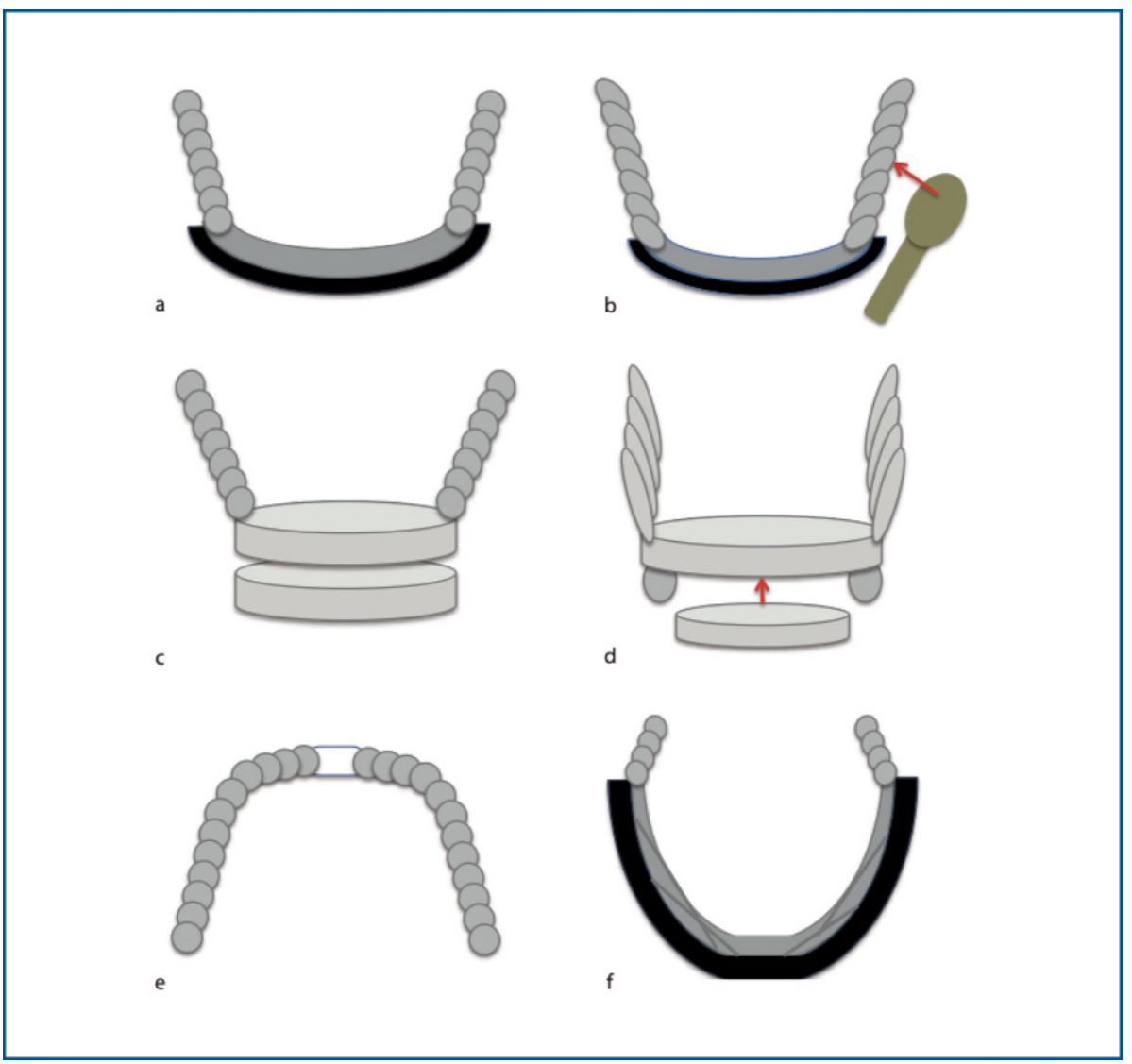


Figure 2 : Les six méthodes de façonnage céramiques identifiées au sein des quatre assemblages étudiés

des sections de colombins très étirés, de forme elliptique. Les vases présentent de nombreuses cassures obliques et certains tessons se desquament même en épaisseur, formant de fines plaquettes. Ces observations évoquent un ébauchage par écrasement de colombins, probablement suivi d'importantes opérations d'amincissement au cours de la mise en forme.

Les vases façonnés selon la cinquième méthode (**Figure 2e**) sont quant à eux montés « à l'envers » : le potier commence par former la lèvre du vase à l'aide d'un anneau d'argile, monte les parois du vase grâce à la technique du colombin fin superposé et finit par former la base, également au colombin. Cette méthode de façonnage est le plus souvent identifiée grâce à la présence d'un orifice sub-circulaire au centre de l'assise des vases. Cet orifice correspond au vide existant avant l'oblitération de la base du vase. Parfois imparfaitement régularisée, cette petite balle d'argile s'est souvent détachée du vase, ce qui explique le nombre important de vases présentant au centre de l'assise une cavité de forme sub-circulaire.

La sixième méthode (**Figure 2f**) regroupe des récipients dont la base et la panse sont caractérisées par des macrotraces identiques : en tranche, l'orientation de la porosité est verticale et de très hauts vides obliques à verticaux sont distingués. Sur le pourtour externe des vases au niveau de l'épaulement, une dépression horizontale est observée. Le bord de ces vases présente en section une configuration sub-circulaire des porosités. L'association de ces observations suggère un ébauchage de la base et de la panse d'un seul tenant, à l'aide de colombins épais. Dans un second temps, ces deux parties sont mises en forme par moulage sur forme concave, avec un étirement très intense des parois provoquant leur affinement et l'étirement très important des colombins. Alors que la base et la panse sont encore dans le moule, le bord est ensuite monté à l'aide de deux à quatre colombins fins superposés et non déformés.

3.2. La distribution spatiale des méthodes de façonnage identifiées au sein de la zone d'étude

Au sein de la zone d'étude (Transdanubie et vallée de la Tisza), la distribution spatiale des six méthodes de façonnage identifiées révèle des différences importantes entre sites (**Tableau 1** et **Figure 3**).

Il a tout d'abord été particulièrement intéressant de constater que cinq des six méthodes de façonnage identifiées en Hongrie correspondent en tous points à celles mises en évidence dans le contexte du Néolithique ancien de la vallée de la Struma en Bulgarie entre 6100 et 5800 avant notre ère (Gomart, sous presse ; Salanova,

	Vörs-Máriaasszony-sziget		Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös		Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo		Polgár-Ferenczi-hát	
	N	%	N	%	N	%	N	%
Méthode 1	-	-	30	50%	2	2%	-	-
Méthode 2	87	97%	-	-	58	67%	-	-
Méthode 3	-	-	29	48%	19	22%	-	-
Méthode 4	3	3%	-	-	7	8%	-	-
Méthode 5	-	-	1	2%	-	-	-	-
Méthode 6	-	-	-	-	-	-	73	100%
Total	90	100%	60	100%	86	100%	73	100%

Tableau 1 : Nombre de vases identifiés par méthode de façonnage céramique au sein des quatre assemblages étudiés (N : nombre de vases, % : pourcentage).

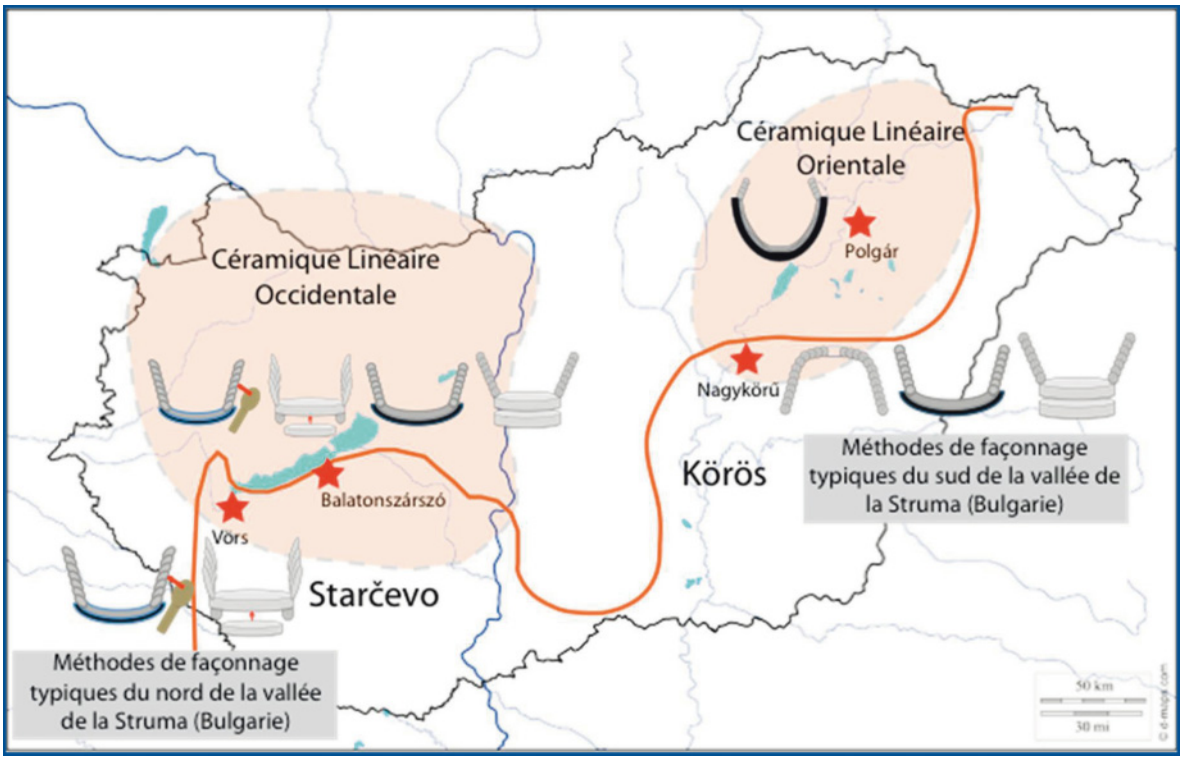


Figure 3 : Distribution spatiale des méthodes de façonnage céramiques identifiées au sein de la zone d'étude.

Gomart et Vieugué sous presse). Seule la sixième méthode n'avait jamais été identifiée parmi les corpus étudiés de Bulgarie.

Les deux méthodes observées sur le site Starčevo de Vörs (méthodes 2 et 4) se rapportent ainsi aux méthodes de façonnage employées par les producteurs du nord de la vallée de la Struma, et ce tout au long du Néolithique ancien de Bulgarie (Gomart, sous presse ; Salanova, Gomart et Vieugué sous presse). Inversement, les deux méthodes de façonnage identifiées sur le site Körös de Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös (méthodes 1 et 3) sont rattachables aux manières de faire mises en œuvre tout au long du Néolithique ancien bulgare par les producteurs du sud de la vallée de la Struma (Gomart, sous presse ; Salanova, Gomart et Vieugué sous presse).

Une dichotomie est-ouest a également été constatée sur les sites de la Céramique Linéaire. Sur le site de la Céramique Linéaire Occidentale de Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo, il a été extrêmement intéressant d'observer l'association, dès le début de l'occupation, de méthodes de façonnage propres au site Starčevo de Vörs et aux sites du nord de la vallée de la Struma (méthodes 2 et 4) avec les méthodes propres au site Körös de Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös et aux habitats du sud de la vallée de la Struma (méthodes 1 et 3).

En revanche, sur le site de la Céramique Linaire orientale de Polgár-Ferenczi-hát, une seule méthode de façonnage a pu être mise en évidence (méthode 6). En l'état actuel des recherches, celle-ci n'est pas rattachable à un autre assemblage du Néolithique ancien étudié.

4. Premières hypothèses sur les trajectoires des communautés de pratique du Néolithique ancien et moyen

Ces résultats conduisent à proposer des premières pistes de réflexion sur les trajectoires spatiales et temporelles des différentes communautés de pratique identifiées dans le Néolithique ancien et moyen de Hongrie.

En premier lieu, les assemblages du site Körös de Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös et du site Starčevo de Vörs reflètent des habitudes motrices tout à fait différentes, qui semblent se rapporter à deux communautés de pratique distinctes. Il est possible de relier ces dernières aux deux

communautés de pratique ayant occupé respectivement le nord et le sud de la vallée de la Struma tout au long du Néolithique ancien bulgare (Gomart sous presse ; Salanova, Gomart et Vieugué sous presse). Ainsi, la dichotomie dans les manières de faire des céramiques observées sur le long terme dans la vallée de la Struma semble pouvoir être retrouvée en Hongrie, plus de 200 ans après et 800 km plus au nord et selon une partition est-ouest. En d'autres termes, les deux communautés de pratique ayant coexisté dans la vallée de la Struma durant le Néolithique ancien semblent pouvoir être retrouvées à la fin du Néolithique ancien balkanique au sein de deux entités ou groupes culturels : le Starčevo et le Körös, répartis respectivement à l'ouest et à l'est de la Hongrie.

En second lieu, la variabilité observée dès le début de l'occupation du site de la Céramique Linéaire Occidentale de Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo permet d'envisager plusieurs hypothèses. Le fait que, dès le début de l'occupation, des manières de faire typiques du site Starčevo de Vörs et du nord de la vallée de la Struma côtoient des façons de faire typiques du site Körös de Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös et du sud de la vallée de la Struma suggère la coexistence dans ce village de producteurs issus des deux communautés de pratique. La présence de méthodes typiques du Starčevo de Bulgarie et de Hongrie y évoque une continuité dans les manières de faire entre les potiers du Starčevo et certains producteurs de la Céramique Linéaire Occidentale. Cette observation permet de supposer une contribution des groupes sociaux du Starčevo au cours de la phase de formation de la Céramique Linéaire Occidentale, comme cela a déjà été proposé (e.g. Bánffy *et al.* 2007). Avant de se prononcer définitivement sur ce point, il sera cependant nécessaire d'analyser des céramiques attribuées à la phase la plus ancienne de la Céramique Linéaire de Transdanubie (earliest LBK), qui n'est pas présente sur le site de Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo. En outre, l'identification à Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo de méthodes de façonnage typiques du Körös et du sud de la vallée de la Struma pourrait indiquer l'arrivée de populations migrantes en Transdanubie lors de l'émergence de la Céramique Linéaire Occidentale. En l'état actuel des recherches, il n'est pas possible de se prononcer sur l'origine exacte de ces populations, dont les manières de faire sont – pour l'heure – rattachables à celles observées dans la vallée de la Tisza, mais aussi dans le sud de la vallée de la Struma en Bulgarie.

En troisième lieu, l'utilisation de la méthode 6 tout au long de l'occupation Alföld Linear Pottery du site de Polgár-Ferenczi-hát, qui n'avait jusqu'alors jamais été identifiée sur un corpus du Néolithique ancien, évoque une rupture technique avec les manières de faire observées sur le site Körös de Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös. Ce résultat préliminaire, qui pourrait suggérer l'arrivée de population lors de la phase de formation de la Céramique Linéaire Orientale, incite à poursuivre les études technologiques dans la vallée de la Tisza afin de rechercher d'éventuelles connexions avec d'autres sites. Il faudra vérifier si cette méthode de façonnage caractérise d'autres assemblages de l'Alföld LBK.

Conclusion et perspectives

Cette étude a permis la connexion et la mise en perspective de résultats obtenus dans le contexte du Néolithique ancien balkanique (Vieugué, Gomart et Salanova 2010 ; Salanova, Gomart et Vieugué sous presse ; Gomart sous presse) et le contexte plus récent de la Céramique Linéaire Occidentale (Gomart 2014). Considérer les techniques céramiques comme la succession de gestes qui sous-tendent leur fabrication et qui impliquent des savoirs spécifiques a apporté plusieurs pistes de réflexion sur une période de mutation culturelle majeure opérée au milieu du VIème millénaire dans la zone sud des Carpates. Il est ainsi possible de supposer que les populations du Starčevo et du Körös, issues des Balkans, appartenaient à deux communautés de pratique, qui avaient toutes deux déjà été repérées 800 km plus au sud et plus de 200 ans auparavant en Bulgarie, respectivement dans le nord et le sud de la vallée de la Struma (Gomart sous presse ; Salanova, Gomart, Vieugué sous presse). Si ces résultats venaient à se confirmer sur un plus grand nombre d'assemblages céramiques attribués au Körös et au Starčevo, nous pourrions alors envisager que l'émergence de ces deux variantes locales du Néolithique ancien Balkanique en Hongrie serait liée à des différences existant anciennement au sein même des premières communautés agro-pastorales installées dans les Balkans.

La transition entre ces deux entités de tradition balkanique et les deux groupes de la

Céramique Linéaire pourrait s'être opérée selon des mécanismes sensiblement différents entre l'est et l'ouest de la Hongrie. À l'ouest, en Transdanubie, si une continuité dans les façons de faire a été observée entre le site Starčevo de Vörs et le site de la Céramique Linéaire Occidentale de Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo, la mise en évidence de méthodes de façonnage typiques du Körös (mais aussi du sud de la vallée de la Struma en Bulgarie) a permis d'y supposer l'arrivée et l'intégration de populations migrantes issues d'une communauté de pratique différente (et dont l'origine exacte doit encore être précisée). En revanche, à l'est, dans la vallée de la Tisza, une rupture entre les façons de faire mises en œuvre sur le site Körös de Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös et le site de la Céramique Linéaire Orientale de Polgár-Ferenczi-hát a été observée. Cette rupture et ses causes (arrivée de populations ?) reste à comprendre précisément grâce à l'étude d'un plus grand nombre d'assemblages.

En définitive, les résultats obtenus ouvrent de nombreuses pistes de réflexion sur les trajectoires des premières communautés agro-pastorales d'Europe, ainsi que sur les processus de formation des entités et des groupes culturels du Néolithique ancien. L'analyse technologique des assemblages offre une image multiforme et complexe des plus anciennes communautés d'agro-pasteurs d'Europe, mais soulève également des questionnements fondamentaux sur la structuration sociale de ces communautés et sur leurs mécanismes d'interactions, qu'il conviendra de développer à l'avenir. Les hypothèses formulées rendent en effet indispensable la poursuite des recherches dans cette zone culturellement contrastée, en développant les analyses multiscalaires et les collaborations, en particulier avec les spécialistes des styles et des matières premières céramiques (Marton 2004, 2008 ; Kreiter 2010).

Remerciements

Je remercie la Fondation Fyssen de m'avoir donné l'opportunité d'effectuer cette recherche en finançant mon séjour post-doctoral à Budapest, ainsi que Pál Raczky qui m'a accueillie au sein de son équipe à l'*ELTE Institute of Archaeological Sciences,* m'a autorisée à étudier les corpus de Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös et Polgár-Ferenczi-hát et qui m'a beaucoup aidée pour la conduite de cette recherche. Je remercie Katalin Biró de m'avoir permis d'étudier le corpus de Vörs Máriaasszony-sziget au Musée National de Hongrie. J'exprime ma gratitude à Krisztián Oróss et Tibor Marton pour m'avoir autorisée à étudier le corpus de Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo à l'Académie des Sciences de Hongrie. Un grand merci à Michael Ilett pour sa relecture de l'article et ses précieux conseils.

Bibliographie

- Anders A. et Raczky P. (2009) – Settlement history of the middle Neolithic in the Polgar micro-region (the development of the Alföld Linearband Pottery in the Upper Tisza région, Hungary), in: J. Kozłowski (ed.), *Interactions between different models of Neolithization north of the Central European agro-ecological barrier*, Krakow, Polska Akademia Umiejetnosci, p. 31-50

- Bánffy E. et Oróss K. (2010) –The earliest and earlier phase of the LBK in Transdanubia, in D. Gronenborn et J. Petrasch (eds), *The Spread of the Neolithic to central Europe. International Symposium, Mainz 24 June– 26 June 2005*, Frankfurt, Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz, p. 351

- Bánffy E. et Sümegi P. (2012) –The Early Neolithic Agro-Ecological Barrier in the Carpathian Basin: A Zone for Interaction, in P. Anreiter, E. Bánffy, L. Bartosiewicz, W. Weid, C. Metzner-Nebelsick Archaeological, *Cultural and Linguistic Heritage, Festschrift for Erzsébet Jerem in Honour of her 70th Birthday*, Budapest, Archaeolingua Alapítvány, p. 57-69

- Gelbert A. (2003) – *Traditions céramiques et emprunts techniques dans la vallée du fleuve Sénégal*, Paris, Éditions de la Maison des sciences de l'homme/Éditions Epistèmes, 104 p.

- Gomart L. (2014) – *Traditions techniques et production céramique au Néolithique ancien. Étude de huit sites rubanés du nord est de la France et de Belgique.* Leiden, Sidestone Press, 338 p.

- Gomart L. (sous presse) –Diversity of pottery fashioning methods during the early Neolithic in the Struma Valley (Bulgaria), in L. Salanova et M. Grebska-Kulova, *The Neolithization of the Struma Valley (Bulgaria)*

- Gosselain O. (2002) – *Poteries du Cameroun méridional: Styles techniques et rapports à l'identité*, Paris, CNRS Editions, Monographie du CRA 26, 254 p.

• Kalicz N., Virág Zs. et Biró K. (1998) – The northern periphery of the Early Neolithic Starčevo culture in south-western Hungary: a case study of an excavation at Lake Balaton Poročilo *Documenta Praehistorica* 25, p. 151-188

• Kalicz N., Biró K. et Virág Zs. (2002) – Vörs, Máriaasszony-sziget. Régészeti Kutatások Magyarországon/Archaeological investigations in Hungary. p. 15-26

• Kertész R. et Sümegi P. (2001) – Palaeogeographic characteristics of the Carpathian Basin – an ecological trap during the Early Neolithic? In R. Kertész, J. Makkay (eds.), *From the Mesolithic to the Neolithic. Proceedings of the International Archaeological Conference held in Szolnok 1996*, Budapest, Archaeolingua Main Series 11, p. 405–415.

• Kozłowski J.K. et Raczky P. (2010) – Concluding remarks, in J. K. Kozłowski et P. Raczky (eds.), *Neolithization of the Carpathian Basin: Northermost distribution of the Starčevo/Körös Culture*, Krakow-Budapest, Polska Akademia Umiejętności, p. 349-360.

• Kreiter A. (2010) – Crafting difference: early Neolithic (Körös culture) ceramic traditions in North-east Hungary, in J.K. Kozlowski & P. Raczky P. 2010. (eds), *Neolithization of the Carpa- thian Basin: Northernmost distribution of the Starcevo/Körös culture*. Kraków–Budapest, 266–282.

• Latour B. et Lemonnier P. (eds) (1994) – *De la préhistoire aux missiles balistiques. L'intelligence sociale des techniques*, Paris, Éditions La Découverte, 344 p.

• Livingstone-Smith A. (2001) – *Chaîne opératoire de la poterie : références ethnographiques, analyses et reconstitution*, Bruxelles, Université libre, Faculté de Philosophie et Lettres, Thèse de Doctorat en Philosophie et Lettres, 203 p.

• Aradi, CS. (1992) – 1990-91, Vörs, Máriaasszony-sziget. *Régészeti Füzetek*, 44, 26-27

• Marton T. (2008) – Development of pottery style on the LBK settlement of Balatonszárszó–Kis-erdei-dűlő in Hungary, *Acta Terrae Septemcastrensis* 7, p. 197–216.

• Marton T. (2004) – Material finds from Balatonszárszó Neolithic settlement: connections within and without the TLPC territory. *Antaeus* 27, p. 81–86.

• Mayor A. (2011) – *Traditions céramiques dans la boucle du Niger: ethnoarchéologie et histoire du peuplement au temps des empires précoloniaux*, Frankfurt am Main, Africa Magna Verl., Journal of African Archaeology, Monograph series 7, Human population and paleoenvironment in West Africa, 2, 292 p.

• Oróss K. (2004) – Das neolithische Dorf von Balatonszárszó (Forschungen zwischen 2000–2002), *Antaeus* 27, p. 61–80.

• Oróss K. et Siklósi S. (2012) – Relative and absolute chronology of the Early Neolithic in the Great Hungarian Plain, in A. Anders, S. Siklósi (eds) *The First Neolithic Sites in Central/South-East European Transect. Volume III. The Körös Culture in Eastern Hungary*, BAR International Series 2334, Oxford, Archaeopress, p. 129-159

• Oróss K. (2010) – Architecture of the Linearbandkeramik settlement at Balatonszárszó–Kis-Erdei-dűlő in central Transdanubia, in D. Gheorghiu (ed), *Neolithic and Chalcolithic archaeology in Eurasia : building techniques and spatial organisation. Proceedings of the XV World Congress UISPP* (*Lisbon, 4–9 September 2006*), Oxford, Archaeopress, p. 63–80.

• Raczky P. (2012) – Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös (co-operative orchard), in A. Anders, S. Siklósi (eds) *The First Neolithic Sites in Central/South-East European Transect. Volume III. The Körös Culture in Eastern Hungary*, BAR International Series 2334, Oxford, Archaeopress, p. 97-105

• Raczky P., Sümegi P., Bartosiewicz L., Gál E., Kaczanowska M., Kozłowski J. et Anders A. (2010) – Ecological barrier versus mental marginal zone ? Problems of the northernmost Körös Culture settlements in the Great Hungarian Plain, in D. Gronenborn, Petrasch J. (eds), *The spread of the Neolithic to Central Europe, International Symposium, Mainz 24 June – 26 June 2005*, RGZM, p. 147-174.

• Roux V. (2010) – Lecture anthropologique des assemblages céramiques: fondements et mise en œuvre de l'analyse technologique, in F. Giligny et S. Mery (eds), *Approches de la chaîne opératoire de la céramique : le façonnage, Les nouvelles de l'Archéologie*, 119, Paris, Maison des Sciences de l'Homme, p. 4-9.

• Roux V., Courty M.-A. (2007) – Analyse techno-pétrographique céramique et interprétation fonctionnelle des sites : un exemple d'application dans le Levant Sud chalcolithique, in A. Bain, J. Chabot, M. Moussette (eds), *La mesure du passé : contributions à la recherche en archéométrie (2000-2006)*, British Archaeological Reports, International Series 1700, Oxford, p. 153-167.

• Rye O.S. (1981) –*Pottery Technology: Principles and Reconstruction*, First edition, Taraxacum, 1981, 150 p.

• Salanova L., Vieugué J., Gomart L. (2011) – Methods for investigations of large pottery assemblages: Seriation of Neolithic pottery from Kovachevo near Sandanski, *Arheologia (Sofia)*, p. 7-23.

• Salanova L., Gomart L., Vieugué J. (sous presse) – The Beginning of the Neolithic in Southwest Bulgaria: a Discontinuous Process. in P. Biehl, E. Rosenstock (eds), *Times of Change. The Turn from the 7th to the 6th Millennium BC in the Near East and Southeast Europe,* Çatalhöyük West Mound Project.

• Shepard A.O. (1956) – *Ceramics for the archaeologist*, Washington, Carnegie Institution of Washington, 414 p.

• Vieugué J., Gomart L., Salanova L. (2010) – Les estèques en céramique des potiers néolithiques de l'habitat de Kovacevo (6200-5500 av. J.-C.), in Y. Maigrot et J. Vieugué (eds), Outils de potier néolithiques : traditions techniques et organisation des productions céramiques, *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 107, 4, p. 709-723.

1. Introduction and issues

In Hungary, the middle of the sixth millennium represents a period of major cultural change for the European early Neolithic: the passage of the Balkan early Neolithic to the Linear Pottery (or *Linearbandkeramik,* abbreviated LBK). The emergence of this culture, which defines the first Neolithic of temperate Europe and which broadcasts in less than five centuries until the Paris Basin, is accompanied by a profound change in lifestyles of agro-pastoral communities from the Balkans, as regards their agricultural economy and their habitat structures (Raczky *et al.* 2010). At that time, the agro-pastoral communities exploit notably new lands and build longhouses on wooden posts grouped in villages (Raczky et Anders 2009; Bánffy and Oróss 2010).

This transition period is characterized by a double dynamic, subject to discussions (**Figure 1**):

– On the one hand, an east-west dichotomy can be noticed. The latest manifestations of the Balkans early Neolithic are indeed characterized by the presence in Hungary of two entities, the Starčevo to the west (in Transdanubia, near the Lake Balaton) and the Körös to the east (in the Tisza region), which are notably differentiated by their ceramic styles (Kalicz 1988; 2000) and their settlement systems (Raczky 2012a; Bánffy 2013). The subsistence strategies of the communities belonging to these two entities being still little known at a large scale, the archaeologists hesitate to unite them in a single archaeological culture including two cultural groups or to individualize them into two distinct cultural entities, although both belonging to the Balkan stream (Anders and Raczky 2009). In addition, the origin of these two local variants of the Balkan early Neolithic remains difficult to interpret: is their emergence related to specific environmental conditions or to differences that existed previously in the Balkans? (Bánffy 2013, p. 41).

– On the other hand, a north-south dichotomy can be observed. Towards the middle of the sixth millennium BC, an apparent pause in the process of Neolithisation is observed in Hungary. At that time, the last Balkan early Neolithic sites are found alongside the first sites of the Linear Pottery. On the shores of Lake Balaton, to the west, the most recent Starčevo sites are discovered alongside the first Western Linear Pottery sites (Transdanubian Linear Pottery). In the Tisza region, to the east, the latest Körös sites are found alongside the first Eastern Linear Pottery sites (Alföld Linear Pottery). This break in the Balkan early Neolithic diffusion process seems related to the existence of an agro-ecological barrier in this area, which would require an adaptation of the agro-pastoral communities to a new environment and to new climatic, soil and geological conditions (e.g. Sümegi and Kertész 1998; Kertész and Sümegi 1999; 2001; Bánffy and Sümegi 2012). Proposing the concept of

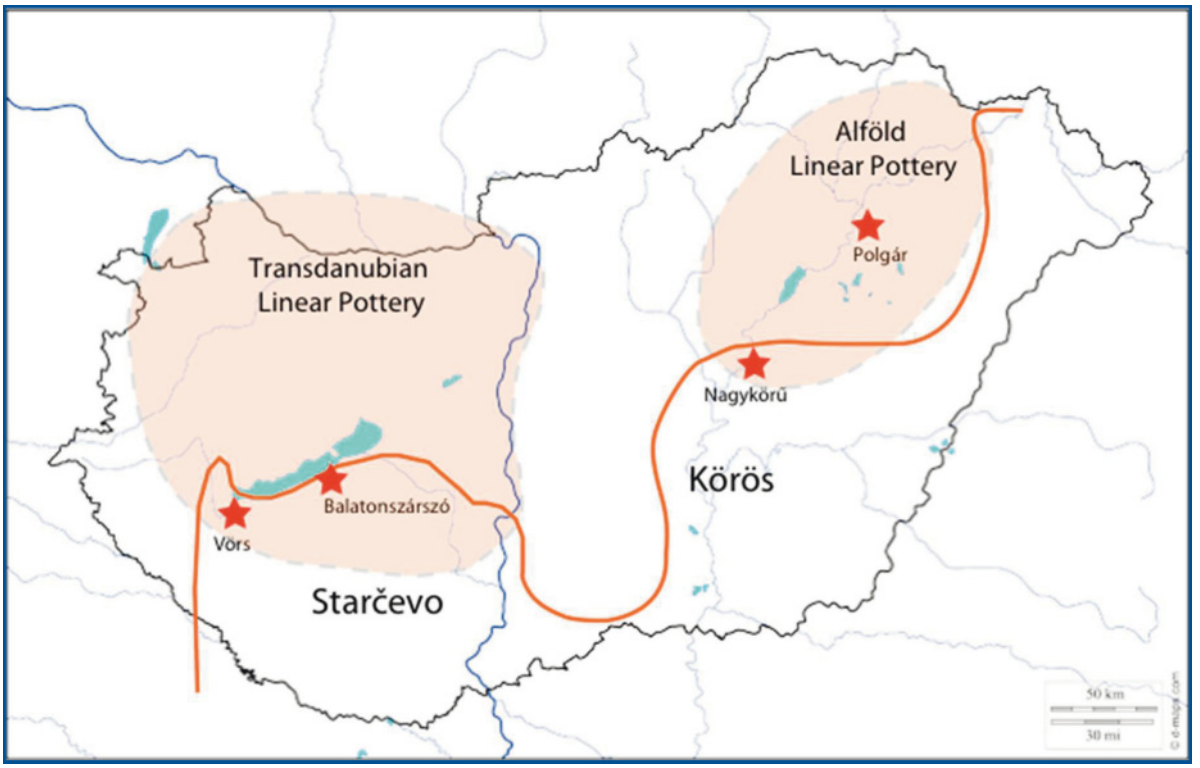


Figure 1 : The different entities observed in Hungary towards the middle of the sixth millennium BC and the sites selected in the framework of this study.

"mental marginal zone," the researchers working on the eastern part of Hungary consider that this necessary readjustment would lead to cognitive changes, resulting in the emergence of a new material culture, namely the Alföld Linear Pottery (e.g. Raczky *et al.* 2010; Kozłowski and Raczky 2010). For the researchers working on the western part of Hungary, the emergence of the Transdanubian Linear Pottery would be related to the integration of indigenous Mesolithic populations among the agro-pastoral communities from the Balkans (e.g. Bánffy *et al.* 2007; Bánffy and Oróss 2010). This hypothesis is notably proposed on the basis of Mesolithic influences in the Transdanubian LBK flint industries and because of environmental data attesting a pre-Neolithic anthropogenic activity in Transdanubia (e.g. Bánffy *et al.* 2007; Bánffy and Oróss 2010).

To take part in these questions, an anthropological approach (Latour and Lemonnier 1994; Roux 2010) of ceramic assemblages discovered in this culturally contrasting area was conducted. This approach, which aims to reconstruct the gestures made by the producers during the manufacture of ceramics, enables to overcome the sole stylistic characterization of pottery, to consider it in terms of technical traditions, transmission of know-how and thus social interactions. In this context, the reconstruction of methods and techniques of fashioning is particularly important, because it seems that this step, more than all the other stages of the *chaîne opératoire*, is relatively resistant to change (Gosselain 2002; Gelbert 2003 Mayor 2011). This stability seems to result from the incorporation of skills during the learning process, which involve automatisms that are difficult for producers to modify, but also from the fact that gestures made during fashioning are often scarcely visible or invisible on the finished vessels (Gosselain 2002). Once learning is completed, the potter will have difficulties in modifying his conceptions and "ways of doing", before he transmits them in turn (Roux 2010). Thus, the reconstruction of techniques and methods of fashioning provides evidence for ways of doing or motors habit transmitted over the long term, within communities of practice.

The identification of these ways of doing enables to identify and differentiate groups of producers and, as a result, to follow their trajectories on the long term.

This methodological framework, providing access to individuals via their motor habits and enabling therefore to identify individual and collective trajectories, enabled to raise several questions about the dynamics involved in the transition from the Balkan early Neolithic to the Linear Pottery. From a synchronic point of view, two main issues arose: first, can we observe a relation between the Starčevo and the Körös ways of doing, which would suggest that these two entities belonging to the Balkan stream correspond to the same community of practice? Then, can we relate these ways of doing to the technical traditions identified further south, in the Balkan early Neolithic?

From a diachronic perspective, the following questions arose: can we observe technical continuity between the two Balkan early Neolithic entities (the Starčevo and the Körös) and the two Linear Pottery groups (Transdanubian Linear Pottery and Alföld Linear Pottery), which would indicate that these successive archaeological cultures correspond to the same social groups and thus to the same wave(s) of Neolithisation? On the contrary, can we detect a significant technical break suggesting that the emergence of the Linear Pottery results from contributions of populations, indigenous or exogenous, among agro-pastoral communities from the Balkans?

2. Material and method

To answer these questions, four settlements attributed to the different identified cultural entities were selected (**Figure 1**). Two of the studied sites are located near the Lake Balaton in Transdanubia (Western Hungary). The first one, Vörs Máriaasszony-sziget (Aradi 1992; Kalicz *et al.* 1998, 2002), includes several habitat structures attributable to the Starčevo culture. Within the assemblage, 178 vases showed diagnostic macrotraces of forming operations. Among them, 90 have been attributed to a forming method. The second site, Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo (Oróss, 2004, 2010; Marton 2004, 2008) provided many house plans. It is characterized by a long occupation sequence from the earlier to the younger phase of the Transdanubian Linear Pottery. For this site, the vases and sherds from the earlier structures were examined. A total of 168 diagnostic vessels were recorded, of which 86 could be associated with a forming method.

The other two selected sites are located in the upper Tisza Valley (eastern Hungary). The first, Nagykörű Tsz. Gyümölcsös (Raczky *et al.* 2010; Raczky 2012), is attributable to the Körös culture. It is characterized by the presence of a refuse pit containing a rich archaeological assemblage, as well as a grave with a northeast-southwest orientation. After examination of the whole assemblage, 233 vessels showing diagnostic macrotraces were recorded. Among them, 60 vessels could be related to a forming method. The second site, Polgár-Ferenczi-hát (Raczky 2004; Anders and Raczky 2009), provided several housing structures assignable to the Alföld Linear Pottery. After examination of the assemblage, 201 diagnostic vases and sherds were recorded. Among them, 73 could be associated with a forming method. As part of this article, the four assemblages are apprehended as a whole; they will be analyzed according to their internal chronology in collaboration with the excavators of these respective sites.

A total of 780 vessels were registered. All technical macrotraces visible on vessels surfaces and in cross-section were taken into account. The analysis focused on characteristics of surface topography, lines of fractures, variations in wall thickness, changes in surface texture, as well as orientation of particles and porosity in cross-section (Livingstone-Smith 2001). Each macrotrace was recorded, coded, photographed and replaced on the profile of the recorded vessel. The identified macrotraces were interpreted in terms of techniques and methods of fashioning on the basis of several experimental and ethnographic reference works (Shepard 1956 Rye 1981; Livingstone-Smith 2001; Gosselain 2002; Gelbert 2003).

3. Results

3.1. The identified forming methods

Among the four assemblages studied in the context of the early and middle Neolithic of Hungary, six forming methods have been identified (**Figure 2**).

The first fashioning method (**Figure 2a**) includes vessels whose base shows, on edges of vertical fractures, sub-circular sections of coils (**Figure 2a**). These traces suggest initial forming of the base with thin coils in spiral (Livinstone Smith 2001). Longitudinal depressions visible on the inner surface evoke the application of hand pressure during shaping. This observation suggests that the base was shaped by compression against a support (**Figure 2b**). The belly and the rim of vessels also show, on edges of vertical fractures, sub-circular sections of coils (**Figure 2c**). These indicate that thin coils, which were deformed slightly or not during their placement, were used to form the belly and the rim.

The second fashioning method (**Figure 2b**) comprises vessels characterized by a base formed with thin coils in spiral, as shown by the presence of a sub-circular configuration on edges of vertical fractures. Longitudinal depressions on the inner surface of the base suggest a shaping by compression against a support, as observed in the first fashioning method. The belly and the rim present, on the edge of vertical fractures, sub-

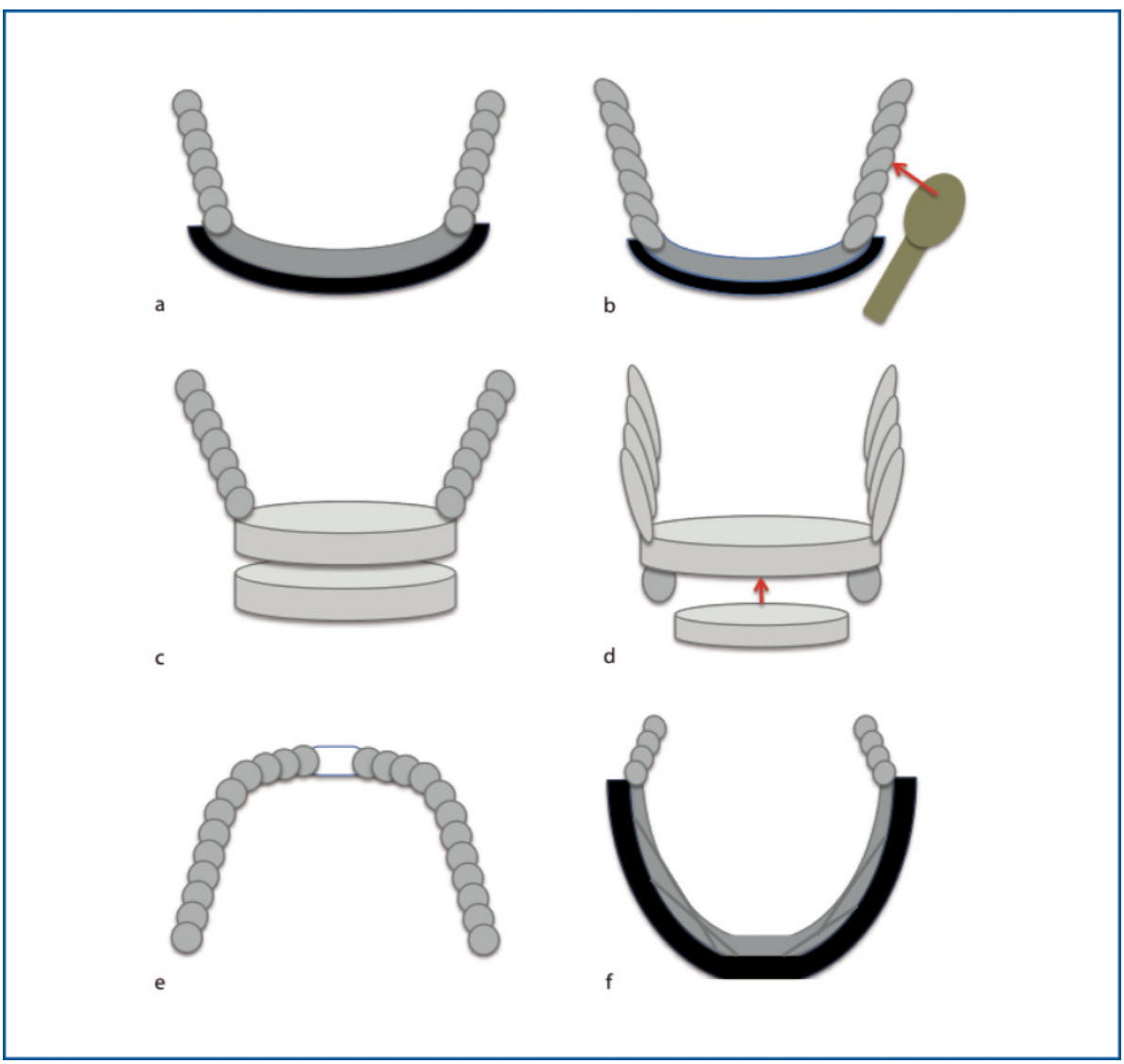


Figure 2 : The six identified forming method within the four studied ceramic assemblages.

oval sections of coils associated with a foliated internal structure. On the outer surface of the belly and the rim, overlapping sub-circular flat areas are observed. The combination of these macrotraces indicates that the belly and the rim were formed by superposition of thin coils, and then shaped using the beating technique. The regular taps of the paddle on outer surfaces cause a change in the internal structure of the clay, giving it a foliated aspect.

The third fashioning method (**Figure 2c**) includes vessels whose base is formed with two or three overlaid slabs: the joins between the slabs are often visible in cross-section. Each of these slabs shows, in cross-section, a sub-circular pattern, which suggest the use of coils in spiral. The belly and the rim of these pots also show, on edges of vertical fractures, sub-circular sections of coils which suggest that they were formed by superposition of thin coils, slightly or not deformed during their placement.

In the fourth fashioning method (**Figure 2d**), the vessel bases show a wide range of technical macrotraces, which suggests fashioning in three phases. First, a slab is formed with thin coils in spiral, as shown by the sub-circular pattern visible in cross section. Secondly a coil, often visible in cross-section, is applied on the junction between the base and the belly, to form an annular foot. Third, a slab is applied at the centre of the base, in order to fill the previously formed annular foot. The belly and the rim of these vessels show sections of elliptical coils. The pots present many oblique fractures and several sherds are vertically broken. These observations suggest initial forming with very elongated coils, probably followed by thinning operations.

The vessels shaped with the fifth method (**Figure 2e**) are formed "upside down": the producer starts to form the rim using a coil, forms the body using the coiling technique and ends the fashioning by forming the base. This forming method is often identified by the presence of a sub-circular hole in the centre of the vessel's base. It corresponds to the hole occurring before the occlusion of the base with a ball of clay. Imperfectly positioned, this ball of clay is often detached from the vessel. This explains the large number of vessels with a sub-circular hole in the centre of their base.

The sixth method (**Figure 2f**) includes vessels whose base and body are characterized by identical macrotraces: in cross-section, the orientation of the porosity is vertical and very high oblique vertical voids are observed. On the outer surface of the shoulder, a horizontal depression is observed. The rim shows in cross-section a sub-circular configuration of pores. The association of these observations suggests a roughing of the base and of the belly in one piece, with thick coils. Secondly, these two parts are shaped on a concave support by moulding, with an intense stretching of the walls causing their refinement and a very important elongation of the coils. While the base and the body are still in the mould, the rim is formed using two to four superimposed and non-deformed coils.

3.2. The spatial distribution of the identified forming methods within the study area

Within the study area (Transdanubia and Tisza region), the spatial distribution of the six identified forming methods reveals significant differences between sites (**Table 1** and **Figure 3**).

First, it is particularly interesting to note that five of the six forming methods identified in Hungary correspond in all respects to those observed in the context of the early Neolithic of the Struma Valley in Bulgaria between 6100 and 5800 BCE (Salanova, Gomart and Vieugué in press; Gomart, in press). Only the sixth method had never been identified among the ceramic assemblages studied in Bulgaria.

Both methods observed on the sites of Starčevo of Vörs (methods 2 and 4) relate to the forming methods used by the producers from the north of the Struma Valley throughout the early Neolithic of Bulgaria (Gomart, in press; Salanova, Gomart and Vieugué in press). Conversely, the two forming methods identified on the Körös site of Nagykörű Tsz. Gyümölcsös (Methods 1 and 3) relate to the ways of doing implemented throughout the Bulgarian early Neolithic in the south of the Struma valley (Gomart, in press; Salanova, Gomart and Vieugué in press).

An east-west dichotomy can also be observed on the Linear Pottery sites.

	Vörs-Máriaasszony-sziget		Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös		Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo		Polgár-Ferenczi-hát	
	N	%	N	%	N	%	N	%
Method 1	-	-	30	50%	2	2%	-	-
Method 2	87	97%	-	-	58	67%	-	-
Method 3	-	-	29	48%	19	22%	-	-
Method 4	3	3%	-	-	7	8%	-	-
Method 5	-	-	1	2%	-	-	-	-
Method 6	-	-	-	-	-	-	73	100%
Total	90	100%	60	100%	86	100%	73	100%

Table 1 : Number of vessels associated to the six identified forming methods within the four studies assemblages (N: number; %: percentage).

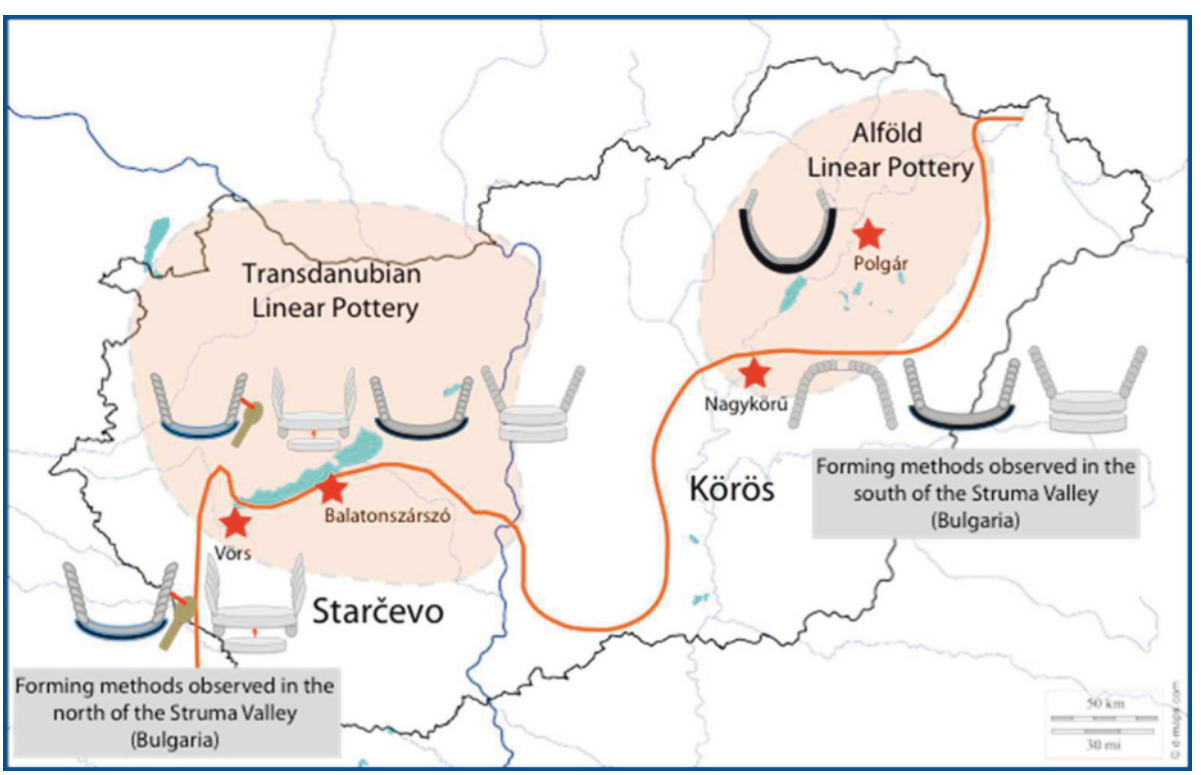


Figure 3 : Spatial distribution of the forming methods identified within the study area.

On the Transdanubian Linear Pottery site of Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo, it is extremely interesting to note the association, at the beginning of the occupation, of forming methods typical of the Starčevo site of Vörs and of the sites located in the north of the Struma Valley (Methods 2 and 4) with forming methods typical of the Körös site of Nagykörű Tsz. Gyümölcsös and of the sites located in the south of the Struma valley (Methods 1 and 3). However, on the Alföld Linear Pottery site of Polgár-Ferenczi-hát, a single forming method can be evidenced (the use of Method 6). In the current state of research, this forming method cannot be related to another studied early Neolithic assemblage.

4. First hypotheses on the trajectories of the communities of practice from the early and middle Neolithic of Hungary

These results lead to propose first hypotheses on the spatial and temporal trajectories of the several communities of practice identified within the early and middle Neolithic in Hungary.

First, the assemblages from the Körös site of Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös and the Starčevo site of Vörs reflect different motor habits, which seem to relate to two distinct communities of practice. It is possible to connect those to the two communities of practice that occupied respectively the north and the south of the Struma Valley throughout the Bulgarian early Neolithic (Gomart in press; Salanova, Gomart and Vieugué in press). Thus, the dichotomy in ways of doing observed over the long term in the Struma Valley seems to be found in Hungary more than 200 years later and 800 km further north, along an east-west partition. In other words, the two communities of practice that coexisted in the Struma Valley during the early Neolithic seem to be found at the end of Balkan early Neolithic within two cultural entities or cultural groups: the Starčevo and the Körös, spread respectively to the west and to the east of Hungary.

Second, the variability observed in the earlier structures of the Transdanubian Linear Pottery site of Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo enables to propose several hypotheses. The fact that, from the beginning of the occupation, the technical practices typical of the Starčevo site of Vörs and of the sites located in the north of the Struma Valley are observed alongside the technical practices typical of the Körös site of Nagykörű Tsz. Gyümölcsös and of the sites located in the south of the Struma valley suggests the coexistence in this village of producers belonging to the two communities of practice. The occurrence of forming methods typical of the early Neolithic of Bulgaria and Hungary suggests continuity in technical practices between the Starčevo producers and some Transdanubian Linear Pottery producers. This observation enables to suppose a high contribution of Starčevo social groups during the formative phase of the Transdanubian Linear Pottery, as it has already been proposed (e.g. Bánffy *et al.* 2007). However, before giving any definitive assumption concerning the ceramic technical traditions, it will be essential to analyze some assemblages attributed to the earliest phase of the Transdanubian Linear Pottery, which is not present at the site of Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo. Furthermore, the identification of forming methods typical of the Körös site and of the south of the Struma Valley could indicate arrivals of populations in Transdanubia at the emergence of the Transdanubian Linear Pottery. In the current state of research, it is not possible to comment on the exact origin of these populations, whose technical practices can – for now – be related to those observed in the Tisza region, but also in the south of the Struma Valley in Bulgaria.

Third, the use of Method 6 throughout the Alföld Linear Pottery occupation of the Polgár-hát-Ferenczi site, which had never been identified on an early Neolithic assemblage, evokes a break with technical practices observed on the Körös site of Nagykörű Tsz. Gyümölcsös. This preliminary result, which might suggest the arrival of population during the formative phase of the Alföld Linear Pottery, incites to pursue technological studies in the Tisza region to look for possible connections with other sites. It will be necessary to verify whether this forming method characterizes other assemblages of the Alföld LBK.

Conclusion and perspectives

This study enabled to connect and to put into perspective the results obtained in the context of Balkan Early Neolithic (Vieugué, Gomart et Salanova 2010; Salanova, Vieugué et Gomart 2011; Salanova, Gomart and Vieugué in press; Gomart in press) and the younger context of the Linear Pottery (Gomart 2014). Considering the ceramic techniques as a succession of gestures under-

lying their manufacture, and which involve specific knowledge, provided lines of thought on a period of major cultural transformation at the middle of the sixth millennium in the southern area of the Carpathians. It is thus possible to assume that the Starčevo and Körös populations belonged to two communities of practice, both of which had already been located 800 km further south and 200 years ago in Bulgaria, respectively in the north and the south of the Struma Valley (Gomart in press; Salanova, Gomart, Vieugué in press). If these results were confirmed on a larger number of ceramic assemblages attributed to the Körös and to the Starčevo, we could then consider that the emergence of the two local variants of the Balkan early Neolithic in Hungary would be related to differences existing previously within the first agro-pastoral communities settled in the Balkans.

The transition between these two entities of Balkan tradition and both Linear Pottery groups could have happened according to substantially different mechanisms between the east and the west of Hungary. To the west, in Transdanubia, if continuity of ways of doing was observed between the Starčevo site of Vörs and the Transdanubian Linear Pottery site of Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo, the identification of forming methods characteristic of the Körös (but also of the south of the Struma Valley in Bulgaria) enabled to assume the arrival and the integration of populations from a different community of practice, whose exact origin needs yet to be clarified. However, to the east, in the Tisza Valley, a break between ways of doing implemented on the Körös site of Nagykörű Tsz. Gyümölcsös and on the Alföld Linear Pottery site of Polgár-Ferenczi-hát was observed. This break and its causes remain to be understood through the study of a larger number of assemblages.

Ultimately, the results raise many questions on the trajectories of the first agro-pastoral communities in Europe, as well as the formation process of cultural entities of the early Neolithic. The technological analysis of four ceramic assemblages provides a multifaceted and complex picture of the earliest agro-pastoralists communities in Europe and raises fundamental questions about their social structure and their interaction mechanisms, which should be addressed in the future. The assumptions proposed make indeed essential to conduct further research in this culturally contrasting area, to develop multi-scalar analysis and collaborations, particularly with the specialists of ceramic decorative styles and ceramic raw materials (Marton 2004, 2008; Kreiter 2010).

Acknowledgments

I would like to thank the Fyssen Foundation for giving me the opportunity to conduct this research by funding my postdoctoral stay in Budapest, as well as the Professor Pál Raczky who welcomed me in his group at the ELTE Institute of Archaeological Sciences, allowed me to study the assemblages of Nagykörű-Tsz. Gyümölcsös and of Polgár-Ferenczi-hát and helped me to conduct this research. My thanks also to Katalin Biró for allowing me to study the assemblage of Vörs Máriaasszony-sziget at the National Museum of Hungary. I express my gratitude to Krisztián Oróss and Tibor Marton for allowing me to study the assemblage of Balatonszárszó-Kis-erdei-dűlo at the Hungarian Academy of Sciences. Many thanks to Michael Ilett for proofreading this article and for his valuable advises.

Pêche sur la côte d'Azanie : Exploration des premières adaptations côtières d'Afrique orientale par l'étude des restes de poissons de sites du premier millénaire de notre ère

Eréndira QUINTANA MORALES

Post-doctorante à UMR 7209 « Archéozoologie, Archéobotanique : Sociétés, Pratiques et Environnements », Université de la Sorbonne, MNHN, CNRS, Paris, France

Résumé

Les voyageurs qui ont visités la côte d'Afrique orientale durant le premier millénaire de notre ère ont noté que l'Azanie, comme on l'appelait alors, était habitée par des populations qui se livrent à la pêche avec des bateaux cousus, des pirogues et des nasses. Quoique des recherches archéozoologiques aient démontré l'importance de la pêche dans les communautés côtières du deuxième millénaire de l'Afrique Orientale, les données archéozoologiques pour les périodes antérieures restent limitées. Ce projet étudie les adaptations côtières d'Afrique orientale au premier millénaire à travers l'analyse des restes de poissons provenant de sites récemment fouillés sur les îles de Zanzibar, Pemba, Mafia, et des Comores. Les principaux objectifs ont été de déterminer la variété et les tailles des poissons exploités dans les zones côtières Afrique orientale au cours du premier millénaire et d'identifier les modèles spatiaux et chronologiques de l'exploitation maritime en utilisant des méthodes archéozoologiques. Les résultats préliminaires indiquent qu'il existe des différences clés dans les pratiques de pêche entre le premier et le deuxième millénaire, comme une plus grande tendance à s'aventurer plus loin de la côte dans les périodes ultérieures. Ces résultats permettent de mieux comprendre le rôle de la pêche, une activité économique clé, pendant les transitions culturelles importantes dans cette région.

Mots-clés

Adaptation littorale, Afrique orientale, âge du fer, pêche, archéozoologie

Fishing on the Azanian coast: Exploring early eastern African coastal adaptations through the study of fish remains from first millennium CE sites

Abstract

Travellers who visited the eastern African coast during the first millennium AD recorded that Azania, as it was then known, was inhabited by people who engaged in fishing with sewn boats, dugout canoes, and basket traps. Although zooarchaeological research has demonstrated the important role of fishing in the second millennium CE coastal communities of eastern Africa, there has been limited zooarchaeological data for earlier periods. This project investigates eastern African coastal adaptations in the first millennium CE through the analysis of fish remains from recently excavated sites on the islands of Zanzibar, Pemba, Mafia, and Comoros. Zooarchaeological methods were used to determine the range and types of fish exploited in coastal eastern Africa during the first millennium

and identify spatial and chronological patterns of maritime exploitation. Preliminary results indicate that key differences in fishing practices exist between first and second millennium settlements, such as a greater tendency to venture farther offshore in later periods. These results provide an understanding of the role of fishing, a key economic activity, during important cultural transitions in this region.

Keywords

Coastal adaptations, eastern Africa, Iron Age, fishing, zooarchaeology

Introduction

Dans le document « le *Periplus Maris Erythraei*, » datant du premier siècle de notre ère, l'Azanie se réfère à la côte de l'Afrique orientale, une région habitée par des populations qui se livrent à la pêche avec des bateaux cousus, des pirogues, et des nasses (Casson 1989, 59-60 ; Freeman-Grenville 1962, 1). Les recherches archéozoologiques ont démontré l'importance de la pêche dans les communautés côtières de l'Afrique orientale, en particulier au deuxième millénaire de notre ère, quand se développait une société urbaine, islamique, et commerciale (Quintana Morales 2013). Des études antérieures montrent l'importance de la pêche comme une activité de subsistance au premier millénaire, mais elles sont limitées par la taille de l'échantillon et le manque de détail des analyses. Cet article présente les résultats préliminaires de l'analyse récente des restes de poissons provenant de sept sites côtiers du premier millénaire en Afrique orientale sur les îles de Zanzibar, Pemba, Mafia, et des Comores (**Figure 1**).

Les assemblages de poissons décrits ici comprennent plus de 10 000 spécimens identifiés qui montrent l'exploitation de 41 familles de poissons durant le premier millénaire de notre ère. L'objectif principal était de déterminer la variété des poissons exploités sur le littoral d'Afrique orientale au cours du premier millénaire et d'évaluer les modèles régionaux et chronologiques. J'ai pris en considération les espèces de poisson et les tailles des spécimens pour reconstituer les habitats qui ont été exploités et les techniques utilisées. J'ai comparé la taille des poissons, les indices de diversité, et la variété de taxons à travers les séquences chronologiques sur les différents sites pour identifier les différences dans les stratégies de pêche au cours du premier millénaire. J'ai étudié la transformation du poisson et les pratiques liées à sa consommation à travers l'enregistrement des traces taphonomiques, telles que les découpes et les brûlures, ainsi que la distribution des éléments crâniens et postcrâniens.

Cette recherche contribue à l'étude des adaptations côtières par les communautés de pêcheurs qui ont participés au commerce local et de longue distance au cours du premier millénaire et forme une partie intégrante des travaux effectués par le Projet Sealinks, dirigé par Nicole Boivin de l'Université d'Oxford. Le projet Sealinks examine les premiers réseaux d'échange et la translocation des animaux et des plantes à travers l'océan Indien par l'application des approches archéobotaniques, archéozoologiques, paléo-environnementales et génétiques (Boivin et Fuller 2009 ; Fuller et Boivin 2009 ; Helm et al. 2012 ; Crowther et al. 2014). La majorité du matériel analysé pour cette recherche a été récupérée systématiquement de fouilles récentes réalisées par le Projet Sealinks, permettant des comparaisons spatiales et chronologiques entre ces sites.

Méthodologie

J'ai identifié, enregistré, et quantifié les restes de poisson provenant de sept villages côtiers datés du premier millénaire : Ras Mkumbuu (5°11'46″S, 39°39'46″E), Fukuchani (5°49'18″S, 39°17'27″E), Unguja Ukuu (6°18'0″S, 39°29'0″E), Kaole Village (6°27'40.2″S, 38°56'33.8″E), Juani Primary School (7°59'23″S, 39°46'57″E), Gnamawi (11°22'26″S, 43°22'29″E), et Old Sima (12°12'34″S, 44°16'7″E). L'utilisation de la collection comparative ostéologique des poissons de l'océan Indien disponible dans le laboratoire d'archéozoologie du Muséum National d'Histoire Naturelle à Paris était un élément essentiel de l'analyse. Trois références principales ont été utilisées pour examiner la diversité des espèces de poissons marins enregistrée pour la

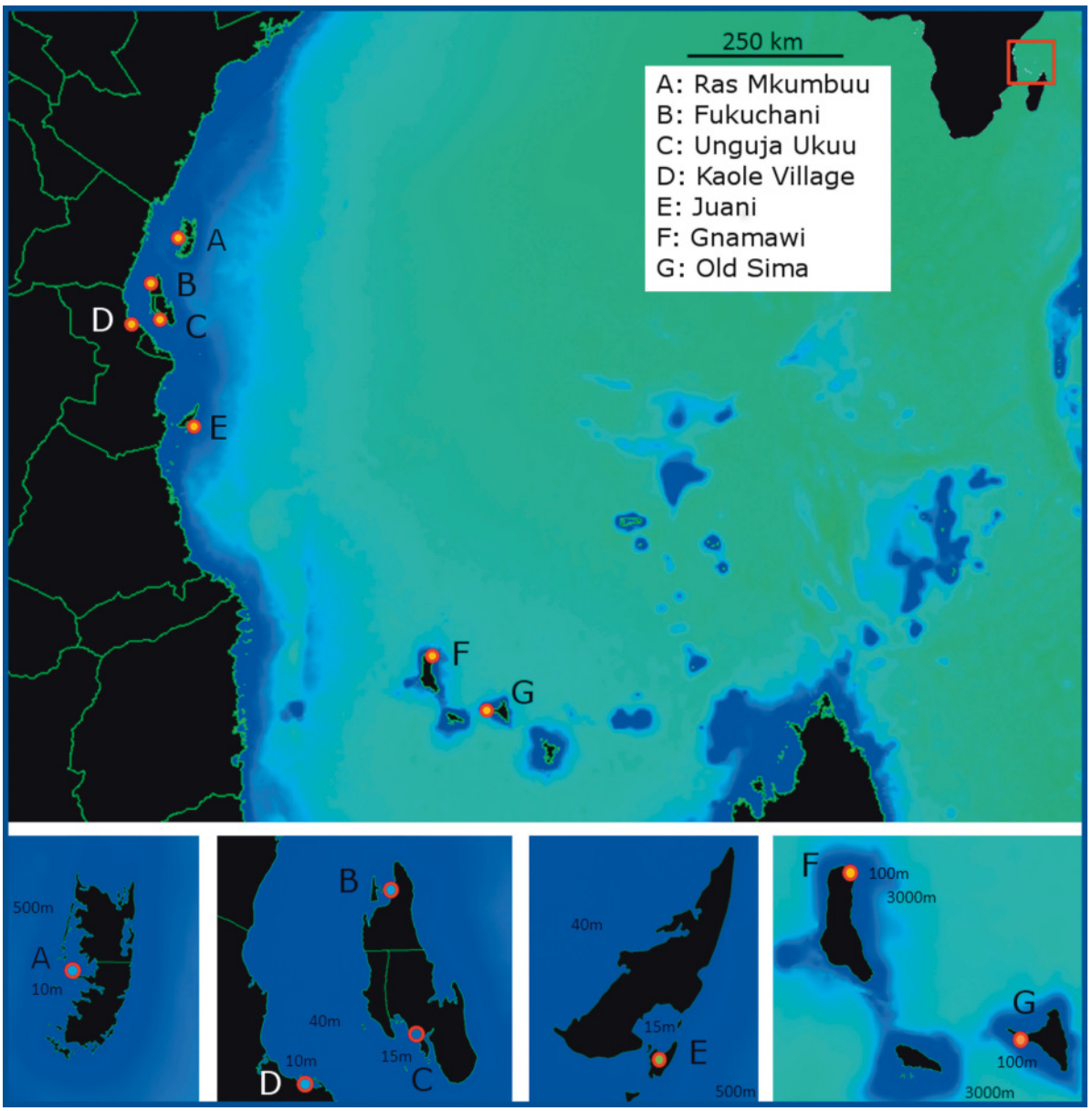


Figure 1 : Carte des sites inclus dans cette étude

région : *FAO Species Identification Sheets for Fishery Purposes : Western Indian Ocean* (Fischer and Bianchi 1984), *FishBase* (Froese and Pauly 2012), and *Smith's Sea Fishes* (Smith et al. 1986). La nomenclature taxonomique des poissons a été consultée dans le *Catalog of Fishes* (Eschmeyer 2015).

Les restes de poisson ont été attribués à la catégorie taxinomique la plus spécifique possible en comparant les caractéristiques morphologiques des spécimens de la collection comparative. Les attributions taxinomiques ont été faites sur la base des caractères morphologiques de chaque fragment et non par l'association avec d'autres spécimens identifiés dans l'échantillon. Tous les éléments du squelette ont été considérés pour l'analyse. Le nombre minimal d'individus (NMI) a été calculé pour chaque contexte, en tenant compte de la latéralité et de la taille des pièces osseuses. Les os ont été examinés au moyen

d'une loupe ou d'un microscope de laboratoire pour déceler les traces de découpe, de morsure de rongeur, et de brûlure. Pour chaque élément au moins attribué à une famille, j'ai estimé le poids et la longueur totale du poisson correspondant par comparaison directe avec des spécimens de référence de poids et de longueur connus, tout au moins chaque fois que les restes de poisson étaient suffisamment complets et qu'il y avait des spécimens de comparaison appropriés.

Représentation taxinomique

La grande majorité des restes identifiés représente des espèces de poissons osseux (téléostéens = 99 %). Bien que 39 familles de poissons osseux aient été identifiées, dix familles représentent ensemble 88 % du nombre total de restes : Lethrinidae (empereurs), Serranidae (mérous), Scaridae (perroquets), Carangidae (carangues), Siganidae (poissons-lapins), Acanthuridae (chirurgiens), Lutjanidae (vivaneaux), Mugilidae

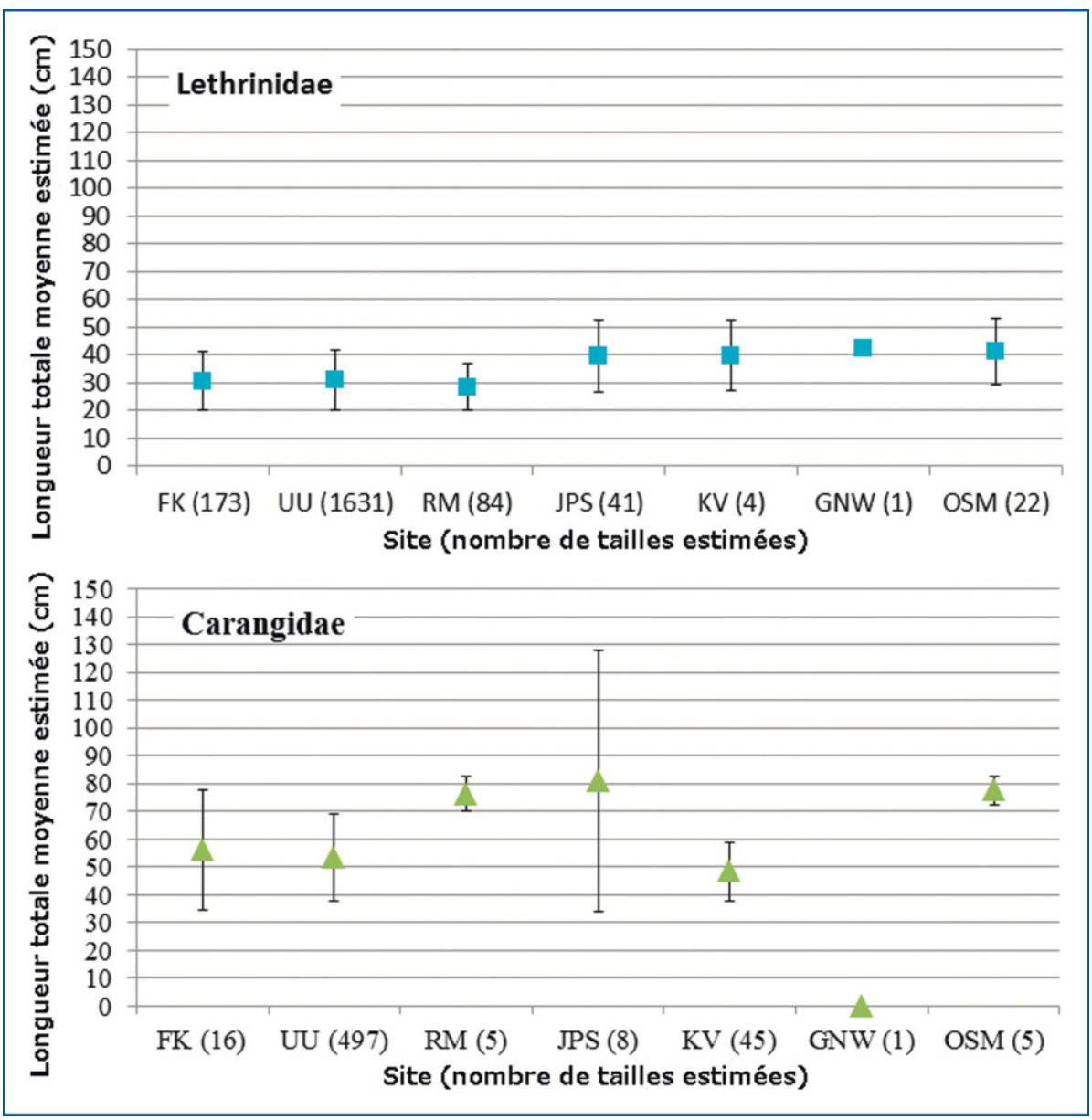


Figure 2 : Longueur totale moyenne estimée de Lethrinidae et Carangidae (+/– 1 ET)

(mulets), Albulidae (poissons-bananes), et Haemulidae (grondeurs). Le nombre minimal d'individus (NMI) calculé permet de comparer l'abondance relative de chaque famille de poissons par site, montrant la variabilité dans les principales familles. Les empereurs sont le plus souvent représentés (> 20 %) à Unguja Ukuu, Fukuchani, et Ras Mkumbuu. À Juani, empereurs, mérous, et poissons perroquets sont également représentés (~ 15 % chacun). Les mérous sont la famille la plus abondante à Gnamawi (31 %) et à Old Sima ce sont les perroquets (27 %), alors qu'à Kaole Village, les carangues (30 %) et les mulets (27 %) forment la majorité. Un petit nombre de poissons cartilagineux (requins et raies) a été enregistré sur 5 sites : Unguja Ukuu, Ras Mkumbuu, Juani, Kaole Village, et Sima. Ces poissons représentent moins de 2 % de chaque assemblage, sauf à Juani, où ils représentent 8 % du total du NMI.

Estimation de la taille

J'ai comparé la longueur totale moyenne estimée des familles les plus abondantes pour déduire des stratégies de pêche et détecter si les poissons capturés étaient adultes ou juvéniles. Dans l'ensemble, la longueur totale moyenne est supérieure à 30 cm, ce qui suggère que les individus ont été capturés adultes pour la plupart des familles de poissons les plus communes. La gamme des valeurs moyennes de la longueur totale varie selon les familles. Les empereurs (Lethrinidae) ont une longueur totale moyenne plus constante entre les sites, alors que les valeurs moyennes et les écarts-types de carangues (Carangidae) sont plus variables (**Figure 2**). Cette tendance peut être associée à la variabilité de la taille des espèces dans chaque famille. Actuellement, il y a 27 espèces d'empereurs enregistrées pour la région ouest de l'océan Indien avec une longueur totale maximale qui varie entre 20 et 100 cm (Froese et Pauly 2015). Parmi les 69 espèces de carangues enregistrées pour cette région, la longueur totale maximale varie de 20 à 250 cm, avec une longueur à maturité variant de 13 à 50 cm (Froese et Pauly 2015). La longueur et l'écart type des valeurs moyennes totales plus élevées pour les carangues reflètent la grande diversité des tailles atteintes par les espèces de cette famille. Les stratégies de pêche peuvent également déterminer la gamme de taille des poissons capturés (Morales Muñiz 2008). La variabilité de la moyenne et l'écart-type de la longueur totale des carangues suggèrent que les stratégies utilisées pour les capturer ont permis un plus grand échantillonnage des tailles, soit par l'utilisation d'une variété de méthodes de pêche soit par l'emploi d'une méthode qui capture une large gamme de tailles. En revanche, la taille plus petite et plus régulière des poissons-empereurs

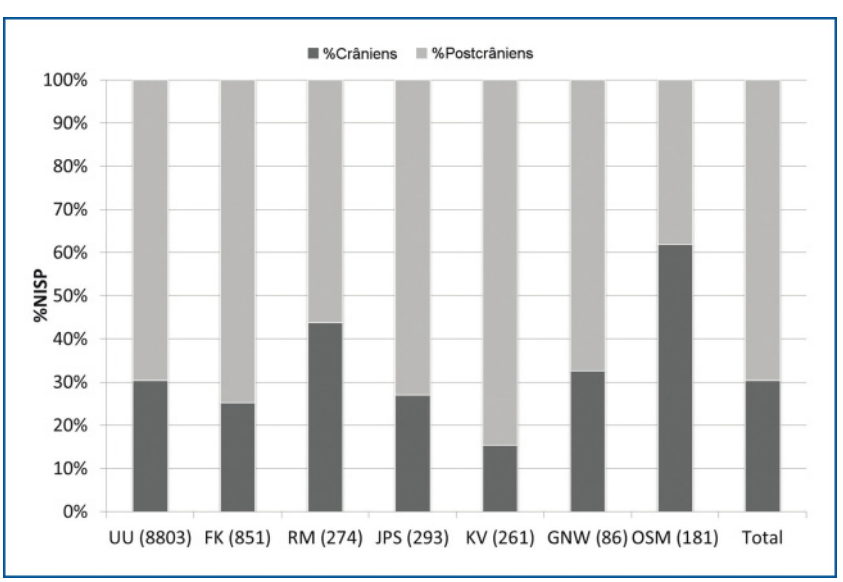


Figure 3 : Proportions des éléments crâniens et postcrâniens (Les tailles des échantillons sont entre parenthèses.)

entre les sites pourrait résulter de l'utilisation d'une stratégie de pêche dans la région ayant pour objectif de capturer les spécimens de petites et moyennes tailles.

Distribution des éléments du squelette

La majorité de tous les os de poissons identifiés était des éléments postcrâniens (70%) et pour la plupart ce sont des vertèbres (**Figure 3**). Les éléments principaux de la région crânienne comprennent les pièces des mâchoires inférieures et supérieures : prémaxillaire, dentaire, maxillaire et articulaire. La proportion des éléments crâniens et postcrâniens est différente entre les sites. Par exemple, la grande majorité des éléments (85 %) de Kaole Village est postcrânienne, pendant qu'une proportion inférieure (38 %) des éléments postcrâniens est représentée à Old Sima. Ces tendances peuvent concerner les familles qui sont les plus abondantes sur chaque site. Les mulets, qui sont particulièrement abondants à Kaole Village, sont le plus souvent identifiés par des vertèbres. D'autre part, la famille des perroquets, la plus abondante à Old Sima, a des éléments crâniens plus robustes et identifiables. Des proportions importantes d'éléments crâniens et postcrâniens dans tous les échantillons indiquent que les poissons ont été généralement préparés et consommés entiers.

Les traces taphonomiques

La quantité de modifications sur la superficie des ossements de poisson était minimale (**Figure 4**). Le nombre total des os avec des marques de découpe visibles était petit (0,25 %). Les marques de découpe sont visibles principalement sur les vertèbres, qui sont les éléments les plus nombreux, mais sans un modèle identifiable. Le nombre des marques de découpe peut être limité par une utilisation minimale des stratégies de boucherie et masqué par les processus post-dépositionnels (Willis et al. 2008). Les marques de morsure de rongeur étaient extrêmement rares (0,05 %). Un petit pourcentage des os (0,65 %),

Figure 4 : A) Marques de morsure de rongeur sur un prémaxillaire de Carangidae, B) Marque de découpe sur une épine non-identifiée, C) Traces de brûlure sur une vertèbre de Mugilidae, D) Vertèbre déformée de Mugilidae, E) Marque de découpe sur une vertèbre de Lutjanidae (échelle de 1 cm)

la plupart des vertèbres, ont été déformées, probablement par les processus de digestion ou processus post-dépositionnels. Les traces de brûlure étaient plus fréquentes (5 %) et particulièrement évidentes dans des contextes particuliers à Unguja Ukuu, Kaole Village, et Old Sima.

Comparaison chronologique

Actuellement, seulement Unguja Ukuu et Juani ont des chronologies plus détaillées qui peuvent être utilisées pour étudier les tendances diachroniques. Une comparaison de l'abondance relative des sept familles les plus abondantes révèle que la proportion des empereurs (Lethrinidae) augmente au fil du temps sur les deux sites (**Figures 5 et 6**). Entre la période première (c. 200-500 CE) et la période ultérieure (c. 500-1500 CE) à Juani, l'abondance des empereurs augmente de 16 à 29 % de l'échantillon total. À Unguja Ukuu, les poissons empereurs sont déjà dominants dans la période antérieure (c. 650-800 CE), représentant 17 % de l'échantillon total, et leur abondance augmente légèrement, à 22 %, dans la période suivante (c. 800-1050 CE).

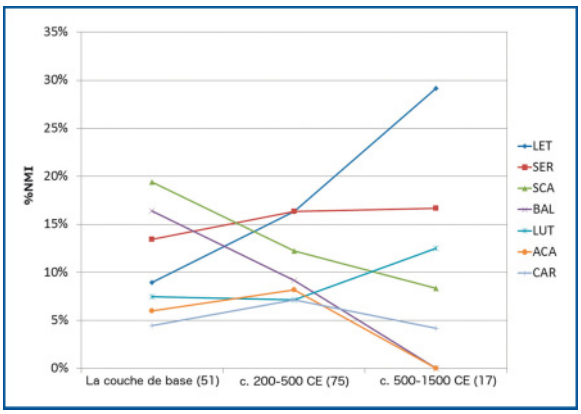


Figure 5 : Répartition chronologique des sept familles de poissons les plus abondantes à Juani (Les tailles des échantillons sont entre parenthèses.)

Discussion

Les adaptations côtières du premier millénaire sur le littoral d'Afrique orientale démontrent différentes stratégies de pêche dans les divers habitats à proximité des côtes. La majorité des taxons identifiés peut se trouver à proximité du corail et des habitats rocheux, indiquant l'importance des récifs coralliens. Les assemblages incluent aussi

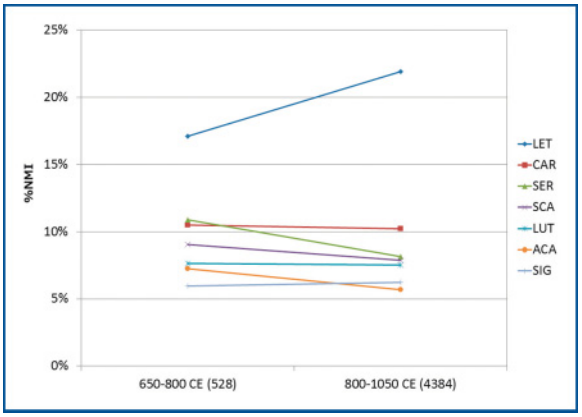


Figure 6 : Répartition chronologique des sept familles de poissons les plus abondantes à Unguja Ukuu (Les tailles des échantillons sont entre parenthèses.)

des poissons de l'estuaire, tels que les mulets (Mugilidae) et le poisson-chat (Ariidae). Les différences dans la composition en poissons exploités parmi les assemblages démontrent l'influence de l'environnement local. Les poissons de récif, tels que les perroquets (Scaridae) et les mérous (Serranidae) sont plus abondants dans les sites des îles situés aux bords de récifs, comme Old Sima. Les mulets sont particulièrement fréquents dans le site continental de Kaole Village où les conditions sont plus favorables pour les poissons de l'estuaire. Ces résultats suggèrent que les premiers pêcheurs étaient bien adaptés pour exploiter les ressources marines localement disponibles, un modèle qui est également constaté dans les périodes ultérieures (Quintana Morales et Horton 2014).

Bien que des estimations de la taille des poissons aient été effectuées pour quelques sites côtiers (Wright et al. 1984, Van Neer 2001, Horton et Mudida n.d.), cette recherche est la première à comparer systématiquement les tailles moyennes estimées dans la région. Les résultats démontrent que la taille des poissons principalement capturés est variable, sauf concernant les poissons-empereurs. La longueur totale moyenne des empereurs (Lethrinidae), la famille la plus abondante dans l'ensemble, est toujours comprise entre 30 et 40 cm dans les différents sites, ce qui indique qu'ils ont été probablement capturés par des filets ou des nasses plutôt qu'à la ligne. En revanche, la variabilité de la taille des carangues (Carangidae) reflète l'utilisation de

différentes stratégies utilisées pour capturer des spécimens de différentes tailles. Les grandes carangues peuvent être prises avec des lignes de pêche tandis que les filets et les nasses servent à exploiter les plus petits spécimens. Les poissons herbivores, tels que les perroquets (Scaridae), les chirurgiens (Acanthuridae) et les poissons-lapins (Siganidae) peuvent être capturés dans des nasses et des filets lorsque ceux-ci sont des spécimens de petite ou moyenne taille, tandis que les plus grands spécimens peuvent être harponnés. La gamme de tailles et la haute diversité des taxa indiquent que les premiers pêcheurs de cette région étaient qualifiés pour une variété de techniques qui comprennent la construction, l'utilisation et la maintenance de divers instruments de pêche, comme les harpons, les lignes, les nasses et les filets.

De manière significative, on retrouve dans les assemblages d'Unguja Ukuu et de Juani des vertèbres de requin (13 et 18 NISP, respectivement) datant d'avant le 9ème siècle. Plus au nord, sur la côte, à Shanga, Mudida et Horton (1996) signalent trois spécimens de requin gris (*Carcharhinus* spp.) dans la phase 4, datant de la fin du 10ème siècle, suivie par une augmentation significative de leur nombre au cours du deuxième millénaire. Ces données suggèrent que les pêcheurs du premier millénaire ont occasionnellement capturé ces types de poissons, grands et rapides, bien qu'ils n'aient pas été significativement exploités jusqu'à des périodes ultérieures. Les comparaisons diachroniques à une échelle régionale indiquent une augmentation significative des activités de pêche hauturière durant le deuxième millénaire, en lien avec les sites qui dénotent une activité socio-économique plus complexe (Quintana Morales 2013 ; Quintana Morales et Horton 2014) et un sens développé d'identité maritime (Fleisher et al. 2015).

Un autre changement important dans l'exploitation des poissons, détecté à Unguja Ukuu et à Juani, est l'abondance relative croissante avec le temps des poissons-empereurs (Lethrinidae). À Juani, le pourcentage des empereurs double presque pratiquement entre les périodes les plus anciennes (c. 200-500 CE) et les plus récentes (c. 500-1500 CE). À Unguja Ukuu, les poissons-empereurs sont déjà dominants aux environs de 650-800 CE, et leur abondance relative augmente légèrement vers la fin du premier millénaire. La domination des poissons-empereurs est observée dans plusieurs échantillons de poissons provenant de sites côtiers du deuxième millénaire (Mudida et Horton 1996 ; Fleisher 2003 ; Quintana Morales 2013 ; Horton et Mudida n.d.). À Shanga, les données sur les restes des poissons tout au long de l'occupation à long terme de la ville montrent une tendance haussière de l'abondance des empereurs entre 800 et 1400 CE, qui est interprétée comme une augmentation de la pêche au filet (Horton et Mudida n.d.). Des nouvelles données sur les sites côtiers du premier millénaire montrent aussi une abondance croissante des poissons-empereurs vers la fin du premier millénaire, mais cette exploitation ne semble toutefois pas être aussi répandue que durant le deuxième millénaire.

Conclusion

Cette recherche démontre que les pêcheurs du premier millénaire CE utilisaient divers outils de pêche pour exploiter une faune piscicole diversifiée, en espèces et en tailles, et qui reflète la richesse des ressources disponibles tout au long de la côte. Bien que les requins et les scombridés (Scombridae) soient enregistrés en très petit nombre, la grande majorité des poissons capturés dans ces assemblages était accessible près de la côte, autour des récifs et dans les estuaires à proximité des sites. L'exploitation du poisson-empereur (Lethrinidae) n'est pas aussi répandue qu'au cours du deuxième millénaire, mais les données diachroniques disponibles montrent une augmentation de l'abondance relative de ces poissons tout au long du premier millénaire. Les poissons capturés ont été généralement ramenés entiers sur les sites, où ils ont probablement été cuits, consommés et jetés. Certains os montrent des signes de découpe et de brûlure qui peuvent être liés à des pratiques de boucherie et de cuisine. Les habitants de la côte d'Afrique orientale au premier millénaire possédaient les capacités et les outils nécessaires pour établir et soutenir des villages côtiers, grâce à l'exploitation des ressources aquatiques, où ils pouvaient interagir avec les commerçants et les voyageurs en provenance de l'océan Indien.

Bibliographie

- Boivin, Nicole, et Dorian Fuller. 2009. "Shell Middens, Ships and Seeds: Exploring Coastal Subsistence, Maritime Trade and the Dispersal

of Domesticates in and Around the Ancient Arabian Peninsula." *Journal of World Prehistory* 22 (2): 113–180.

• Casson, Lionel. 1989. *The Periplus Maris Erythraei*. Princeton, N.J: Princeton University Press.

• Crowther, Alison, Mark Horton, Anna Kotarba-Morley, Mary Prendergast, Eréndira Quintana Morales, Marilee Wood, Ceri Shipton, et al. 2014. "Iron Age Agriculture, Fishing and Trade in the Mafia Archipelago, Tanzania: New Evidence from Ukunju Cave." *Azania : Archaeological Research in Africa* 49 (1): 21–44.

• Eschmeyer, W.N., ed. 2015. "Catalog of Fishes : Genera, Species, References." http ://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp.

• Fischer, W., et G. Bianchi. 1984. *FAO Species Identification Sheets for Fishery Purposes: Western Indian Ocean (fishing Area 51)*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

• Fleisher, Jeffrey Barnet. 2003. "Viewing Stonetowns from the Countryside: An Archaeological Approach to Swahili Regional Systems, AD 800-1500." PhD dissertation, University of Virginia.

• Fleisher, Jeffrey, Paul Lane, Adria LaViolette, Mark Horton, Edward Pollard, Eréndira Quintana Morales, Thomas Vernet, Annalisa Christie, et Stephanie Wynne-Jones. 2015. "When Did the Swahili Become Maritime?" *American Anthropologist*:

• Freeman-Grenville, G. S. P. 1962. *The East African Coast; Select Documents from the First to the Earlier Nineteenth Century*. Oxford: Clarendon Press.

• Froese, R., et D. Pauly. 2015. "FishBase." World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org.

• Fuller, Dorian Q., et Nicole Boivin. 2009. "Crops, Cattle and Commensals across the Indian Ocean: Current and Potential Archaeobiological Evidence." *Plantes et Sociétés*, 13–46. Études Océan Indien 42-43. Paris: Institut National des Langues et Civilisations Orientales.

• Helm, Richard, Alison Crowther, Ceri Shipton, Amini Tengeza, Dorian Fuller, et Nicole Boivin. 2012. "Exploring Agriculture, Interaction and Trade on the Eastern African Littoral: Preliminary Results from Kenya." *Azania: Archaeological Research in Africa* 47 (1): 39–63.

• Horton, Mark, et Nina Mudida. n.d. "Subsistence and the Faunal Record." In *Zanzibar and Pemba, The Archaeology of an Indian Ocean Archipelago*. London: British Institute in Eastern Africa.

• Morales Muñiz, Arturo. 2008. « De Los Peces a Las Redes : Las Artes de Pesca Desde Una Perspectiva Arqueoictiológica. » *Arqueobios* 40-63.

• Mudida, Nina, et Mark Horton. 1996. "Subsistence at Shanga: The Faunal Record. *Shanga: The Archaeology of a Muslim Trading Community on the Coast of East Africa*, Mark Horton, 378–393. London: British Institute in Eastern Africa.

• Van Neer, Wim. 2001. "Animal Remains from the Medieval Site of Kizimkazi Dimbani, Zanzibar." *Islam in East Africa: New Sources: Archives, Manuscripts and Written Historical Sources, Oral History, Archaeology: International Colloquium, Rome, 2-4 December 1999*, ed. Biancamaria Scarcia Amoretti, 385–407. Roma : Herder.

• Quintana Morales, Eréndira. 2013. "Reconstructing Swahili Foodways: The Archaeology of Fishing and Fish Consumption in Coastal East Africa, AD 500-1500." PhD dissertation, University of Bristol.

• Quintana Morales, Eréndira M., and Mark Horton. 2014. "Fishing and Fish Consumption in the Swahili Communities of East Africa, 700-1400 CE." Ed. Ricardo Fernandes and John Meadows. *Internet Archaeology* 37. "Human Exploitation of Aquatic Landscapes" Special Issue.

• Smith, J. L. B, Phillip C Heemstra, et Margaret Mary Smith. 1986. *Smiths' Sea Fishes*. Johannesburg, South Africa: Macmillan.

• Willis, Lauren M., Metin I. Eren, et Torben C. Rick. 2008. "Does Butchering Fish Leave Cut Marks?" *Journal of Archaeological Science* 35 (5) (May): 1438–1444.

• Wright, Henry T., Carla Sinopoli, Laura Wojnaroski, Ellen S. Hoffman, Susan L. Scott, Richard W. Redding, et Steven M. Goodman. 1984. "Early Seafarers of the Comoro Islands: The Dembeni Phase of the IXth-Xth Centuries AD." *Azania: Archaeological Research in Africa* 19 (1): 13–59.

Remerciements

J'ai réalisé ce projet de janvier à décembre 2014, grâce au financement d'une bourse d'études post-doctorales de la Fondation Fyssen. Je suis reconnaissante aux membres de mon institution d'accueil, le laboratoire d'archéozoologie et archéobotanique du Muséum National d'Histoire Naturelle à Paris, et particulièrement au Dr Philippe Béarez, pour son soutien et ses précieux conseils au cours de mes recherches. Je remercie la collaboration de Nicole Boivin, directrice du Projet Sealinks, et d'Edward Pollard, qui a fourni les restes de poissons provenant de Kaole Village.

Introduction

In the first century CE document *Periplus Maris Erythraei*, Azania refers to the eastern African coast, a region inhabited by people who engaged in fishing with sewn boats, dugout canoes, and basket traps (Casson 1989, 59–60; Freeman-Grenville 1962, 1). Zooarchaeological research has demonstrated the important role of fishing in the coastal communities of eastern Africa, particularly in the second millennium CE, when there was a rapidly growing urban, Islamic, trading society (Quintana Morales 2013). Previous studies document the importance of fishing as a subsistence activity in the first millennium CE but are limited in sample size and detail of analysis. This paper presents preliminary results of recent analysis of fish remains from seven first millennium CE eastern African coastal sites on the islands of Zanzibar, Pemba, Mafia, and Comoros (**Figure 1**).

The fish assemblages described here include over 10,000 identified specimens that document the exploitation of 41 fish families in the first millennium CE. The main objective was to determine the range and diversity of fish exploited in coastal eastern Africa during the first millennium and to evaluate regional and chronological trends. I considered fish size and species to reconstruct which habitats were exploited and what technology was used. I compared fish sizes, diversity, and taxa across the chronological sequences at the various sites to identify changes in fishing strategies throughout the first millennium. I investigated fish processing and consumption practices through a record of taphonomic traces, such as cutting and burning, and patterns of element distribution.

This research contributes to the study of coastal adaptations by fishing communities involved in local and long distance trade in the first millennium CE, an integral part of the work undertaken by the Sealinks Project, directed by Nicole Boivin at the University of Oxford. The Sealinks Project investigates early exchange networks and the translocation of animals and plants across the Indian Ocean through the application of archaeobotanical, zooarchaeological, palaeoenvironmental, and genetic approaches (e.g., Boivin and Fuller 2009; Fuller and Boivin 2009; Helm et al. 2012; Crowther et al. 2014). The majority of material analysed for this research was systematically recovered from recent excavations conducted by the Sealinks Project, allowing regional and chronological comparisons among these sites.

Methodology

I identified, recorded, and quantified the fish remains from seven first millennium coastal settlements: Ras Mkumbuu (5º11'46″S, 39º39'46″E), Fukuchani (5º49'18″S, 39º17'27″E), Unguja Ukuu (6º18'0″S, 39º29'0″E), Kaole Village (6º27'40.2″S, 38º56'33.8″E), Juani Primary School (7º59'23″S, 39º46'57″E), Gnamawi (11º22'26″S, 43º22'29″E), and Old Sima (12º12'34″S, 44º16'7″E). The use of the osteological comparative collection of Indian Ocean fish available in the archaeozoology laboratory at the Muséum National d'Histoire Naturelle in Paris was a crucial component of the analysis. Three principal references were used to review the diversity of marine fish species recorded for the region: *FAO Species Identification Sheets for Fishery Purposes: Western Indian Ocean* (Fischer and Bianchi 1984), *FishBase* (Froese and Pauly 2012), and *Smith's Sea Fishes* (Smith et al. 1986). Fish taxonomy nomenclature followed the online *Catalog of Fishes* (Eschmeyer 2015).

Fish bones were attributed to the most specific taxonomic category possible by comparing morphological characteristics with specimens in the comparative collection. Taxonomic attributions were made based on the morphological features of each fragment and not through association with other identified specimens in the sample. All skeletal elements were considered for analysis. Minimum Number of Individuals (MNI) was calculated per context, taking into account laterality

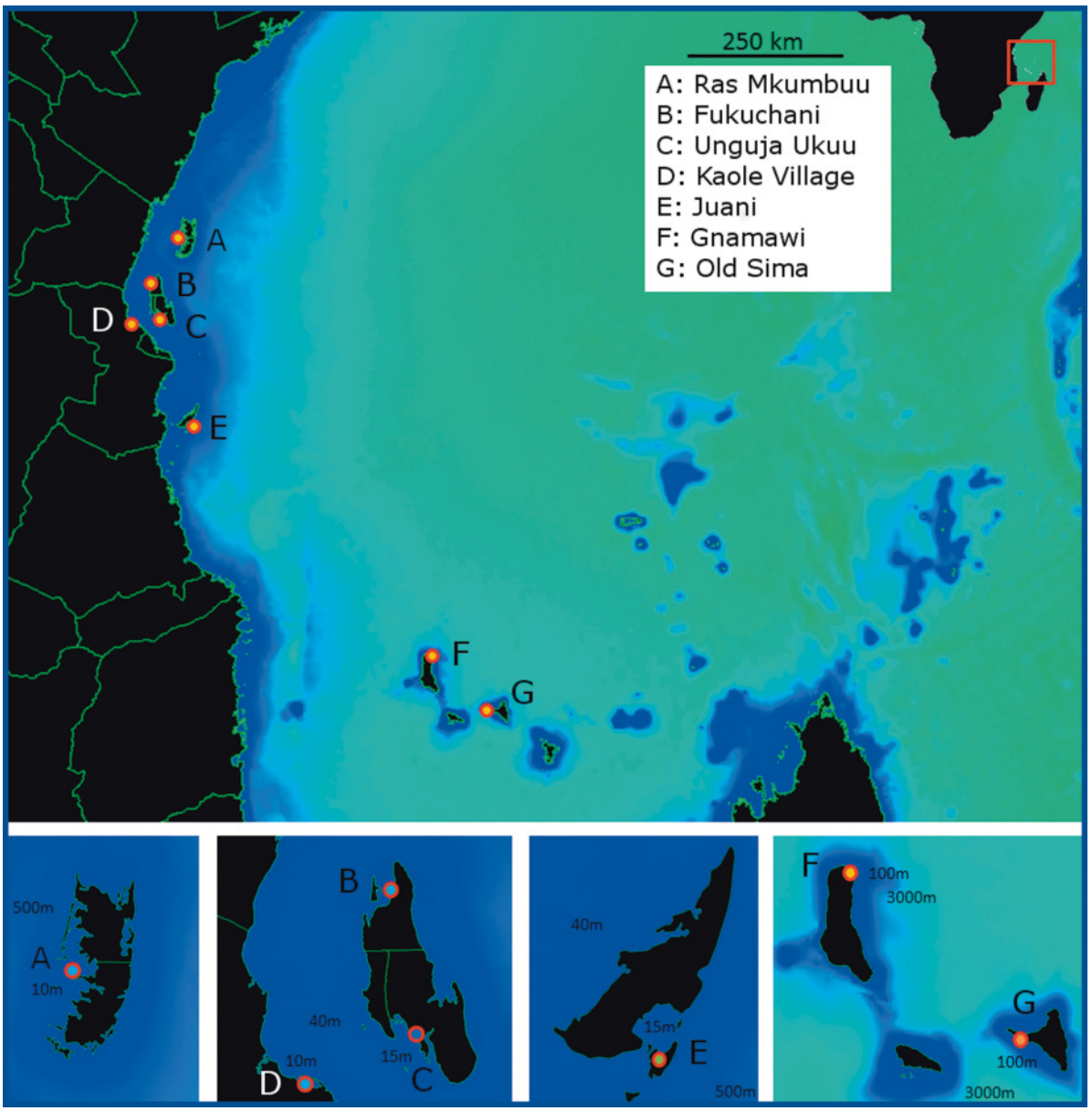


Figure 1 : Map of sites included in this study

and size. Bones were examined for traces of cutting, gnawing, and burning with the aid of a handheld magnifying lens and occasionally a laboratory microscope. For each element attributed to at least family, I estimated the weight and total length of the complete fish by direct comparison with reference specimens of known weight and length, in cases where fish bones were complete enough and there were suitable comparative specimens.

Overview of taxonomic representation

The majority of identified remains represent bony fish species (Teleostei=99%). Although 39 families of bony fish were identified, ten families together represent the majority (88%) of the total number of identified remains: Lethrinidae (emperors), Serranidae (groupers), Scaridae (parrotfishes), Carangidae (jacks), Siganidae (rabbitfish), Acanthuridae (surgeonfish), Lutjanidae (snappers), Mugilidae (mullets), Albulidae

(bonefish), and Haemulidae (grunts). The calculated Minimum Number of Individuals (MNI) serves to compare the relative abundance of each fish family per site, showing variability in the top families. Emperors are most frequently represented (> 20%) at Unguja Ukuu, Fukuchani, and Ras Mkumbuu. At Juani, emperors, groupers, and parrotfish are evenly represented (~15% each). The most abundant family at Gnamawi is the groupers (31%) and at Old Sima the parrotfish (27%), whereas at Kaole Village, jacks (30%) and mullets (27%) form the majority.

A small number of cartilaginous fish (sharks and rays) were recorded at 5 sites: Unguja Ukuu, Ras Mkumbuu, Juani Primary School, Kaole Village, and Old Sima. They represent < 2% of each assemblage, except at Juani Primary School, where these fishes make up 8% of the total MNI.

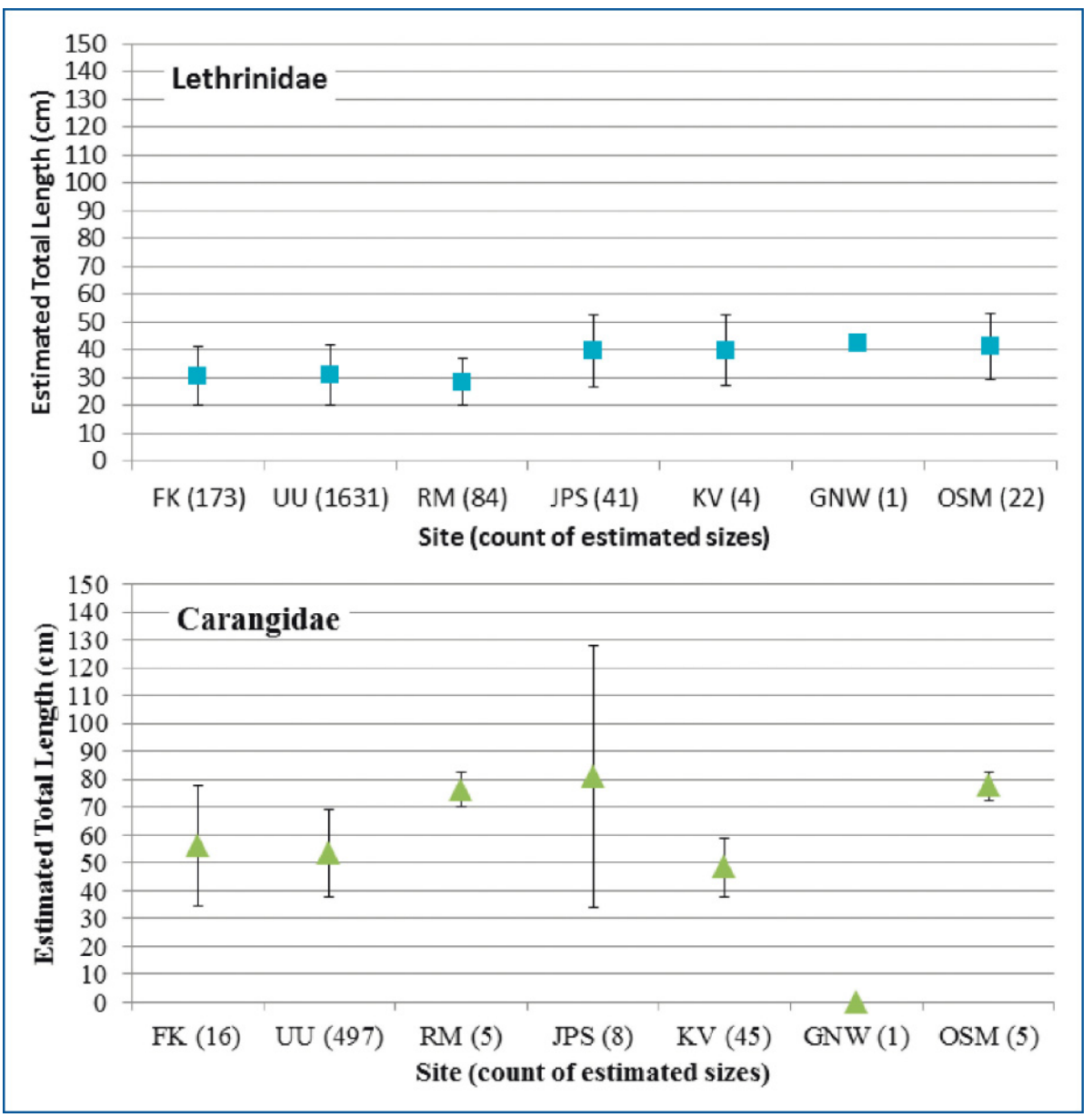


Figure 2 : Mean estimated total length of Lethrinidae and Carangidae (+/- 1 S.D.)

Size estimations

I compared the average estimated total length of the most abundant families, which can be useful to infer fishing strategies and detect whether adult or juvenile fish were captured. Overall, the mean total length is above 30 cm, suggesting that mostly adult individuals of the most common fish families were captured. The range of mean values of total length varies among family categories. Emperors (Lethrinidae) have a more consistent mean total length across sites, whereas the mean and standard deviation values of jacks (Carangidae) are more variable (**Figure 2**). This trend may be associated with the size variability of species in each family. Currently there are 27 species of emperors recorded for the Western Indian Ocean region with a maximum total length that ranges between 20 and 100 cm (Froese and Pauly 2015). Among the 69 species of jacks recorded for this region, the maximum total length ranges from 20 to 250 cm, their length at maturity ranging from 13 to 50 cm (Froese and Pauly 2015). Higher mean total length and standard deviation values for jacks reflect the larger diversity in sizes attainable by species in this family. Fishing strategies can also determine the size ranges of captured fish (Morales Muñiz 2008). Variability in mean and standard deviations of jack total length suggest that the strategies used to capture jacks allowed for a larger sampling of sizes, either from the use of a variety of gears or a gear that captures a wide size range. In contrast, the smaller and more regular size of emperor fish across sites could result from the use of a fishing strategy in the region that targeted small to medium-sized specimens.

Skeletal element distribution

The majority of all identified fish bones were postcranial (70%), mostly vertebrae (**Figure 3**). The top elements from the cranial region include parts of the lower and upper mandible: premaxilla, dentary, maxilla, and articular. The ratio of cranial to postcranial elements is not shared among the various sites. For example, a greater majority of elements (85%) from Kaole Village are postcranial. A much smaller proportion (38%) of postcranial elements is represented at Old Sima. These patterns may relate to the families that are most abundant at each site. Mullets, which are especially abundant at Kaole Village, are most commonly identified by vertebrae. On the other hand, parrotfish, the most abundant family at Old Sima, has more robust and diagnostic cranial elements. Significant proportions of both cranial and postcranial elements in all the samples indicate that fish were generally prepared and eaten whole.

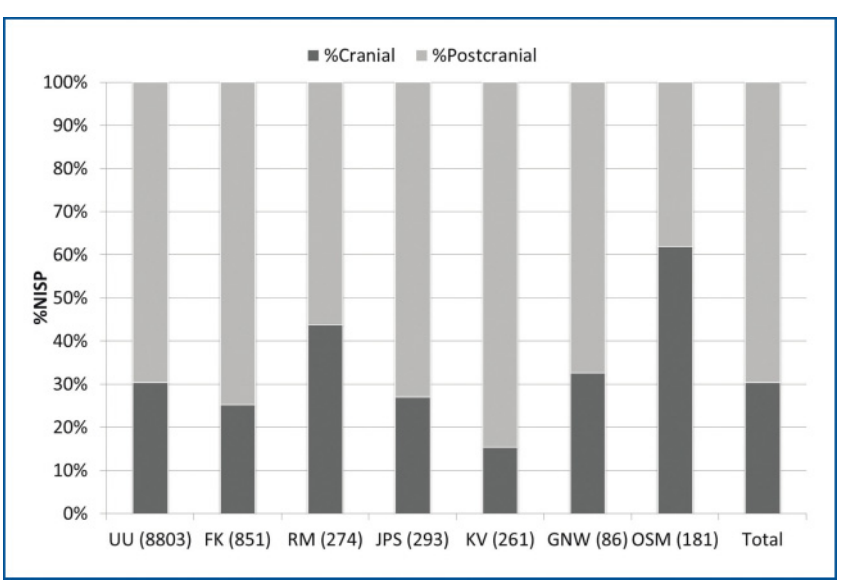


Figure 3 Ratio of cranial to postcranial elements (Sample sizes are in parentheses.)

Taphonomic traces

There was very little evidence of surface modifications on the fish bones (**Figure 4**). The total number of bones with visible cut marks was minimal (0.25%). Cut marks occurred mostly on vertebrae, which are the most numerous elements, although not in any identifiable pattern. Evidence of cut marks can be limited by minimal use of butchery strategies and obscured by post-depositional processes (Willis et al. 2008). Gnaw marks were extremely rare (.05%). A small percentage of bones (.65%), mostly vertebrae, were distorted, which could be related to digestion or post-depositional processes. Discoloration caused by burning was more common (5%) and especially evident in particular contexts at Unguja Ukuu, Kaole Village, and Old Sima.

Chronological comparison

Currently, only Unguja Ukuu and Juani Primary School have more detailed chronologies that can be compared by phases to reveal diachronic trends. A comparison of the relative abundance of the top seven families reveals that the proportion of emperors (Lethrinidae) increases over time at both sites (**Figures 5 and 6**). Between the earlier (c. 200-500 CE) and later (c. 500-1500 CE) periods at Juani, the abundance of emperors increases from 16% to 29% of the total sample. At Unguja Ukuu, emperor fish are already dominant in the earlier period (c. 650-800 CE) representing 17% of the total sample, and their abundance increases slightly to 22% in the next period (c. 800-1050 CE).

Discussion

First millennium coastal adaptations along the eastern African coast included diverse fishing strategies in near-shore habitats. The majority of the identified taxa can be found near coral and rocky habitats, indicating the importance of nearby coral reefs. The assemblages also included fish from estuary environments, such as mullets (Mugilidae) and catfish (Ariidae). Differences in the composition of exploited fish among assemblages demonstrate the influence of local environments. Reef-associated fish, such as

Figure 4 : Examples of taphonomic traces A) Rodent gnaw marks on a Carangidae premaxilla, B) Cut mark on an unidentified spine, C) Burned Mugilidae vertebra, D) Distorted centrum of Mugilidae vertebra, E) Cut mark on Lutjanidae vertebra (1 cm scale)

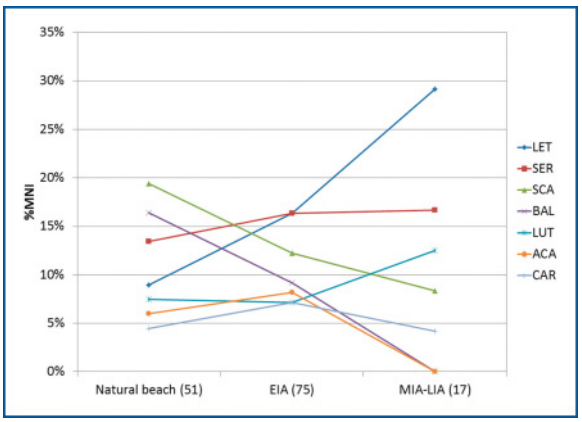


Figure 5 : Chronological distribution of the top seven fish families at Juani (Sample sizes are in parentheses.)

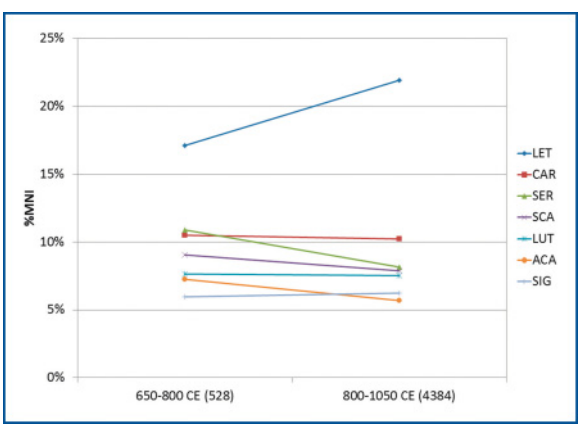


Figure 6 : Chronological distribution of the top seven fish families at Unguja Ukuu (Sample sizes are in parentheses.)

parrotfish (Scaridae) and groupers (Serranidae) are more abundant at the island settlements with easy access to fringing reefs, such as Old Sima. Mullets are especially common at the mainland settlement of Kaole Village where conditions are more favourable for estuary-associated fish. These results suggest that early fishers were well adapted to exploit locally available marine resources, a pattern that is also visible in later periods along the coast (Quintana Morales and Horton 2014).

Although fish size estimates have been previously reported for a few coastal sites (Wright et al. 1984, Van Neer 2001, Horton and Mudida n.d.), this research is the first to systematically compare mean estimated sizes across the region, demonstrating size variability in the principally captured fish, except emperors. The average total length of emperors (Lethrinidae), the most abundant family overall, was consistently 30 to 40 cm across sites, indicating that they were more likely captured by nets or traps than hand lines. In contrast, the variable lengths of jacks (Carangidae) reflect the use of different strategies used to capture specimens of different sizes. Larger jacks can be caught with fishing lines while nets and traps serve to exploit smaller specimens. Herbivorous fish, such as parrotfish, surgeonfish (Acanthuridae), and rabbitfish (Siganidae) can be captured in traps and nets when these are small to medium-sized specimens while larger specimens can be speared. The range in sizes and high diversity of taxa indicate that early fishers in this area were skilled in a variety of techniques that involved the construction, use and maintenance of various fishing gears, such as spears, hand lines, traps, and nets.

Significantly, the Unguja Ukuu and Juani Primary School assemblages have some of the earliest examples of shark vertebrae in the Swahili coast dating to before the 9th century, 13 and 18 NISP, respectively. Farther north along the coast at Shanga, Mudida and Horton (1996) report three grey shark (*Carcharhinus* spp.) specimens in phase 4, towards the end of the 10th century, followed by a significant increase during the second millennium. These data suggest that early first millennium fishers occasionally caught these types of large, fast-swimming fish, although these fish were not significantly exploited until later periods. Diachronic comparisons at a regional scale point to a significant increase in outer-reef/offshore fishing in the second millennium, which is linked to settlements with evidence of more significant socio-economic complexity (Quintana Morales 2013; Quintana Morales and Horton 2014) and a developed sense of maritime identity (Fleisher et al. 2015).

Another significant change in fish exploitation detected at Unguja Ukuu and Juani Primary School was an increasing relative abundance of emperor fish (Lethrinidae). At Juani, the percentage of emperors almost doubles between the earlier (c. 200-500 CE) and later (c. 500-1500 CE) periods. At Unguja Ukuu, emperor fish are already dominant by around 650-800 CE, and their relative abundance increases slightly

towards the end of the first millennium. The dominance of emperor fish is observed in several analysed fish samples from second millennium settlements along the coast (Mudida and Horton 1996; Fleisher 2003; Quintana Morales 2013; Horton and Mudida n.d.). At Shanga, fish data spanning the long term occupation of the town shows an increasing trend in the abundance of emperors between 800 and 1400 CE, which is interpreted as in increase in net fishing (Horton and Mudida n.d.). New data from first millennium coastal settlements signals an increasing abundance of emperor fish in the late first millennium at several sites, but the exploitation of emperor fish does not appear to be as widespread as in the second millennium.

Conclusion

This research demonstrates that first millennium CE fishers used a varied toolkit to exploit a diverse composition of fish taxa and sizes that reflected the rich resources available along the coast. Although sharks and tunas (Scombridae) are recorded in very small numbers, the vast majority of fish captured in these first millennium assemblages were accessible near shore, around nearby reefs and estuaries. The exploitation of emperor fish (Lethrinidae) is not as prevalent as in the second millennium CE, but available diachronic data document an increase in the relative abundance of these fish throughout the first millennium. Captured fish were generally brought back whole to the site, where they were likely cooked, eaten, and discarded as complete skeletons. Some bones show evidence of cutting and burning that may be linked to butchery and cooking practices. Overall, first millennium coastal dwellers possessed the necessary skills and tools to sustain themselves from the exploitation of aquatic resources and establish enduring coastal settlements where they could interact with traders and travellers from across the Indian Ocean.

Acknowledgements

This project was carried out from January to December 2014, with funding from a Fondation Fyssen Post-doctoral Study Grant. I am grateful to the members of my host institution, the laboratoire d'archéozoologie et archéobotanique at the Muséum National d'Histoire Naturelle in Paris, and in particular to Dr Philippe Béarez, who provided valuable guidance and support during the course of my research. I thank Nicole Boivin, director of the Sealinks Project, and Edward Pollard, who provided the material from Kaole Village, for their continued collaboration and support.

BIBLIOTHÈQUE

Nous remercions vivement les généreux donateurs avec lesquels nous échangeons nos Annales :

Académie des Sciences	« Les mathématiques en mouvement » N° 33 Printemps-Eté 2014 « La cristallographie décrypte la matière » N° 34 Automne-Hiver 2014
Académie Royale de Médecine de Belgique	Vol. 167 / Annuaire 2012, 2e semestre Vol. 168 / Annuaire 2013, 1er et 2e semestre Vol. 169 / Annuaire 2014, 1er et 2e semestre Vol. 170 / Annuaire 2015 « Tableau de l'Académie et Programme des concours »
John Benjamins Publishing Company	New Titles- Fall 2014, New Titles- Spring 2014, New Titles- Spring 2015
Max Planck Research	The Science Magazine N° 1.2014, N° 2.2014, N° 3.2014, N° 4.2014
Tchérémissinoff Yaramila	« La sépulture collective mégalithique de Cabrials (Béziers, Hérault). Une petite allée sépulcrale enterrée du début du Néolithique final »
Tel Aviv University Review	« Cancer War Room », 2015 Issue
Universidad de Granada	« Cuadernos de Prehistoria y Arqueologia » N° 22. 2012, N° 23. 2013, N° 24. 2014

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.