

AIX-MARSEILLE UNIVERSITE

École Doctorale : Cognition, Langage, Éducation (ED 356)

UFR de Psychologie

Laboratoire de Psychologie Cognitive, Marseille

Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur

Discipline : Psychologie

Anais MAUGARD

Appariement relationnel et raisonnement par analogie
chez le babouin (*Papio papio*) :
continuités et discontinuités
avec les processus d'analogie chez l'humain

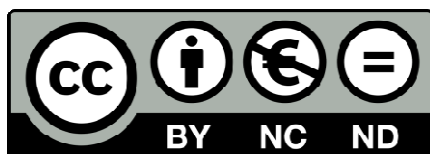
Soutenue le 06/06/2014 devant le jury :

Bertrand DEPUTTE, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Maisons-Alfort
(Rapporteur)

Isabelle BLANCHETTE, Université du Québec-Département de Psychologie,
Trois-Rivières (Rapporteur)

François ROMAN, Laboratoire Neurobiologie des Processus Mnésiques,
Marseille (Examineur)

Joël FAGOT, Laboratoire de Psychologie Cognitive, Marseille (Directeur de
thèse)



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 3.0 France](#).

RÉSUMÉ

Le raisonnement par analogie est un aspect fondamental de la cognition humaine souvent considéré comme propre à notre espèce. Des travaux récents utilisant des tâches d'appariement relationnel suggèrent que des chimpanzés, des babouins et des capucins sont également capables de comparer des relations exprimées par des paires d'objets. Cependant, des doutes persistent quant aux stratégies cognitives qu'ils emploient pour résoudre ces tâches, et notamment l'implication du raisonnement par analogie. Cette thèse a pour objectif (1) de déterminer ces stratégies chez le babouin, (2) d'appréhender les facteurs permettant leur émergence et (3) plus généralement de caractériser les continuités et discontinuités entre l'homme et les primates non humains dans leur capacité à raisonner par analogie.

Nous avons conduit trois études chez le babouin de Guinée (*Papio papio*) pour aborder ces questions. La première montre que le traitement relationnel chez le babouin implique, comme chez l'homme, à la fois une prise en compte des propriétés des objets et de leurs relations. De plus, cette étude met en évidence l'importance du nombre d'exemplaires illustrant chaque relation dans la prise en compte de ces deux types d'information. La seconde étude montre que les babouins utilisent le raisonnement par analogie pour résoudre une tâche d'appariement relationnel puisqu'ils traitent trois niveaux d'informations ; à savoir (1) les objets, (2) les relations entre objets et (3) des relations entre ces relations. La troisième étude montre leur capacité à traiter des relations multidimensionnelles dans une version plus complexe de la tâche d'appariement relationnel. Les résultats de ces études suggèrent l'existence d'une continuité dans les capacités d'analogie entre l'homme et les primates non humains, au moins concernant les relations perceptives. Dans une perspective évolutive, nous discutons les discontinuités qui s'observent entre les capacités d'analogies chez l'homme et le singe. Enfin, nous tentons de déterminer les éventuels facteurs responsables de ces disparités au sein de l'ordre des primates.

Mots clés : raisonnement par analogie, babouin, cognition, psychologie comparée

ABSTRACT

Analogical reasoning is a cornerstone aspect of human cognition, often considered to be human specific. Recent experiments using relational matching-to-sample (RMTS) tasks suggest that chimpanzees, baboons and capuchin monkeys can understand and compare the relations expressed between and within pairs of objects. However, the exact strategies used by these species to solve analogy problem remain unclear at this point. We conducted three studies exploring different aspects of analogical reasoning in the Guinea baboons (*Papio papio*). The first study showed that (1), as in human, relational processing in baboons involves the processing of both perceptive and relational information, and that (2) the relative contribution of these two types of processing depends on the number of items illustrating each relation during training. The second study showed that the cognitive strategy developed by baboons in a RMTS task involves analogical reasoning. The third study emphasized the ability of baboons to process multidimensional relations in a more complex version of the RMTS task. Altogether, these findings from suggest that (1) baboons are able to use analogical reasoning, to solve at least tasks involving perceptive relations; (2) relational processing and further analogical reasoning skills depend on their previous experience with the different relations. We shall discuss the potential implications of those findings, and the continuity and discontinuity of analogical reasoning skills found in human and nonhuman primates.

Keywords: analogical reasoning, baboon, cognition, comparative psychology

REMERCIEMENTS

Merci Joël pour votre confiance et votre détermination. On dit souvent que la relation doctorant/directeur de thèse n'est pas toujours simple ; je garde pour ma part un souvenir très positif de cette expérience. Je vous remercie pour nos échanges, nombreux, simples et enrichissants. Et surtout, d'un point de vue théorique, je vous remercie très sincèrement pour ce que j'ai appris pendant ces trois années passées à vos côtés. Cette connaissance que j'ai acquise à Rousset sur le fonctionnement des apprentissages est précieuse et me servira incontestablement quels que soient mes projets futurs.

Merci également à l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de prendre le temps de lire ce manuscrit et discuter de mon travail.

Aux membres de l'équipe "Cognition Comparée" du Laboratoire de Psychologie Cognitive, Marie M., Arnaud, Florence, Laure et Julie, merci pour votre écoute, vos judicieuses remarques lors de nos réunions d'équipe, et plus largement pour nos échanges passionnants sur la cognition humaine et animale.

Aux personnes travaillant à la Station de Primatologie de Rousset, Jean-Christophe, Jean-Noël, Valérie, Yves, Jo, Sébastien, Marylaine, Fidji, Brigitte, Corinne, Richard, Laura et Slaveia, merci pour votre présence chaleureuse pendant mes trois ans à la station, merci notamment pour toutes ces pauses cigarettes partagées qui m'ont procuré la détente nécessaire au travail. Merci pour ces repas chaleureux passés tous ensemble au soleil, sur la terrasse blanche du vieux bâtiment, dont je garderai longtemps le souvenir.

Je remercie particulièrement Richard pour ses conseils de maître à la guitare et pour nos moments musicaux, dans mon petit appartement de Trets à l'époque, et aujourd'hui à Rousset. Que la magie de ces instants nous protège de la monotonie et du désenchantement.

Aux copains, Cath, Elodie, Greg, Marie, Pau et Romain, merci à chacun, d'être ce qu'il est, simplement, et d'accepter l'autre pour ce qu'il est, aussi simplement. J'aime nos fêtes et j'aime vos tronches. Et je ne suis pas prête de m'en lasser... Un clin d'œil à ma partenaire grattifère, Cath, en souvenir de nos exultations marinières. La musique nous reliera où que l'on parte.

Enfin, un grand merci à ma famille, et plus particulièrement à mes parents, à ma mère Marie-Pierre pour son soutien solide et son attention inébranlable, à mon père Stephan pour son sens du partage et son goût du rêve, à mes frères et sœurs, Isandre, Paul et Maud et aussi à Eric, Corinne, Moutie, Manou et Tatie. Nous défions ensemble les lois de la physique en étant chacun si loin et si proche à la fois.

<u>Avant-propos</u>	1
----------------------------------	----------

PARTIE I : CATEGORISATION ET RAISONNEMENT PAR ANALOGIE CHEZ L'HOMME	4
--	----------

Chapitre I : Catégorisation chez l'homme	5
---	----------

1. Définitions	6
-----------------------------	----------

2. Théories sur la catégorisation	8
--	----------

3. Organisation des catégories	11
---	-----------

3.1. Organisation taxonomique	11
-------------------------------------	-----------

3.2. Organisation thématique	12
------------------------------------	-----------

4. Développement de la catégorisation	14
--	-----------

4.1. Rôle de l'attention dans le développement de la catégorisation	16
---	-----------

4.2. Rôle du langage dans le développement de la catégorisation.....	16
--	-----------

Chapitre II : Raisonnement par analogie chez l'homme	18
---	-----------

1. Définitions	19
-----------------------------	-----------

2. Tâches d'analogie utilisées en laboratoire	22
--	-----------

3. Théories sur le raisonnement par analogie	25
---	-----------

4. Ontogénèse des analogies	31
--	-----------

4.1. Rôle de la mémoire de travail	33
--	-----------

4.2. Rôle de l'inhibition	34
---------------------------------	-----------

4.3. Rôle des connaissances	35
-----------------------------------	-----------

4.4. Rôle du langage.....	36
---------------------------	-----------

Résumé - PARTIE I	39
--------------------------------	-----------

PARTIE II : CATEGORISATION ET RAISONNEMENT PAR ANALOGIE CHEZ LES PRIMATES NON HUMAINS	40
--	-----------

Chapitre I : Catégorisation chez les primates non humains	41
--	-----------

1. Introduction	42
------------------------------	-----------

2. Procédures expérimentales	44
3. Catégorisation en classes ouvertes	47
4. Catégorisation conceptuelle	50
4.1. Concepts fonctionnels	50
4.2. Concepts relationnels	52
Chapitre II : Raisonnement par analogie chez les primates non humains	60
1. Raisonnement par analogie chez les grands singes.....	61
2. Raisonnement par analogie chez les singes non anthropoïdes	67
Résumé - PARTIE II.....	73
<u>Problématique.....</u>	74
PARTIE III : VOLET EXPERIMENTAL	78
Chapitre I : Matériel expérimental.....	79
1. Sujets.....	80
2. Dispositif expérimental.....	83
Chapitre II : Articles.....	85
Article I : Processus impliqués dans le traitement des relations chez le babouin et rôle de l'expérience.....	86
Article II : Stratégie de résolution d'une tâche d'appariement relationnel chez le babouin : Implication de la mémoire de travail et raisonnement par analogie.....	104
Article III : Complexité des analogies chez le babouin	117
PARTIE IV : DISCUSSION.....	130
1. Continuités entre primates humains et non humains.....	133
1. 1. Continuités entre traitement perceptif et traitement conceptuel ?.....	133
1. 2. Flexibilité des processus d'abstraction	137
1. 3. Rôle de l'expérience et de l'apprentissage par essai-erreur	138

2. Variabilité interindividuelle et rôle des fonctions exécutives	141
3. Discontinuités entre primates humains et non humains	147
3. 1. Capacités de généralisation.....	147
3. 2. Raisonnement par analogie sur des relations fonctionnelles et abstraites	148
3. 3. Une attention différente aux objets visuels.....	149
3. 4. Différents types de généralisation.....	150
3. 5. Rôle du langage chez l’homme.....	151
4. Conclusion et perspectives	153
REFERENCES	155
ANNEXES	174
Annexe 1 : Rôle du contrôle exécutif dans le raisonnement par analogie chez l'enfant et le primate non humain (Minier et al., sous presse)	175
Annexe 2 : Patterns of hemispheric specialization for a communicative gesture in different primate species (Meunier et al., 2013)	193

Avant-propos

Les travaux présentés dans le cadre de cette thèse portent sur les capacités de raisonnement par analogie d'une espèce de primate non humain : le babouin.

La connaissance de notre environnement ainsi que notre aptitude à pouvoir nous le représenter conditionne directement notre capacité à l'anticiper et à y réagir de façon adaptée face à des situations nouvelles. Au cours du développement, les multiples interactions de l'enfant avec son environnement permettent la formation de représentations internes du monde qui s'organisent en classes hiérarchisées. La catégorisation permet d'effectuer ce classement des connaissances par un processus d'association entre objets ou concepts selon un principe de similarité. Ainsi, par exemple, notre système cognitif a tendance à classer tous les chiens dans une même catégorie « chien », puisque tous ces objets partagent plus de similarités entre eux qu'avec d'autres éléments de l'environnement. Le fait de reconnaître un animal comme appartenant à la catégorie « chien » nous permet alors d'anticiper son comportement et d'adapter le nôtre au regard des connaissances que l'on possède sur cette catégorie d'animaux. Au cours du développement, l'enfant devient progressivement capable de détecter des similarités de l'environnement exprimées par des dimensions de plus en plus complexes, comme par exemple des caractéristiques fonctionnelles ou encore des relations entre objets. La détection des similarités au niveau des relations entre les objets qui nous entourent est notamment possible grâce au raisonnement par analogie. Cette capacité cognitive permet par exemple de rapprocher la relation qui existe entre un chat et une souris de celle qui existe entre un oiseau et un ver de terre, et de former ainsi des « catégories relationnelles », comme par exemple la catégorie « prédation ». Tout comme la catégorisation, mais à un niveau plus abstrait, le raisonnement par analogie permet d'anticiper les probabilités d'apparition de certains événements face à une situation nouvelle et d'y répondre de façon adaptée, en considérant les relations entre les objets.

Dans la première partie de cette thèse nous nous pencherons sur le modèle humain et nous intéresserons d'abord aux processus de catégorisation. Nous aborderons ensuite le raisonnement par analogie. A travers cette première partie, nous verrons que ces deux activités cognitives (i.e., catégorisation et raisonnement par analogie) sont intimement liées et semblent mettre en jeu des processus communs appliqués à des éléments de complexité croissante au cours du développement (e.g., de l'objet vers les relations entre objets).

Si ces activités cognitives de complexité différentes sont décrites chez l'homme, qu'en est-il de leur origine évolutive ? La capacité à raisonner par analogie est souvent décrite comme le pilier central de la cognition humaine. Elle est considérée comme le propre de l'homme. Cependant, au regard de la continuité phylogénique des espèces, ce postulat d'une différence de nature entre les capacités de traitement des similarités chez l'homme et l'animal peut être remis en question. En effet, au sein du règne animal, l'évolution des espèces se traduit par un accroissement de la taille du cerveau par rapport au reste du corps, accompagnée d'une complexification des représentations de l'environnement et d'une amélioration des capacités d'adaptation. Ces changements cognitifs, et notamment la capacité d'une espèce à s'adapter à son milieu, pourraient être liés à une amélioration des capacités de détection et de jugement des similarités de l'environnement. Cette thèse s'inscrit donc dans un questionnement général sur l'évolution des processus cognitifs impliqués dans la perception et le jugement des similarités ayant favorisé ces capacités d'adaptation. Existe-t-il une continuité évolutive, ou bien une différence qualitative entre l'homme et les autres animaux, pour la perception des similarités de l'environnement ?

Les primates non humains constituent des modèles privilégiés pour répondre à ces questions, puisqu'ils regroupent les espèces les plus proches de l'homme d'un point de vue phylogénétique. L'objet de la seconde partie de cette thèse est donc de passer en revue les connaissances actuelles sur les capacités de catégorisation et le raisonnement par analogie des

différentes espèces des primates non humains. Comme nous le verrons, malgré leur performance dans ce type de tâches, l'existence de capacités d'analogies chez les primates non humains reste très controversée. Dans ce contexte, cette thèse a pour but (1) de caractériser les stratégies cognitives employées par les primates non humains, et en particulier le babouin, pour résoudre des tâches mettant en jeu des jugements de similarité à un niveau relationnel, et (2) d'appréhender les facteurs permettant l'émergence de ces stratégies.

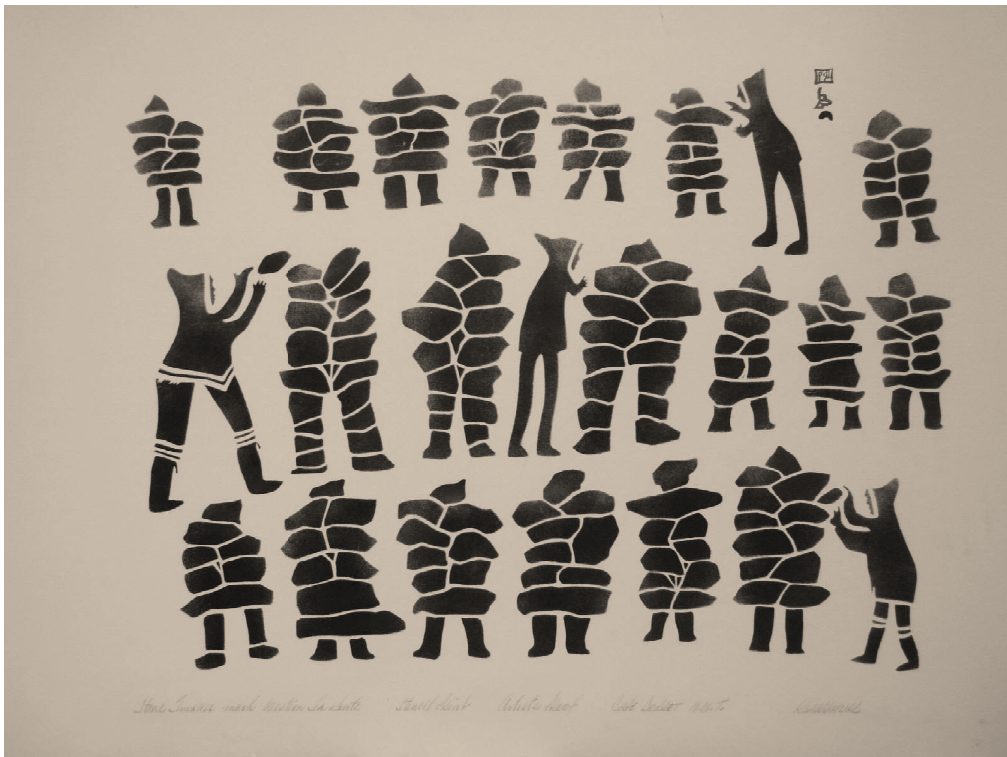
Le volet expérimental de cette thèse sera détaillé dans une troisième partie qui débutera par la description du dispositif général des procédures employées dans nos expériences et se poursuivra par la présentation de trois articles portant respectivement sur (1) l'effet de l'expérience sur les stratégies de traitement des relations chez le babouin, (2) l'implication de la mémoire de travail dans les stratégies de résolution d'analogies chez le babouin, (3) la complexité possible des analogies résolues par le babouin avec un apprentissage par essai-erreur.

Dans une dernière partie, nous discuterons les différents résultats issus de ces études dans une perspective comparative, et tenterons de proposer une explication évolutive à leur émergence chez le primate non humain et l'homme.

PARTIE I

CATEGORISATION ET RAISONNEMENT PAR ANALOGIE

CHEZ L'HOMME



©Kiakshuk

Chapitre I

Catégorisation chez l'homme

1. DEFINITIONS

La catégorisation peut être définie comme un processus mental qui consiste à regrouper des objets différents et conduit à la construction et à l'organisation de représentations internes du monde permettant de le structurer et de le rendre prévisible (Bruner, Goodnow, & Austin, 1956). Elle aboutit à un classement des informations perçues de l'environnement physique et social en catégories, basé sur les similarités des objets qui le composent. La construction de telles catégories réduit ainsi le coût cognitif lié au traitement des objets qui nous entourent, puisque l'on peut attribuer à des objets nouveaux certaines caractéristiques propres à la catégorie dont ils font partie (Medin, 1989 ; Sailor & Shoben, 1996). Par exemple, lorsqu'un enfant rencontre un chien pour la première fois, il peut lui attribuer les connaissances qu'il possède déjà sur les chiens et ajuster son comportement au regard de ces connaissances.

Chaque catégorie est constituée par un ensemble d'éléments différents ayant une ou plusieurs caractéristiques communes et étant considérés comme similaires d'un certain point de vue. La catégorisation étant un processus actif tout au long de la vie, le contenu des catégories évolue au fur et à mesure des interactions du sujet avec son environnement (Mervis & Rosch, 1981). Ainsi, au cours du développement, le monde interne se structure progressivement en plusieurs types de catégories basées sur différents types de similitudes, exprimées par des dimensions variées. Les catégories perceptives regroupent par exemple des objets qui présentent des similarités physiques (Bonthoux, Berger, & Blaye, 2004). Les catégories thématiques sont, quant à elles, composées d'objets associés à un contexte ayant de fortes probabilités de cooccurrence (catégories contextuelles) ou d'objets partageant une fonction similaire (catégories fonctionnelles ; Bonthoux et al., 2004).

La catégorisation intervient spontanément au quotidien lorsque nous rencontrons des objets naturels ou manufacturés et que nous les affectons à telle ou telle catégorie ; certains

auteurs parlent alors de catégories naturelles (Mervis & Rosch, 1981 ; Rosch, 1973) pour les objets naturels (e.g., arbres, mammifères, oiseaux). La catégorisation peut également intervenir dans un contexte expérimental. Plusieurs paradigmes expérimentaux sont utilisés pour étudier la catégorisation chez l'homme (Bonthoux et al., 2004), et la majorité d'entre eux met en jeu l'apprentissage de catégories artificielles qui sont structurées de manière arbitraire sur la base d'un nombre fini de stimuli (formes simplifiées, visages simplifiés, insectes artificiels, etc. ; Medin, Wattenmaker, & Hampson, 1987 ; Rosch, Simpson, & Miller, 1976).

2. THEORIES SUR LA CATEGORISATION

De manière générale, la catégorisation est décrite comme une activité mentale impliquant un jugement de ressemblance entre un objet *cible* et des représentations internes (Figure 1 ; Machery, 2004). Le processus commencerait par la perception d'un objet *cible* par le système cognitif sous forme d'informations sensorielles. A ce stade, l'intervention de mécanismes de sélection de l'attention permettrait de sélectionner les propriétés pertinentes de la cible qui seraient alors représentées en mémoire de travail et comparées à des représentations internes. Cette comparaison mettrait en jeu des jugements de similarité et aboutirait au stockage de l'objet *cible* en mémoire à long terme et à son association avec une ou plusieurs catégories.

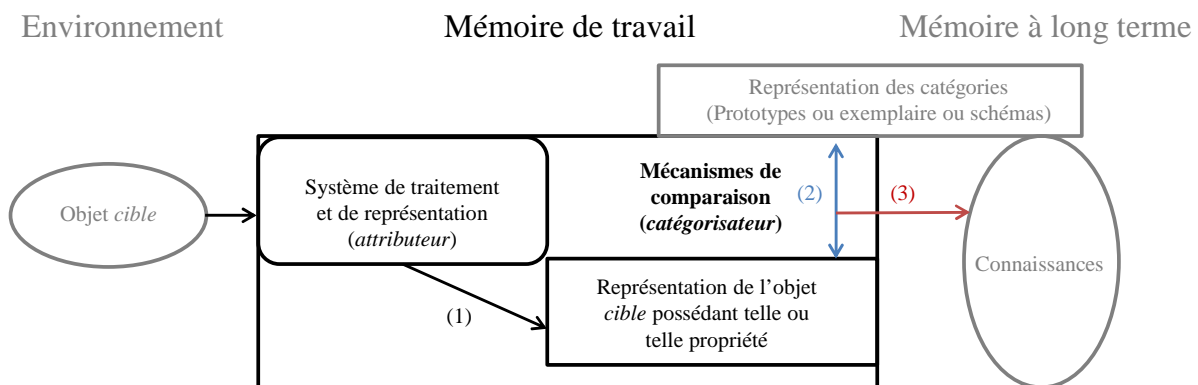


Figure 1. Schéma fonctionnel de la catégorisation adapté de Machery (2004) selon la terminologie de Ripoll (1992) utilisée dans le raisonnement par analogie. On peut décrire trois étapes au processus de catégorisation : (1) perception et attribution de propriétés à l'objet cible, (2) comparaison et appariement de l'objet cible à une ou plusieurs catégories connues, (3) stockage de ces associations en mémoire à long terme.

Par ailleurs, plusieurs théories ont été proposées quant à la nature des représentations internes et des processus de comparaison impliqués dans la catégorisation. Selon l'approche classique, chaque catégorie est représentée par une liste des propriétés nécessaires et suffisantes pour la définir (Bruner et al., 1956 ; Hull, 1920). Par exemple, la catégorie des

triangles correspond à des figures géométriques composées de trois côtés comprenant des angles internes dont la somme est égale à 180 degrés. Pour classer un item dans cette catégorie, il suffit de vérifier s'il comporte ces propriétés. D'après la théorie classique, les catégories sont donc clairement délimitées par ces propriétés et tous les items qu'elles regroupent sont équivalents du point de vue de leur représentativité de la catégorie.

Cependant, par l'étude des catégories naturelles, Rosch développa une autre théorie appelée la *théorie prototypique* (Rosch, 1973, 1975 ; Rosch & Mervis, 1975). Selon cette théorie, les catégories possèdent une organisation interne et un gradient de typicalité centré sur la représentativité de leurs membres. Les processus de catégorisation consisteraient alors à comparer les objets perçus aux prototypes qui correspondent à une abstraction de la tendance centrale de ces catégories.

A la suite de travaux montrant que la typicalité d'une catégorie pouvait varier en fonction du point de vue du sujet et du contexte de catégorisation (Barr & Caplan, 1987 ; Barsalou, 1985 ; Barsalou & Sewell, 1984 ; Medin & Smith, 1981), cette théorie fût complétée par la *théorie des exemplaires* formulée par Medin et Schaffer (1978). D'après ces auteurs, les processus de catégorisation impliqueraient des comparaisons de l'objet *cible*, avec des exemplaires mémorisés plutôt qu'avec des prototypes (Elliott & Anderson, 1995 ; Medin & Schaffer, 1978) ; chaque exemplaire mémorisé ayant une probabilité d'activation différente selon le contexte et les desseins du sujet. En combinant la *théorie des prototypes* avec celle *des exemplaires*, d'autres théories, comme la *théorie des schémas* (Cohen & Murphy, 1984), proposèrent que la catégorisation mette en jeu, selon le contexte, des processus de comparaison entre deux types d'entités, les exemplaires et/ou les prototypes.

Par ailleurs, d'autres théories, comme la *théorie de l'explication* (Medin & Ortony, 1989) proposent que le sujet développe au fil de ses interactions avec l'environnement ses

propres « théories sur le monde ». Ces théories personnelles guideraient nos activités de catégorisation en pondérant nos jugements de similarité selon le contexte. La *théorie de l'explication* rend compte, par exemple, du fait que les expressions « cheveux blancs », « cheveux gris » soient jugées plus similaires que « cheveux gris » et « cheveux noirs », alors que les expressions « nuages gris » et « nuages noirs » sont jugées plus similaires que « nuages blancs » et « nuages gris » (Medin & Shoben, 1988), puisque l'une fait référence à une théorie relative à l'âge et l'autre au temps.

En résumé, la catégorisation implique des mécanismes perceptifs et cognitifs permettant de comparer puis d'associer un objet *cible* avec des représentations de catégories d'objets connus. Cette activité dépend fortement de l'expérience du sujet (Homa, 1984 ; Nosofsky, 1988), tant au niveau du contenu des catégories que des jugements de similarité largement influencés par le contexte et les théories personnelles du sujet. De manière générale, les processus de catégorisation correspondent à des jugements de similarités qui aboutissent à l'enrichissement des catégories en mémoire à long terme et participent de manière dynamique à l'élaboration de notre représentation interne du monde.

3. ORGANISATION DES CATEGORIES

Nous avons vu que nos connaissances du monde sont organisées en catégories d'objets. D'après des observations expérimentales, certains auteurs ont proposé que ces catégories soient reliées entre elles selon la nature des objets qu'elles regroupent et des dimensions pertinentes à partir desquelles elles sont construites.

3.1. Organisation taxonomique

Selon Rosch et collaborateurs (Rosch, Mervis, Gray, Johnson, & Boyes-Braem, 1976), les catégories sont emboîtées de manière hiérarchique, les unes dans les autres selon un principe d'inclusion ; des catégories concrètes étant incluses dans d'autres catégories de plus haut niveau (e.g., la classification du vivant : espèce *chêne rouge*, famille *fagacées*, ordre *fagales*, classe *dicotylédones*, règne *végétaux*). Rosch définit trois niveaux de catégorisation dans cette organisation : le *niveau subordonné*, le *niveau de base* et le *niveau sur-ordonné* (Figure 2).

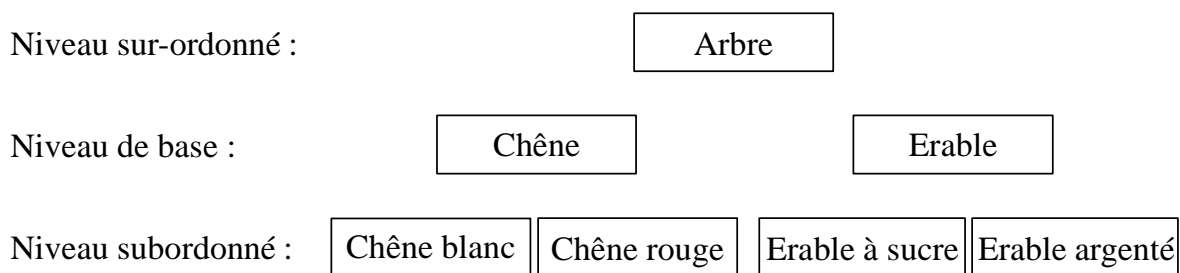


Figure 2. Illustration de l'organisation taxonomique des catégories naturelles tiré de Rosch (1978).

Selon Rosch, le *niveau subordonné* est le niveau de catégorisation qui regroupe des catégories dont les similitudes perceptives intra-catégorielles sont les plus fortes (e.g., « les chênes blancs » ou « les chênes rouges »). Le *niveau de base*, quant à lui, correspond au

niveau d'organisation optimal du monde au regard des interactions du sujet avec son environnement (e.g., « les chênes » ou « les érables »). Les catégories du *niveau de base* regroupent des objets qui ont un grand nombre d'attributs physiques en commun et partagent peu d'attributs avec les membres des autres catégories du même niveau. Puis, au sommet de cette hiérarchie taxonomique se situent les catégories du *niveau sur-ordonné* qui sont fondées sur le principe d'inclusion des catégories du *niveau de base* (e.g., « les arbres »). Ce *niveau sur-ordonné* est caractérisé par des degrés de similitudes intra- et inter-catégorielles très faibles. Cette organisation taxonomique s'appliquerait surtout à des catégories perceptives d'objets naturels, tels que les animaux ou encore les plantes, appariés par leur ressemblance physique.

3.2. Organisation thématique

L'organisation thématique, quant à elle, fait référence à une organisation des catégories sous forme de *scripts* qui représenteraient des séquences d'actions associées à des contextes particuliers (Nelson, 1983, 1988 ; Nelson & Gruendel, 1986). Selon Nelson (1983), le monde représenté est articulé autour des événements quotidiens caractérisés par des séquences d'actions associées à des objets particuliers (Schank & Abelson, 1977). Par exemple, l'évènement du « coucher » fait partie du quotidien de l'enfant et correspond à une séquence d'actions « se brosser les dents », « mettre un pyjama », « s'allonger », « écouter une histoire ». Chaque action est associée à une catégorie d'objets plus ou moins large selon les expériences de l'enfant. Avec la multiplication des expériences, les *scripts* se complexifient et se généralisent à des catégories d'objets de plus en plus larges. Contrairement aux catégories taxonomiques, les catégories thématiques seraient construites sur la base des similitudes fonctionnelles des objets (i.e., catégories fonctionnelles) et de leur probabilité d'occurrence dans un contexte (i.e., catégories contextuelles). Ce type

d'organisation s'appliquerait majoritairement à des objets fabriqués, comme la « brosse à dents », le « pyjama » ou encore le « livre d'histoire », avec lesquels le sujet interagit physiquement, pouvant ainsi leur attribuer des fonctions particulières.

4. DEVELOPPEMENT DE LA CATEGORISATION

La catégorisation précoce est essentiellement perceptive puis l'enfant développe progressivement la capacité à catégoriser les objets sur la base de leurs similitudes contextuelles et fonctionnelles. Des capacités de catégorisation ont été mises en évidence chez des nourrissons de 3 mois. A cet âge, la catégorisation semble limitée à la formation de catégories basées sur des indices grossiers, comme par exemple la forme générale des objets ou encore leur mouvement (Aterberry & Bornstein, 2001 ; Quinn & Eimas, 1996 ; Quinn, Eimas, & Rosenkrantz, 1993). Quinn et Johnson (2000) ont par exemple montré qu'ils étaient capables de faire la différence entre la catégorie des mammifères terrestres et celle des meubles. Ils pourraient également distinguer la catégorie des véhicules, de celle des animaux sur la base de leur mouvement matérialisé par des trajectoires de points lumineux (Aterberry & Bornstein, 2001). En revanche, à l'âge 2 mois, le bébé serait encore incapable de distinguer la catégorie des chiens de celle des chats (Quinn & Johnson, 2000). Les capacités de catégorisation des nourrissons semblent corrélées à leurs modestes équipements perceptifs caractérisés par une faible acuité visuelle (Westermann & Mareschal, 2004) ne leur permettant de percevoir que des différences grossières de formes.

Au cours du développement, les dimensions de l'environnement accessibles à l'enfant se multiplient avec la diversification de ses modes d'exploration qui lui permettent de détecter de nouvelles informations sur les situations qu'il rencontre. Vers l'âge d'un an, l'enfant commence à former des catégories conceptuelles, c'est-à-dire à catégoriser les objets sur la base de leurs caractéristiques contextuelles et fonctionnelles (Madole & Cohen, 1995). Par exemple, à l'âge de 14 mois, l'enfant attribue plus souvent l'action de « boire » ou de « dormir » à des animaux qu'à des véhicules (Mandler & McDonough, 1996). De plus, Mandler et Bauer (1988) ont montré que certains enfants de 12 mois sont capables de former

des catégories sur la base des relations contextuelles entre les objets (objets de la cuisine, de la salle de bains, etc.).

De 2 à 7 ans, les représentations internes et leur organisation se complexifient. L'organisation des catégories se structure progressivement en plusieurs réseaux, taxonomiques et thématiques, et l'enfant devient capable de catégoriser les objets de manière flexible (sur la base de similarités perceptives, taxonomiques ou fonctionnelles) selon les exigences du contexte (Blaye, Jacques, Bonthoux, & Cannard, 2003). Il accède également à la pluri-catégorisation, c'est-à-dire à la capacité d'associer un objet à plusieurs catégories en considérant l'une ou l'autre de ses dimensions. Vers l'âge de 5 ans, l'enfant serait alors capable de distinguer les différents types de relations de similarité qu'il établit entre les objets lorsqu'il les catégorise (e.g., relations de similarités perceptives ou sémantiques ; Blaye, Paour, & Perret, 2002). Cette capacité à percevoir et à discriminer des relations entre objets correspond à l'acquisition de concepts dits « relationnels ». Dans ce cadre, Maintenant et Blaye (2008) ont montré qu'il existe une hiérarchie développementale dans la conceptualisation des relations perceptives et sémantiques chez l'enfant. La conceptualisation des relations perceptives (e.g., identité de forme ou de couleur) interviendrait plus tôt (i.e., vers l'âge de 3-4 ans) que la conceptualisation des relations sémantiques (e.g., relation de prédation entre un chat et une souris ; i.e., vers l'âge de 6-8 ans). Les activités de catégorisation se poursuivent et s'enrichissent tout au long de la vie adulte. Les dimensions accessibles se multiplient et la structuration des connaissances se fait grâce à des appariements multiples, d'objets mais également de relations entre objets.

Pour résumer, les capacités de catégorisation se diversifient au cours du développement s'accompagnant d'un enrichissement des représentations internes. Certains auteurs ont tenté de caractériser les différents facteurs intervenant dans ce développement des

capacités de catégorisation. Nous évoquerons notamment ici la contribution des facteurs attentionnels et le rôle du langage.

4.1. Rôle de l'attention dans le développement de la catégorisation

Les objets qui nous entourent peuvent le plus souvent être catégorisés selon des dimensions différentes, par exemple en considérant les dimensions perceptives (e.g., la forme, la couleur) ou encore les dimensions fonctionnelles (e.g., objets comestibles, véhicules). Comme les capacités de traitement de notre système cognitif sont limitées, la catégorisation requiert un processus de sélection des informations afin de focaliser les activités de comparaison sur les dimensions les plus pertinentes selon le contexte (Ashby & Gott, 1988). Les jugements de pertinence seraient liés à la saillance d'une dimension par rapport aux autres. Cette saillance dépendrait d'abord de l'équipement perceptif du sujet. En effet, les jeunes nourrissons de 2 mois ont tendance à considérer la forme grossière des objets, car la forme est discernable au vue de leurs modestes équipements perceptifs. Plus tard, lorsque les dimensions perceptibles se multiplient, l'attention sélective jouerait un rôle primordial dans la sélection des dimensions pertinentes (Nosofsky, 1986, 1987 ; Nosofsky, Palmeri, & McKinley, 1994). Dans un contexte donné, la pertinence d'une dimension dépendrait alors de l'expérience du sujet : de ses habitudes de catégorisation, de ses croyances, de ses savoirs, de ses attentes et des théories qu'il formule à propos du monde (Medin, Lynch, Coley, & Atran, 1997 ; Reed & Friedman, 1973 ; Ross, 1996).

4.2. Rôle du langage dans le développement de la catégorisation

Au cours de son développement, l'enfant entend des mots et leur attribue progressivement du sens. Vers l'âge de 8-9 mois, il met déjà en relation les mots entendus avec le type d'objets rencontrés (Balaban & Waxman, 1997). L'acquisition du vocabulaire se

fait progressivement jusqu'à l'âge de 3 ans. Entre 3 et 5 ans, les enfants maîtrisent le langage adulte de base, enrichissent leur vocabulaire et perfectionnent leur syntaxe. A tous ces stades d'acquisition, le langage interagit avec la catégorisation et réciproquement.

Dans un premier temps, les activités de catégorisation, majoritairement basées sur la forme des objets, conditionneraient l'acquisition des premiers mots chez l'enfant. En effet, lors de l'acquisition lexicale, les jeunes enfants ont tendance à appliquer un même mot à deux objets selon un critère de ressemblance de forme (Samuelson & Smith, 2000), c'est ce que Landau, Smith et Jones (1988) appellent le « biais de forme ». De même, la difficulté des jeunes enfants à affecter un objet à plusieurs types de catégories est corrélée à une difficulté à attribuer deux mots à un même objet (Markman, 1989 ; Markman & Wachtel, 1988). Finalement, avec la multiplicité de ses expériences langagières, l'enfant acquiert progressivement la polynomie, et peut donc attribuer plusieurs mots à un même objet. Parallèlement, en apprenant que le critère de forme n'est pas toujours prédictif du terme qui désigne les objets, l'enfant développe la capacité à catégoriser les objets selon d'autres dimensions (Jones & Smith, 1998 ; Smith, Jones, & Landau, 1992). Certains auteurs proposent que le mot agisse comme un mobilisateur d'attention qui aide l'enfant à focaliser ses jugements de similarités sur de nouvelles dimensions des objets, plus structurelles (Booth & Waxman, 2002 ; Diesendruck, 2003 ; Graham, Kilbreath, & Welder, 2004 ; Nazzi & Gopnik, 2001 ; Waxman & Braun, 2005).

Pour résumer, au cours du développement, les capacités de catégorisation se généralisent progressivement à des dimensions multiples. Dans ce processus, le langage joue un rôle important puisqu'il attire l'attention de l'enfant vers de nouvelles dimensions. De plus, des mécanismes de sélection de l'attention vont se mettre en place et être renforcés au fur et à mesure des expériences de l'enfant, afin de sélectionner de manière adaptée les dimensions pertinentes eu égard aux exigences du contexte.

Chapitre II

Raisonnement par analogie chez l'homme

1. DEFINITIONS

Le raisonnement par analogie est une activité cognitive qui consiste à établir un jugement de similarité entre deux relations : A est à B ce que C est à D (e.g. les arêtes sont au poisson ce que le squelette est au vertébré ; $1/2=4/8$; Delaporte, 2012). Cette activité cognitive requiert la mise en correspondance de deux situations relationnelles ; une situation nouvelle (la relation *cible*, e.g., C/D) et une situation connue (la relation *source*, e.g., A/B). Reasonner par analogie nécessite donc d’appréhender deux niveaux de relations : (1) des relations entre objets correspondant à des relations du premier ordre (i.e., la relation *source* et la relation *cible*) et, (2) des relations entre ces relations du premier ordre correspondant à des relations du second-ordre de degré d’abstraction plus élevé (Lunzer, 1965 ; Piaget & Inhelder, 1975 ; Figure 3).

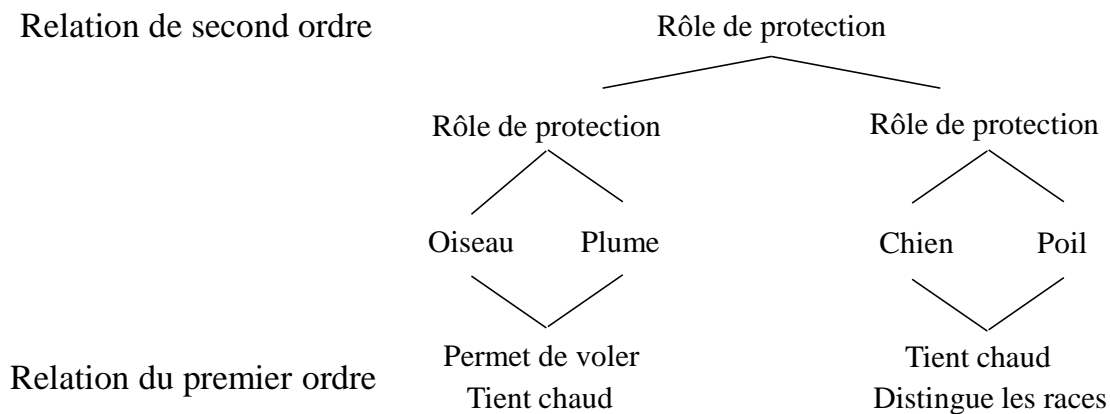


Figure 3. Deux types de relations mis en jeu dans les analogies, tiré de Goswami (1992).

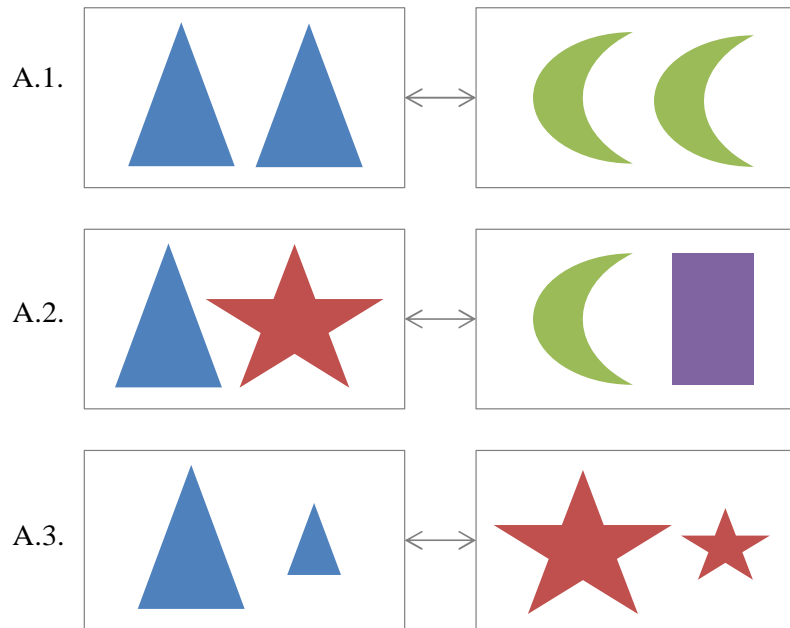
Au même titre que la catégorisation, le raisonnement par analogie est décrit comme l’un des piliers de la cognition humaine, crucial pour de nombreux apprentissages (Gentner, 1983 ; Hofstadter, 2001 ; Kokinov & French, 2002) ainsi que pour la résolution de problèmes (Gick & Holyoak, 1980). Si la catégorisation confère un moyen d’attribuer certaines caractéristiques à un nouvel objet, le raisonnement par analogie permet, quant à lui,

d'appliquer à une nouvelle situation les connaissances acquises dans une situation antérieure considérée comme similaire d'un certain point de vue. En ce sens, le raisonnement par analogie pourrait constituer un outil de généralisation des connaissances à propos des relations entre les objets de l'environnement. Certains auteurs ont d'ailleurs proposé que cette activité cognitive participe à la formation de « catégories relationnelles » qui seraient représentées en mémoire à long terme sous forme de schémas abstraits de correspondance relationnelle entre objets (Gick & Holyoak, 1983 ; Schank, 1999).

Le raisonnement par analogie peut s'appliquer sur différents types de relations (Figure 4). On peut par exemple distinguer les relations perceptives, dans lesquelles l'information conceptuelle est portée par des caractéristiques perceptives (e.g., relation d'identité de couleur ou de forme), des relations sémantiques dans lesquelles l'information conceptuelle est plus abstraite, c'est-à-dire pas directement portée par les caractéristiques perceptives (e.g., relations taxonomiques, fonctionnelles et de causalité ; Maintenant & Blaye, 2008).

Cette mise en correspondance de relations entre objets intervient spontanément au quotidien lorsque nous sommes confrontés à des situations nouvelles que nous comparons à des situations antérieures. Le raisonnement par analogie est par ailleurs étudié dans un contexte expérimental par le biais de diverses tâches présentées voir ci-après.

A. Analogies perceptives



B. Analogies sémantiques

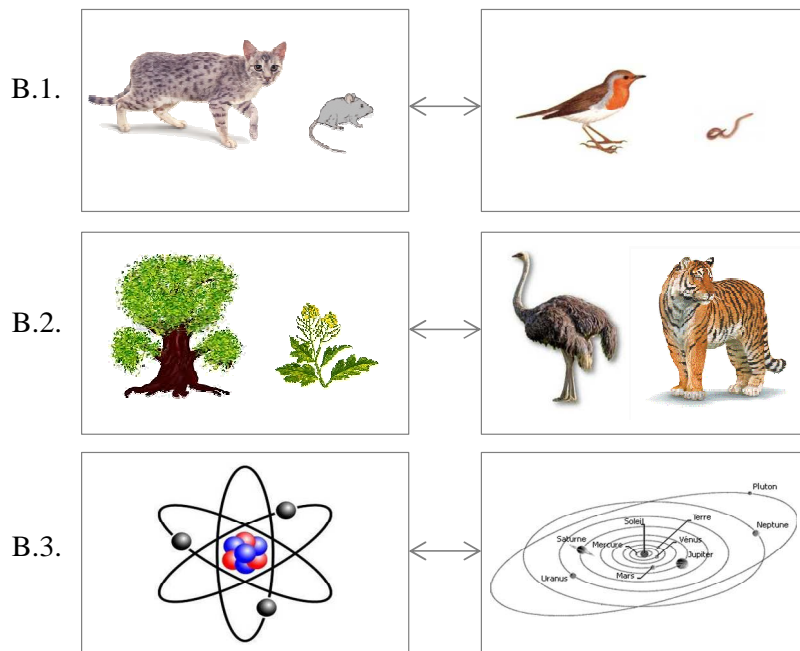


Figure 4. Illustration de différents types d'analogies. A.1-3 : Analogies perceptives ; la relation du second ordre est (A.1) une relation d'identité, (A.2) une relation de différence, (A.3) une relation de taille. B.1-3 : Analogies sémantiques ; la relation du second ordre est (B.1) une relation fonctionnelle qui correspond à la prédation, (B.2) une relation taxonomique, (B.3) une relation causale abstraite correspondant à la gravitation autour d'un autre.

2. TACHES D'ANALOGIE UTILISEES EN LABORATOIRE

On peut distinguer quatre types de tâches d'analogie utilisées en laboratoire. Il s'agit des tâches d'analogie à 4 termes, des tâches d'appariement relationnel, des tâches d'analogie entre scènes visuelles et des tâches de résolution de problèmes. Toutes ces tâches mettent en jeu une relation (ou situation) *source* dont le sujet doit extraire la structure relationnelle pour l'appliquer à une relation (ou situation) *cible*.

Dans les tâches d'analogie à 4 termes, autrement appelées tâches de type $A:B :: C:D$ (Goswami & Brown, 1989, 1990 ; Thibaut, French, & Vezneva, 2010a, 2010b), le sujet doit sélectionner, parmi une liste de cibles (e.g., D1, D2, D3, ...), celle qui s'associe au terme C comme le terme B s'associe au terme A dans la relation *source* (Figure 5).

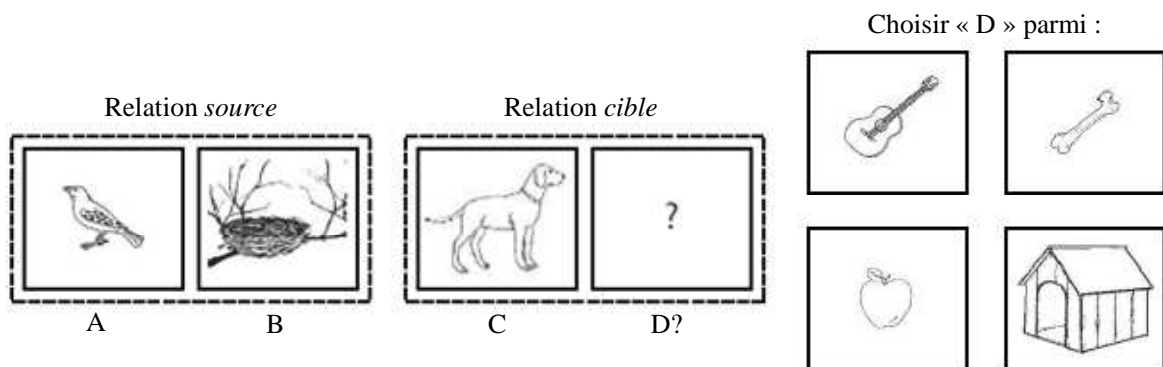


Figure 5. Illustration de la tâche de type $A:B :: C:D$ tiré de Thibaut et al. (2010a).

Dans les tâches d'appariement relationnel, le sujet doit choisir, parmi deux alternatives *cibles*, le lot d'objets qui présente la même relation que le lot *source* (Figure 6).

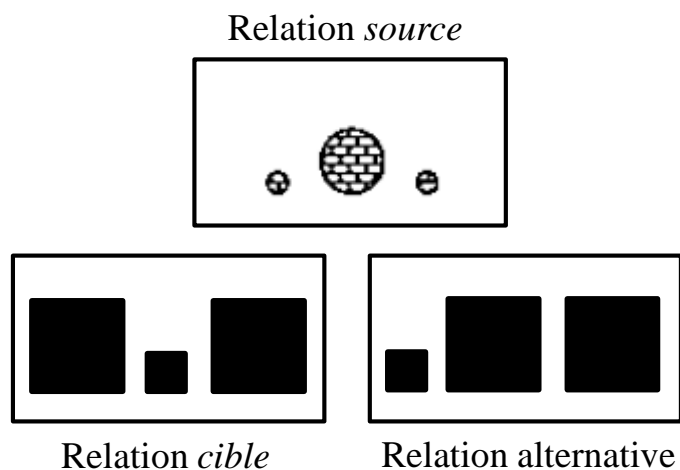


Figure 6. Illustration de la tâche d'appariement relationnel tiré de Kotovsky & Gentner (1996).

Dans les tâches d'analogie entre scènes visuelles, le sujet doit trouver des correspondances entre les éléments de scènes imagées (Markman & Gentner, 1993 ; Richland, Morrison, & Holyoak, 2006 ; Figure 7).

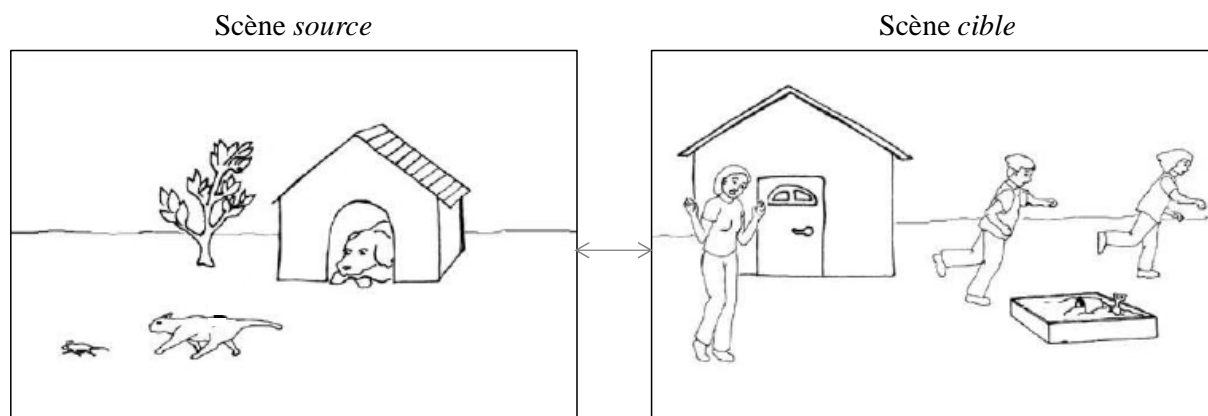


Figure 7. Illustration de la tâche d'analogie entre scènes visuelles tiré de Richland et al. (2006).

Le raisonnement par analogie est également étudié *via* des tâches de résolution de problèmes dans lesquelles les sujets doivent utiliser la solution d'un problème connu pour résoudre un problème nouveau (Cayol, Bastien-Toniazzo, & Blaye, 1997 ; Chen, Sanchez, & Campbell, 1997 ; Crisafi & Brown, 1986 ; Holyoak, Junn, & Billman, 1984 ; Figure 8).

	Histoire <i>source</i>	Problème <i>cible</i>
Etat initial :		
But	Génie veut transférer les bijoux de la bouteille 1 vers la bouteille 2.	L'enfant veut transférer les balles du bol 1 vers le bol 2.
Ressources	Baguette magique/tapis magique.	Canne pour marcher/feuille de papier.
Contrainte	Ne dois pas faire tomber ou perdre les bijoux.	Ne dois pas faire tomber ou perdre les balles.
Solution 1	Génie (<i>a</i>) utilise la baguette pour rapprocher la bouteille 2 de la bouteille 1; (<i>b</i>) fait tomber les bijoux dans la bouteille 2.	L'enfant (<i>a</i>) utilise la canne pour rapprocher le bol 2 du bol 1; (<i>b</i>) fait tomber les balles dans le bol 2.
Solution 2	Génie (<i>a</i>) roule le tapis magique pour former un long tube; (<i>b</i>) place le tube de façon à connecter la bouteille 1 et la bouteille 2; (<i>c</i>) fait rouler les bijoux à travers le tube vers la bouteille 2.	L'enfant (<i>a</i>) roule la feuille de papier pour former un long tube; (<i>b</i>) place le tube de façon à connecter le bol 1 et le bol 2; (<i>c</i>) fait rouler les balles à travers le tube vers le bol 2.
Etat final :	Les bijoux sont transférés en toute sécurité.	Les balles sont transférées en toute sécurité.

Figure 8. Illustration d'une tâche de résolution de problème tiré de Holyoak et al. (1984).

Toutes ces tâches mettent en jeu des analogies plus ou moins complexes qui peuvent être appliquées à différents types de relations (perceptives, fonctionnelles, abstraites). Les résultats des travaux expérimentaux conduits à l'aide de ces différentes tâches ont guidé plusieurs auteurs dans la formulation de théories sur le raisonnement par analogie.

3. THEORIES SUR LE RAISONNEMENT PAR ANALOGIE

De manière générale, le raisonnement par analogie peut se décomposer en quatre phases illustrées par la figure 9.

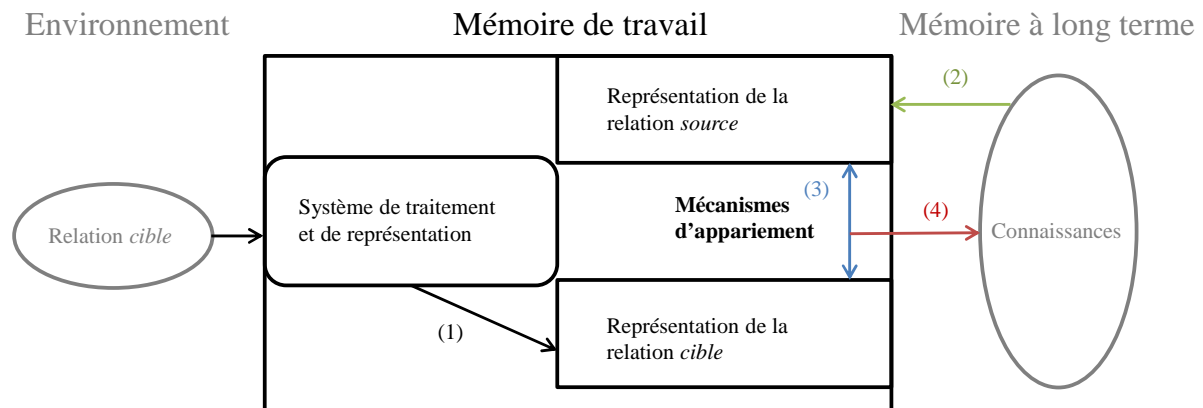


Figure 9. Schéma fonctionnel du raisonnement par analogie inspiré de Ripoll (1992). On peut décrire quatre phases : (1) phase de perception, (2) phase d'évocation, (3) phase d'appariement, (4) phase d'évaluation.

La **phase de perception** (cf. (1) de la figure 9) des éléments de la situation *cible*. Cette phase correspond à l'intégration d'informations sensorielles aboutissant à la représentation d'une relation ou situation *cible* en mémoire de travail. Cette représentation contient une information sur la structure relationnelle de la situation *cible* ainsi que sur les objets qui la composent. La phase de perception est sous la dépendance de mécanismes attentionnels qui vont intervenir dans la sélection des informations de l'environnement.

La **phase d'évocation** (cf. (2) de la figure 9) de la situation *source*. Cette phase correspond à la sélection d'une relation ou situation *source* pertinente issue de la mémoire à long terme. Les critères de pertinence dépendent du contexte de l'analogie (Thagard, Holyoak, Nelson, & Gochfeld, 1990) et des attributs de surface, c'est-à-dire des caractéristiques perceptives et sémantiques des objets de la situation *cible* (Forbus, Gentner,

& Law, 1995 ; Holyoak & Thagard, 1989 ; Ross, 1987, 1989). De plus, l'influence de ces attributs de surface dépend de l'expertise du sujet. Ainsi, les novices qui ont une connaissance faible du domaine relationnel considéré auront davantage tendance à s'appuyer sur les caractéristiques relatives aux objets que les experts (Chi, Feltovich, & Glaser, 1981). Cette phase d'évocation se termine par la sélection de représentations internes (représentations *source*) issues de ces processus de recherche en mémoire à long terme.

La **phase d'appariement** (cf. (3) de la figure 9) de la situation *source* et de la *cible* (phase de « mapping »). Cette phase constitue le cœur de l'analogie (Gentner & Markman, 1997 ; Holyoak & Thagard, 1997 ; Sternberg, 1977). Dans cette phase, la mise en correspondance des représentations de la *source* et de la *cible* a lieu en mémoire de travail et implique des mécanismes de recherche de similarités. Cependant, comme l'a souligné Holyoak (1985), la mémoire de travail ne pourrait supporter une comparaison exhaustive de tous les objets et relations qui constituent les représentations de la *source* et de la *cible*. Aussi, plusieurs contraintes ont été décrites, qui guideraient les processus d'appariement afin de limiter cette explosion combinatoire décrite par Holyoak. Les différents auteurs de ce domaine ont ainsi décrit et implémenté dans les modèles issus de leurs théories trois types de contraintes : une *contrainte structurale*, une *contrainte pragmatique* et une *contrainte sémantique* (Ripoll & Coulon, 2001).

Contrainte structurale : Selon Gentner (1983), les mécanismes de comparaison seraient principalement guidés par la *contrainte structurale* qui constitue d'ailleurs l'élément central de la modélisation du raisonnement par analogie proposé par cette auteure (Structure Mapping Engine ; Falkenhainer, Forbus, & Gentner, 1989). Cette contrainte impliquerait que les appariements soient univoques, c'est-à-dire qu'une relation de la *source* doit être appariée avec une seule relation de la *cible* et de même pour les objets. De plus, les appariements s'effectueraient de manière à établir des connectivités parallèles, c'est-à-dire que si deux

relations sont appariées, leurs objets doivent l'être également de façon cohérente. Initialement, Gentner considérait que les modèles de raisonnement par analogie ne devaient prendre en compte que les similarités structurelles (e.g. relationnelles) entre la *source* et la *cible*, et négliger les attributs des objets : « Une analogie est une comparaison dans laquelle les prédicats relationnels, mais peu ou aucun objet, peuvent être projetés de la *source* vers la *cible* » (Gentner, 1983, p.159 ; d'après Ripoll & Coulon, 2001). C'est ce qu'elle décrit à l'époque comme le *principe de systématité*. Cependant, après une série d'expérimentations (Gentner & Toupin, 1986 ; Ross, 1987, 1989), Gentner est amenée à reconsidérer sa théorie initiale d'appariement structurel en introduisant le *principe de transparence* qui souligne l'importance des similarités perceptives entre les objets des situations *source* et *cible*. En effet, dans leur étude, Gentner et Toupin (1986) montrent que le degré de ressemblance des objets dans les situations *source* et *cible* affecte les jugements relationnels des sujets. Le principe de l'expérience était le suivant : l'expérimentateur mime une histoire à des enfants 4-6 ans et 8-10 ans avec des objets mettant en scène trois personnages et les enfants doivent ensuite reproduire cette histoire avec des personnages différents. Pour varier le degré de *transparence* des correspondances d'objets, les auteurs ont eu recours à la technique du « cross-mapping ». Cette technique consiste à introduire des objets du problème *source* dans le problème *cible* pour générer une interférence dans les appariements des informations de surface et des informations relationnelles. Gentner et Toupin (1986) ont utilisé trois niveaux de transparence dans les correspondances entre les caractères de l'histoire *source* et ceux de l'histoire *cible* (Figure 10) ; (1) Les personnages de l'histoire *cible* ressemblent aux personnages de l'histoire *source* mais jouent des rôles différents (S/D). (2) Les personnages de l'histoire *cible* ressemblent aux personnages de l'histoire *source* et ont les mêmes rôles (S/S) (3) Les personnages jouant de l'histoire *cible* sont différents des personnages initiaux (D/S).

HISTOIRE

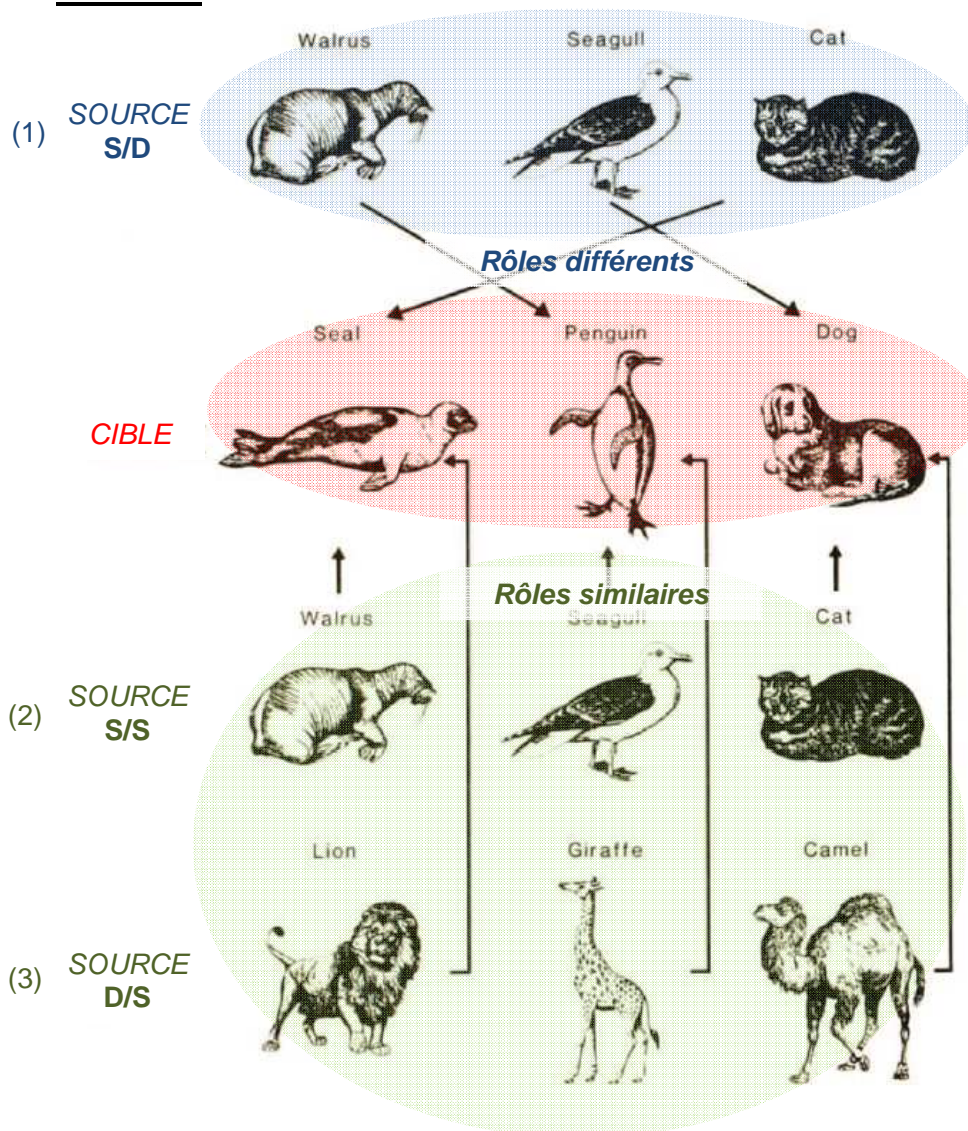


Figure 10. Exemples de stimuli utilisés dans les trois conditions d'analogie (S/D, S/S, D/S) de l'étude de Gentner & Toupin (1986). (1) S/D : Personnages similaires / Rôles différents → Transparence faible. (2) S/S : Personnages similaires / Rôles similaires → Transparence forte. (3) D/S : Personnages différents / Rôles similaires → Transparence moyenne.

Les résultats montrent que la transparence des correspondances entre objets influence fortement les performances des enfants des deux groupes d'âge. Ainsi, Les enfants avaient beaucoup de difficultés à mimer correctement une histoire *cible* avec des objets ressemblants aux objets de l'histoire *source* jouant des rôles différents. De plus, ils avaient plus de difficultés à mimer une histoire *cible* avec de nouveaux personnages qu'avec des personnages

ressemblants à ceux de l'histoire *source* et jouant le même rôle. Cette étude souligne l'importance des similarités perceptives entre les objets des situations *source* et *cible* dans les processus d'appariement et illustre le *principe de transparence* décrit par Gentner (Gentner & Toupin, 1986).

Contrainte pragmatique : Selon Holyoak (1985), la contrainte majeure guidant les mécanismes de comparaison serait déterminée par le contexte de l'analogie, notamment les buts poursuivis par le sujet. Dans la modélisation de sa théorie (Analogical Constraint Mapping Theory ; Holyoak & Thagard, 1989), Holyoak implémente donc, en sus de la *contrainte structurale* décrite par Gentner, une *contrainte pragmatique* qui favorise les appariements d'éléments importants au regard de l'objectif que suit le sujet en raisonnant par analogie. De plus, selon le contexte dans lequel l'analogie est produite, cette *contrainte pragmatique* attribue des poids différents aux relations et aux objets, pouvant ainsi favoriser des appariements plutôt structurels (e.g. appariements de relation) ou plutôt superficiels (e.g. appariement d'objets).

Contrainte sémantique : La troisième contrainte décrite et implémentée dans les différents modèles est la *contrainte sémantique* (Falkenhainer et al., 1989 ; Holyoak & Thagard, 1989 ; Thagard et al., 1990). Cette contrainte implique que le système ait plutôt tendance à appairer des éléments proches sémantiquement que des éléments présentant une forte distance sémantique. Cette contrainte influencerait les appariements au niveau des objets, en préférant par exemple appairer un chien avec un chat plutôt qu'avec un arbre, et au niveau des relations, en appariant le concept « pousser quelque chose » avec celui de « bousculer quelqu'un », plutôt qu'avec celui de « marcher avec ».

La dernière phase du raisonnement par analogie est **la phase d'évaluation** (cf. (4) de la figure 9) qui consiste à sélectionner l'appariement le plus pertinent, au regard des contraintes structurales, pragmatiques et sémantiques. En d'autres termes, cette phase assied

l'analogie entre la représentation *source* la plus pertinente, parmi les représentations concurrentes issues de la mémoire à long terme, et la représentation *cible*. Elle aboutit donc à la modification des connaissances en mémoire à long terme du fait des associations créées entre les éléments superficiels (e.g., objets) et structurels (e.g., relations) de la *source* et de la *cible* lors de l'analogie.

4. ONTOGENESE DES ANALOGIES

La capacité à raisonner par analogie évolue au cours du développement. Dès l'âge de 8-9 mois, les nourrissons sont sensibles aux relations perceptives et capables de distinguer des relations d'identité et de différence (Tyrrell, Stauffer, & Snowman, 1991). Vers l'âge d'un an, certains enfants semblent exprimer des rudiments d'analogie en étant capables de reproduire une succession d'actions simples (e.g., tirer un tissu puis tirer sur une ficelle à laquelle est accroché un jouet) préalablement montrée plusieurs fois par leurs parents dans des contextes similaires (Chen et al., 1997). Cependant, cette étude montre que les enfants ne peuvent reproduire des séquences d'actions que dans des contextes très proches de ceux de démonstrations. Cela suggère qu'ils appariant les situations *source* et *cible* en utilisant surtout des similarités de surface (e.g., le niveau de ressemblance des objets des situations *source* et *cible*) sans tenir compte de la structure relationnelle des problèmes. Cette sensibilité particulière aux similarités de surface a également été rapportée par Gentner et Toupin (1986) chez des enfants plus vieux de 4-6 et 8-10 ans. La saillance des similarités de surface (e.g. ressemblance des objets) semble cependant évoluer au cours du développement.

En utilisant la technique du « cross-mapping » appliquée au paradigme de l'appariement relationnel (Figure 11), Christie et Gentner (2007), ont étudié la sensibilité aux caractéristiques de surface chez des enfants de 4,5 ans et 8,5 ans et chez des adultes. Dans cette étude, ces auteures présentaient une relation *source* constituée par deux formes colorées identiques ou différentes (Figure 11.A) et demandaient ensuite au sujet de choisir parmi deux relations *cibles*, celle qui ressemblait le plus à la relation *source*. Parmi les paires *cible*, l'une comportait un objet de la paire *source* mais exprimait une relation différente (Figure 11.C), et l'autre exprimait la même relation que la paire *source* mais ne partageait aucun objet avec elle (Figure 11.B).

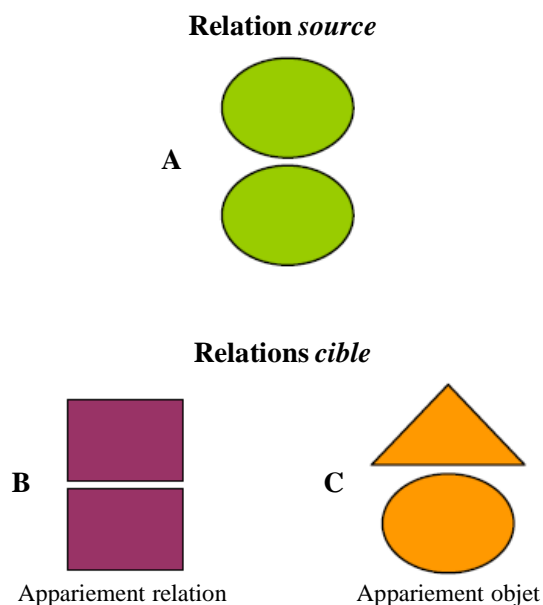


Figure 11. Illustration d'un essai dans l'étude de Christie et Gentner (2007). A : Relation source, B : Relation cible présentant la même relation que la source, C : Relation cible partageant un objet avec la source.

Les résultats de cette étude montrent que les enfants de 4,5 ans ont spontanément tendance à choisir la paire *cible* qui partage un objet avec la paire *source* (Figure 11.C), basant leur jugement de similarité sur les caractéristiques de surface (e.g, la similarité des objets). Les adultes, quant à eux, basaient leur jugement de similarité sur les caractéristiques relationnelles en choisissant préférentiellement la paire *cible* qui présentait la même relation que la paire *source* (Figure 11.B). Le profil de réponse des enfants de 8,5 ans était intermédiaire ; ils établissaient pour la moitié des jugements basés sur les similarités de surface et pour l'autre moitié des jugements relationnels.

Selon Gentner (1988), ces résultats sont expliqués par un changement dans les processus attentionnels au cours du développement, qu'elle définit comme une « bascule relationnelle » (« relational shift »). D'après sa théorie, les jeunes enfants se baseraient sur les caractéristiques perceptives pour résoudre les problèmes qu'ils rencontrent et, plus tard, développeraient la capacité à porter leur attention sur les structures relationnelles des

problèmes *source* et *cible*. Plusieurs études sur le développement du raisonnement par analogie montrent que cette bascule relationnelle peut intervenir à différents moments du développement, selon le paradigme expérimental utilisé et selon l'expérience des enfants avec les relations considérées (Brown, Kane, & Echols, 1986 ; Goswami, 1989 ; Uttal, Schreiber, & DeLoache, 1995). Plusieurs facteurs ont été évoqués pour expliquer cette bascule relationnelle.

4.1. Rôle de la mémoire de travail

Selon Halford (1993 ; Halford et al., 1994), c'est le développement de la capacité de la mémoire de travail qui régit le développement des compétences d'analogie. En effet, cet auteur propose que les compétences cognitives de l'enfant dépendent directement de la capacité de traitement de leur mémoire de travail. Dans sa théorie de la complexité relationnelle (TCR, Halford & Andrews, 2004 ; Halford, Wilson, & Phillips, 1998), Halford définit plusieurs niveaux de complexité des relations en fonction du nombre d'arguments (i.e., objets) qui les composent. Ainsi, une relation binaire comporte deux arguments (e.g., A et B) représentant deux sources de variations possibles, comme la relation « A plus grand que B ». Une relation ternaire possède trois arguments, donc trois sources de variations possibles, comme dans l'exemple « A plus grand que B plus grand que C ». Une relation quaternaire possède quatre arguments, etc ... Selon Halford, la charge de traitement d'une relation en mémoire de travail dépend directement de sa complexité. Ainsi, chez les jeunes enfants, la faible capacité de la mémoire de travail limiterait le nombre de variables connexes qu'ils peuvent traiter en parallèle. Ils seraient d'abord capables de traiter des relations unitaires, en d'autres termes d'apparier des objets mais seraient incapables d'effectuer des appariements structurels (relationnels) mettant en jeu plusieurs sources de variations. Ce n'est que plus tard,

avec l'augmentation de leurs capacités de traitement en mémoire de travail, que les enfants pourraient traiter des relations binaires puis ternaires.

Des études empiriques conduites chez l'enfant soutiennent cette théorie. Ainsi, Richland et al. (2006) ont étudié la capacité d'enfants de 3-4, 6-8 et 13-14 ans à résoudre une tâche d'analogie entre scènes visuelles en manipulant la complexité des relations mises en jeu. Dans cette étude, l'expérimentateur pointait un élément d'une scène *source* (e.g. un chat qui court après une souris) et les enfants devaient sélectionner dans une scène *cible* (e.g. un garçon qui court après une fille) l'élément jouant le même rôle. Les scènes pouvaient comprendre deux ou trois éléments par relation (un chat poursuivant une souris vs. un chien poursuivant un chat qui poursuit une souris). Les résultats montrent que la complexité des relations influence particulièrement les jeunes enfants, et que cet effet tend à diminuer avec l'âge. De la même façon, Goswami (1989) a montré que la complexité relationnelle affectait les performances de sujets de 4 à 8 ans dans des tâches d'analogie perceptives basées sur des proportions. L'importance de la mémoire de travail dans le raisonnement par analogie est également attestée par les difficultés de traitement des relations complexes chez des sujets dont les capacités de mémoire de travail sont diminuées, comme chez des personnes âgées (Viskontas, Morrison, Holyoak, Hummel, & Knowlton, 2004) ou des patients cérébro-lésés (Morrison et al., 2004).

4.2. Rôle de l'inhibition

D'autres auteurs ont proposé que la composante inhibitrice du contrôle exécutif influence l'aptitude des sujets à raisonner par analogie (Richland et al., 2006). Le contrôle inhibiteur est défini par Miyake et al. (2000) comme une fonction exécutive qui permet d'ignorer une information ou de bloquer une réponse prépondérante mais non pertinente, pour privilégier l'issue pertinente d'un problème. Cette fonction exécutive gagne en efficacité au

cours du développement (Best & Miller, 2010 ; Cragg & Nation, 2008 ; Garon, Bryson, & Smith, 2008). D'après Richland et al. (2006), c'est grâce au développement de l'efficacité de son contrôle inhibiteur que l'enfant peut progressivement ignorer les similarités de surface de la *source* et de la *cible* et focaliser son attention sur les informations pertinentes, à savoir les similarités structurelles. Cette thèse est supportée par des données expérimentales (Thibaut, French & Vezneva, 2010a ; 2010b).

4.3. Rôle des connaissances

D'autres auteurs ont proposé que les connaissances des enfants jouent un rôle important dans leur capacité à raisonner par analogie en considérant la structure relationnelle des situations. Selon Goswami et Brown (1990), l'échec des jeunes enfants dans les tâches d'analogie provient de leur incompréhension des relations mises en jeu. Cette conception est soutenue par des études empiriques qui montrent que dès l'âge de 3 ans, l'enfant est capable de raisonner sur la base des structures relationnelles des problèmes, uniquement s'il possède des connaissances suffisantes dans le domaine auquel ont trait les relations et objets considérés. Par exemple, dans l'étude de Goswami et Brown (1989), des enfants de 3, 4 et 6 ans devaient résoudre des analogies à 4 termes mettant en jeu des relations de causalité physique (e.g., fondre, couper, etc...), du type « chocolat : chocolat fondu :: bonhomme de neige : bonhomme de neige fondu », sachant que la compréhension des relations de causalité émerge entre 3 et 4 ans (Bullock, Gelman, & Baillargeon, 1982). Les enfants de 3 ans étaient capables de résoudre correctement les analogies qui mettent en jeu des relations causales qu'ils connaissent. La connaissance de ces relations sémantiques est acquise progressivement par l'enfant lors de ces multiples interactions avec l'environnement. On peut donc penser que ce sont ses propres expériences avec le monde qui permettraient à l'enfant de percevoir les dimensions structurelles des situations qu'il rencontre, et de focaliser son attention sur cet

aspect des situations. La saillance des indices structurels peut également être induite dans un contexte expérimental. Par exemple, Brown et Kane (1988) ont montré que la présentation successive de plusieurs problèmes à des enfants de 3, 4 et 5 ans augmentait l'attention qu'ils portent sur les similarités structurelles des problèmes. De même, la présence de consignes telles que « le problème que tu dois résoudre est le même que celui que tu viens de voir » aide l'enfant à focaliser son attention sur la structure relationnelle des problèmes *source* et *cible* (Brown & Kane, 1988 ; Crisafi & Brown, 1986). De plus, Brown, Kane et Echols (1986) ont montré que les performances des enfants s'améliorent quand on les questionne sur ce que fait le personnage de la situation *source*, ou qu'on leur demande d'expliquer le problème auquel ce personnage est confronté. Tous ces éléments suggèrent que les difficultés des enfants à raisonner par analogie proviennent souvent de leur manque de connaissances des relations.

4.4. Rôle du langage dans le développement des capacités d'analogie

Au cours du développement, l'enfant acquiert un langage relationnel en associant des signifiants à des relations (e.g., « A est plus grand que B » ou « A chasse B ») . Ce langage relationnel augmenterait la saillance des relations, faciliterait leur encodage et « inviterait l'enfant », selon les termes de Gentner (Gentner & Medina, 1997), à porter attention aux structures relationnelles de second ordre. Des études expérimentales montrent que l'utilisation d'un mot ou d'un symbole pour représenter la relation *source* aide l'enfant à focaliser son attention sur les similarités structurelles des problèmes (Gentner & Rattermann, 1991 ; Rattermann & Gentner, 1998). Par exemple, Rattermann et Gentner (1998) ont utilisé un paradigme dans lequel des enfants de 3 et 4 ans devaient retrouver, dans un ensemble de stimuli *cible*, l'objet désigné par l'expérimentateur dans un ensemble de stimuli *source* (Figure 12). Chaque lot de stimuli comprenait trois objets ordonnés de façon linéaire selon leur taille. En utilisant la technique du « cross-mapping », un objet *source* se retrouvait

également dans l'ensemble des objets *cible*, mais à une place relative différente. C'est précisément cet objet qui était désigné par l'expérimentateur dans le lot d'objets *source*. Les enfants pouvaient alors répondre en faisant un appariement relationnel, c'est-à-dire en choisissant l'objet *cible* qui avait la même taille relative que l'objet *source*, ou effectuer un appariement superficiel, en choisissant l'objet *cible* identique à l'objet *source* pointé. Les résultats montrent qu'environ la moitié des enfants de 3 et 4 ans répondaient au problème en effectuant des appariements superficiels et l'autre moitié en effectuant des appariements relationnels. Cependant, lorsque l'expérimentateur utilisait des labels relationnels pour désigner les objets du set source comme, « papa », « maman », « bébé » ou encore « gros », « petit », « tout petit », les réponses relationnelles des enfants augmentaient considérablement (90% de réponses relationnelles).

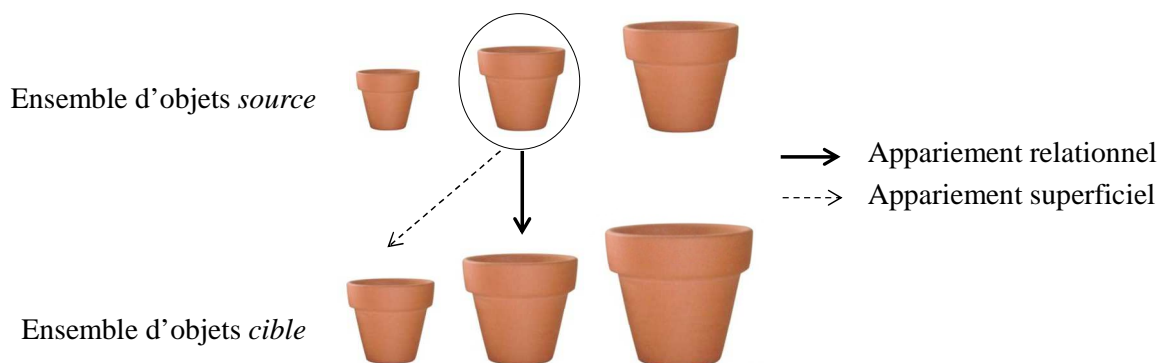


Figure 12. Illustration d'un essai tiré de l'expérience conduite par Rattermann et Gentner (1998).

Avec le même type de paradigme, mais en utilisant des relations spatiales, Loewenstein et Gentner (2005) ont montré que l'utilisation de termes comme « au-dessus », « au milieu » ou « en dessous » pour désigner les objets d'un ensemble *source* améliorait significativement les performances de transfert des enfants de 3-4 ans. Par ailleurs, lorsqu'un terme arbitraire est utilisé pour désigner une relation *source* dans une tâche d'appariement

relationnel, les enfants de 4,5 ans ont davantage tendance à considérer cette relation comme une unité et à l'apparier avec une relation du même type, alors que sans désignation préalable ils préfèrent baser leur jugement sur les similarités de surface (Christie & Gentner, 2007 ; cf. Figure 11 p.32). Dans une autre étude, Mutafchieva et Kokinov (2007) ont montré que l'utilisation d'objets physiques pour représenter la relation entre les objets d'une situation *source* impactait positivement les performances de transfert des enfants, car ces objets avaient la même fonction qu'un label relationnel. Ces différentes études suggèrent que le langage relationnel constituerait un outil efficace pour construire des représentations mentales de la structure relationnelle des problèmes.

RESUME - PARTIE I

La catégorisation et le raisonnement par analogie mettent en jeu des étapes de traitement analogues : (1) un encodage d'une *cible*, (2) une récupération d'informations en mémoire à long terme aboutissant à la représentation d'éléments *source* en mémoire de travail, (3) une comparaison des représentations *source* et *cible* impliquant un jugement de similarité, et (4) une modification du réseau de connaissances. De plus, au cours de son développement, l'enfant développe des capacités de catégorisation puis de raisonnement par analogie sous l'influence de facteurs comme l'expérience, l'acquisition du langage ou encore l'augmentation des capacités de la mémoire de travail (Figure 13). Ces éléments suggèrent une certaine continuité dans les activités de catégorisation et de raisonnement par analogie, et laissent penser que ces activités sont sous-tendues par les mêmes processus cognitifs appliqués à des représentations de complexité différente, à savoir respectivement des objets et des relations entre objets.

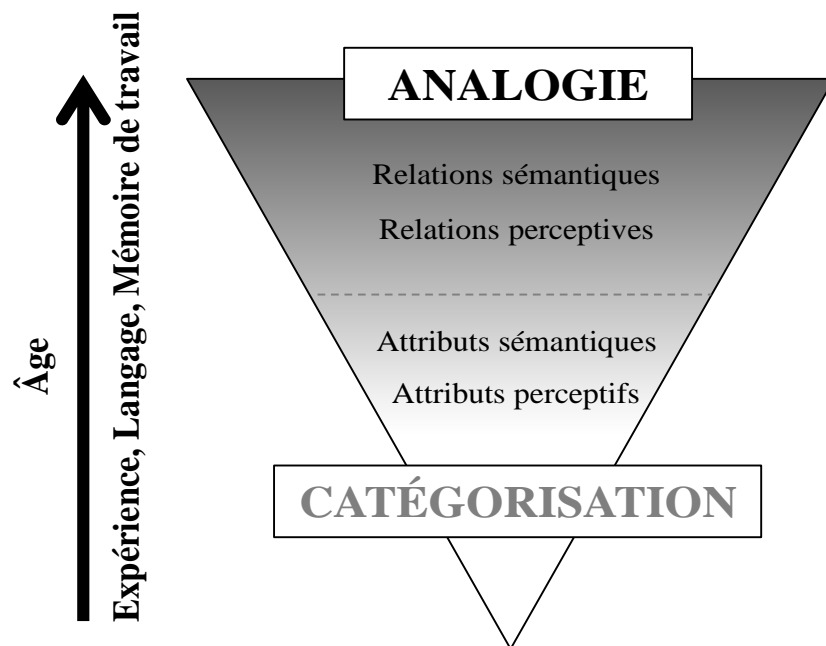


Figure 13. Evolution de la capacité à catégoriser des éléments de plus en plus complexes chez l'enfant sous l'influence de différents facteurs.

PARTIE II

CATEGORISATION ET RAISONNEMENT PAR ANALOGIE

CHEZ LES PRIMATES NON HUMAINS



©C. de Luze

Chapitre I

Catégorisation chez les primates non humains

1. INTRODUCTION

Nous avons pu distinguer différents niveaux de jugements de similarités chez l'homme qui émergent progressivement au cours du développement ; de la catégorisation perceptive, puis sémantique jusqu'au raisonnement par analogie mettant en jeu des relations.

Une classification détaillant ces différents niveaux a été proposée chez l'animal par Herrnstein (1990). Dans sa classification, cet auteur distingue cinq niveaux de compétences catégorielles par ordre croissant d'abstraction (Figure 14) : 1) la discrimination, 2) la catégorisation « par cœur », 3) la catégorisation en classes ouvertes basée sur des dimensions perceptives, 4) la catégorisation conceptuelle basée sur des dimensions sémantiques, et 5) la catégorisation de relations abstraites qui correspond au raisonnement par analogie.

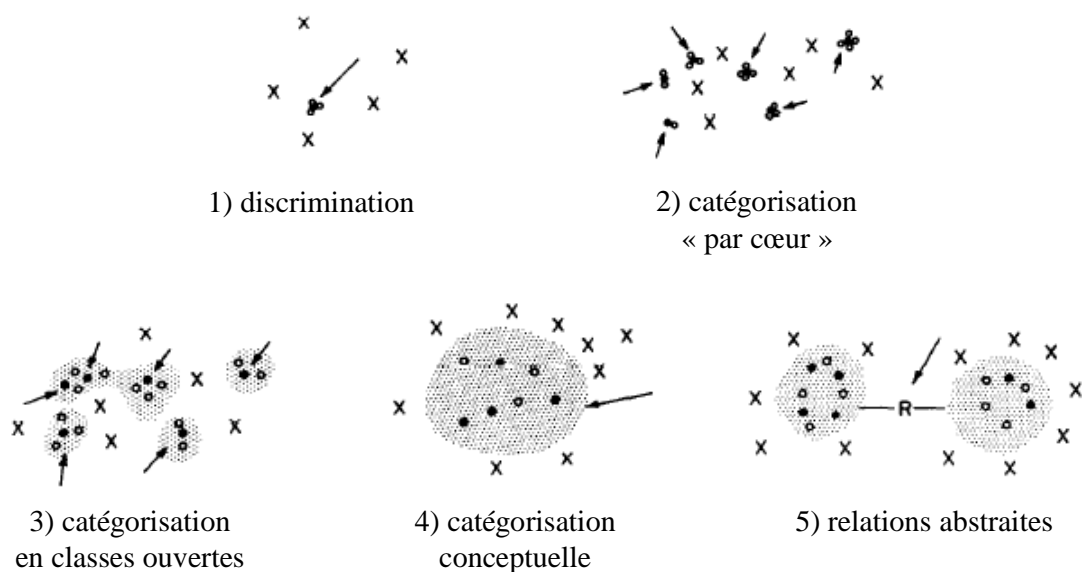


Figure 14. Illustration des 5 niveaux de catégorisation. Les cercles pleins représentent les exemplaires connus et les cercles vides les exemplaires auxquels s'applique la généralisation. Les croix représentent des objets pour lesquels la généralisation n'est pas appropriée et les flèches indiquent à quel niveau la catégorisation s'effectue (d'après Herrnstein, 1990).

Selon la classification d'Herrnstein (1990), la discrimination correspond au plus bas niveau de catégorisation. Dans ce cas, l'animal distingue les stimuli les uns des autres mais ne les regroupe pas en classes.

Le niveau de catégorisation supérieur correspond aux catégories « par cœur » (Herrnstein, 1990), en classe fermée. Un animal effectue ce type de catégorisation lorsqu'il apprend l'ensemble des stimuli dont est composée une catégorie. D'après Herrnstein (1990), l'usage de telles catégories est encouragé lorsque l'effectif d'items à classer est petit. D'un point de vue expérimental, cette stratégie se traduit par une incapacité de l'animal à appliquer (i.e., généraliser) les règles apprises à de nouveaux stimuli.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous intéresserons plus particulièrement à la catégorisation en classes ouvertes ainsi qu'à la catégorisation conceptuelle qui ont toutes deux fait l'objet d'une littérature assez vaste chez les primates non humains. Enfin, un dernier chapitre sera consacré au cinquième niveau de « catégorisation des relations abstraites » proposé par Herrnstein (1990), qui correspond plus directement au sujet de cette thèse : le raisonnement par analogie.

2. PROCEDURES EXPERIMENTALES

Contrairement aux études chez l'homme, les paradigmes expérimentaux utilisés chez les primates non humains ne peuvent ni avoir recours à la parole, ni à une simple démonstration de résolution de la tâche pour faire comprendre les consignes aux sujets. Aussi, la majorité des études sur la catégorisation chez ces espèces utilisent des tâches de conditionnement opérant comprenant une phase d'entraînement (i.e., d'apprentissage des catégories) suivie d'une phase de transfert dans laquelle l'animal doit répondre à la présentation de nouveaux stimuli. Ces tâches de catégorisation peuvent mettre en jeu des catégories naturelles, par la présentation d'objets physiques (Bovet & Vauclair, 2001), de photographies d'objets naturels (D'Amato & Van Sant, 1988 ; Schrier, Angarella, & Povar, 1984), ou des catégories artificielles, constituées de stimuli créés pour les besoins de l'expérience (Dépy, Fagot, & Vauclair, 1997 ; Thomas & Crosby, 1977 ; Vauclair & Fagot, 1996).

Selon la nature des stimuli, ils peuvent être présentés à l'animal sur des écrans ou par la projection de diapositives, ou encore sur des plateaux lorsqu'il s'agit d'objets réels, et l'animal doit émettre un choix catégoriel en réponse à ces présentations. Dans la phase d'entraînement, l'animal reçoit une récompense alimentaire dès qu'il effectue un choix correct et apprend par renforcement à associer un type de réponse à une catégorie d'objets. Les modalités de réponse varient selon la tâche et le dispositif considéré.

Dans les tâches de discrimination à choix forcé, un stimulus modèle est affiché et l'animal possède deux clés de réponse. Selon l'appartenance catégorielle du stimulus affiché, l'animal doit sélectionner l'une ou l'autre des clés de réponse (Schrier et al., 1984 ; Figure 15.A). Dans les tâches dites de « go/no-go », la procédure reste identique mais l'animal ne dispose que d'une clé de réponse qu'il doit actionner ou non selon l'appartenance catégorielle du stimulus affiché (D'Amato & Van Sant, 1988 ; Schrier et al., 1984 ; Figure 15.B). Toutes

ces tâches mettent en jeu une phase d'apprentissage des catégories par essai-erreur qui se termine lorsque l'animal a atteint un certain critère de réussite déterminé à l'avance. Cette phase est suivie d'une phase de test ou de transfert qui consiste à tester les capacités de généralisation des sujets. La capacité d'un sujet à considérer les nouveaux stimuli comme appartenant à la même catégorie que ceux de l'entraînement est inférée lorsque le nombre d'essais corrects dans la phase de test est supérieur au hasard et ne diffère pas significativement de la performance en fin d'entraînement (Katz, Wright, & Bodily, 2007).

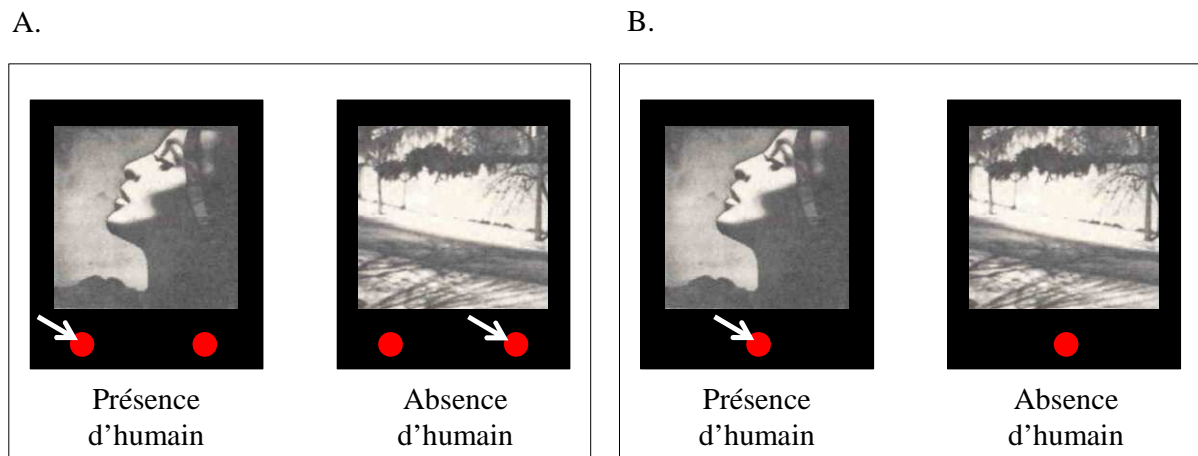


Figure 15. Procédures expérimentales pour l'étude de la catégorisation chez les primates non humains, tiré de Schrier et al. (1984). A. Tâche de discrimination à choix forcé ; si la photographie comporte un humain, le singe doit sélectionner la clé de réponse de gauche, sinon il doit sélectionner la clé de droite. B. Tâche de « go/no-go » ; si la photographie comporte un humain, le singe doit sélectionner la clé de réponse, sinon il ne doit pas répondre.

Un autre paradigme, plus rarement utilisé, est celui de l'habituation/déshabituation (Zuberbühler, Cheney, & Seyfarth, 1999 ; Figure 16). Dans ce paradigme, aucune réponse n'est exigée de l'animal et aucune récompense alimentaire n'est délivrée. La capacité à discriminer deux stimuli est alors évaluée d'après le profil de réaction des sujets à la présentation successive de différents stimuli. En effet, selon le principe d'habituation, lorsque plusieurs stimuli d'une même catégorie sont successivement présentés à un sujet, sa réaction

aux objets de cette catégorie s'atténue proportionnellement au nombre de présentations. En revanche, lorsqu'un stimulus est considéré comme nouveau (i.e., appartenant à une nouvelle catégorie), le sujet a tendance à y réagir plus fortement, selon le principe de déshabituatation.

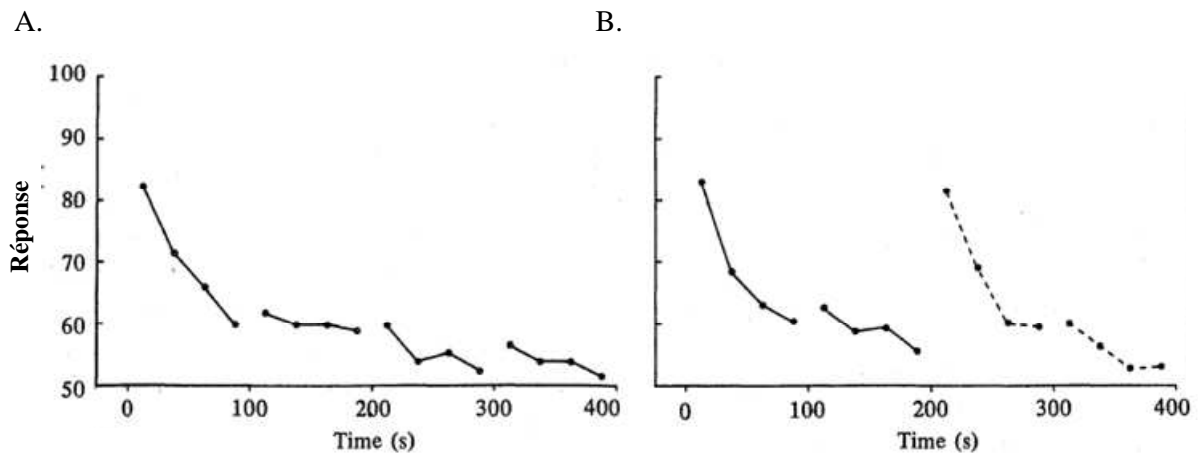


Figure 16. Illustration du principe d'habituation/déshabituatation tirée d'une étude sur la catégorisation de différentes espèces animales chez le macaque (Humphrey, 1974). Dans cette étude, à $t=0s$, un stimulus (i.e., une photographie d'animal) est présenté au singe. A. Patron de réponse lorsqu'une photographie d'un animal de la même espèce est présentée à $t=200$ sec. B. Patron de réponse lorsqu'une photographie d'un animal d'une autre espèce est présentée à $t=200$ sec.

3. CATEGORISATION EN CLASSES OUVERTES

D'après la classification d'Herrnstein (1990), la catégorisation en classes ouvertes est le premier niveau de catégorisation permettant une généralisation. Ce niveau fait référence à la catégorisation perceptive que nous avons détaillée dans le premier chapitre de cette thèse, et conduit donc à la formation de catégories basées sur les similarités physiques.

De nombreux travaux ont permis d'appréhender la capacité des primates non humains à former ce type de catégories (Dépy et al., 1997 ; Thomas & Crosby, 1977 ; Vauclair & Fagot, 1996). Certaines démonstrations de catégorisation perceptive proviennent même d'expériences conduites à l'aide de photographies, initialement conçues pour étudier l'existence de concepts chez les singes (D'Amato & Van Sant, 1988 ; Roberts & Mazmanian, 1988 ; Schrier et al., 1984 ; Schrier & Brady, 1987 ; Yoshikubo, 1985). L'une des études clés dans ce domaine a été conduite par D'Amato et Van Sant (1988) chez le singe capucin. Dans le but d'étudier l'existence du concept d'« humain » chez cette espèce, ces auteurs ont utilisé le paradigme du go/no-go et entraîné des capucins à discriminer des photographies contenant des hommes, de photographies qui n'en contenaient pas. Après un entraînement de quelques centaines d'essais mettant en jeu plusieurs dizaines de photographies, les singes ont été testés avec de nouvelles photographies et sont parvenus à discriminer correctement celles qui contenaient des hommes de celles qui n'en contenaient pas. Ces résultats semblaient démontrer l'existence du concept d'« homme » chez ces espèces. Cependant, l'analyse des erreurs commises par les capucins suggère qu'ils employaient une stratégie alternative et démontre en réalité leur capacité à catégoriser des stimuli sur la base de dimensions perceptives. Par exemple, la plupart des photographies « sans homme » classées à tort par les singes dans la catégorie des photographies d'homme, comportaient des tâches de couleur rouge. Or, cette caractéristique apparaissait également dans 1/3 des photographies contenant des hommes. Les auteurs ont donc conclu que la stratégie employée par les singes pour

catégoriser les photographies relevait plutôt d'une prise en compte de dimensions perceptives, comme la présence de tâches rouges, que de la maîtrise du concept d' « homme ». Cette étude montre que le singe capucin est capable de former des catégories perceptives à partir de stimuli complexes (i.e., des photographies) après avoir suivi un entraînement adapté. Cette conclusion a été confirmée par l'étude d'autres espèces, et avec différents types de stimuli (babouin : Dépy et al., 1997 ; Vauclair & Fagot, 1996 ; macaque : Yoshikubo, 1985).

Cependant, certains auteurs ont souligné l'importance de distinguer la capacité à catégoriser de la capacité à généraliser une réponse face à un stimulus (Lea, 1984 ; Thompson, 1995 ; Wasserman, Kiedinger, & Bhatt, 1988 ; Zayan & Vauclair, 1998). Selon ces auteurs, pour conclure sur l'existence de capacités de catégorisation, il convient de vérifier que la capacité à discriminer des objets appartenant à des catégories différentes se double d'une capacité à discriminer les membres d'une même catégorie.

Vauclair et Fagot (1996) se sont intéressés à ces aspects de la catégorisation chez le babouin. Ces auteurs ont entraîné des singes à distinguer la lettre « B » du chiffre « 3 » dans une tâche de discrimination à choix forcé comprenant deux clés de réponse. Les deux catégories de stimuli (i.e., « B » et « 3 ») comprenaient des caractères écrits avec des typographies variées. Après une phase d'apprentissage nécessitant plus d'un millier d'essais, les auteurs ont procédé à une phase de transfert dans laquelle les babouins ont été capables de généraliser leur apprentissage à des stimuli nouveaux exprimés par de nouvelles typographies. Les auteurs ont ensuite testé la capacité des singes à distinguer les différents membres d'une même catégorie (i.e., exprimés par des typographies différentes). Dans une deuxième expérience, les mêmes sujets ont donc été testés dans une tâche d'appariement à un modèle ou « matching-to-sample », dans laquelle un stimulus modèle appartenant à la catégorie « B » ou « 3 » était présenté à l'animal. Après la présentation de ce modèle (e.g., B), deux stimuli étaient affichés à l'écran ; l'un étant identique au modèle (e.g., B) et le second étant un autre

exemplaire de la même catégorie (e.g., *B*). Le singe devait alors sélectionner le stimulus choix qui était identique au modèle (e.g., *B*). Cette phase de test était présentée aux singes après qu'ils aient suivi un entraînement dans une tâche d'appariement à un modèle mettant en jeu des formes géométriques aléatoires. La performance des babouins dans cette phase de test, de l'ordre de 70%, démontre leur capacité à discriminer les différents membres d'une même catégorie. Cette étude constitue un argument supplémentaire pour conclure positivement sur l'existence des capacités de catégorisation perceptive chez les primates non humains

Certains auteurs (Dépy et al., 1997 ; Jitsumori, 1994) se sont par ailleurs intéressés à la façon dont les catégories perceptives sont représentées chez les primates non humains, et en particulier à l'effet de prototype décrit chez l'homme par Rosch (Rosch & Mervis, 1975). Ces études mettant en jeu des catégories de stimuli virtuels produits par la combinaison de plusieurs dimensions perceptives suggèrent que l'organisation de catégories perceptives formées à partir de stimuli artificiels n'est pas nécessairement centrée autour d'un prototype. Cependant, ces travaux montrent que les primates non humains sont capables de former des catégories de stimuli en combinant plusieurs indices ou dimensions perceptives (e.g., trois dimensions dans l'étude de Dépy et al., 1997).

Certains auteurs ont proposé que cette catégorisation multidimensionnelle implique une pondération des différentes informations perceptives qui serait fonction de leur saillance (Lea & Ryan, 1983). Selon la théorie des caractéristiques (« feature theory », Lea & Ryan, 1983), apprendre une catégorie « d'objets X » consisterait à attribuer une pondération à chaque dimension perceptive exprimée par les objets de cette catégorie. Dans un cadre expérimental, la pertinence d'une dimension serait déterminée par la contingence de son renforcement lors de l'entraînement, c'est-à-dire les modalités de distribution de la récompense, ainsi que par sa probabilité d'apparition.

4. CATEGORISATION CONCEPTUELLE

Les catégories conceptuelles peuvent faire référence à diverses notions, plus ou moins abstraites. Selon Herrnstein (1990), les catégories conceptuelles sont définies par deux critères. Premièrement, elles regroupent des éléments qui ne présentent pas de ressemblances perceptives mais qui partagent des propriétés abstraites, fonctionnelles (catégories fonctionnelles, comme le concept « d'objets alimentaires ») ou relationnelles (catégories relationnelles, comme le concept « d'identité » entre deux objets). Deuxièmement, selon Herrnstein (1990), les catégories conceptuelles doivent permettre une généralisation aux nouveaux exemplaires de la même classe.

4.1. Concepts fonctionnels

Plusieurs études ont porté sur l'évaluation des capacités de catégorisation conceptuelle des primates non humains. Cependant, comme nous l'avons vu dans la section précédente, certaines d'entre elles ont finalement mis en évidence la capacité des singes à former des catégories perceptives plutôt qu'à utiliser des concepts (D'Amato & Van Sant, 1988).

Les premières études permettant de conclure sur l'existence de concepts chez les primates non humains ont été conduites chez des chimpanzés entraînés au langage. Préalablement à l'expérience, ces chimpanzés avaient appris à associer des objets à des pictogrammes (Savage-Rumbaugh, Rumbaugh, Smith, & Lawson, 1980) ou à des gestes (Gardner & Gardner, 1984). Dans ces études, les chimpanzés apprenaient dans un premier temps à classer des objets réels en deux catégories fonctionnelles (e.g. « nourriture » et « outils »). Ils ont ensuite été testés avec de nouveaux objets et ont rapidement su les classer correctement dans les catégories imparties. Des résultats similaires ont également été obtenus dans une tâche de classement spontané d'objets chez un autre chimpanzé entraîné au langage

(Matsuzawa, 1990). Si des chimpanzés entraînés au langage sont capables de former des catégories conceptuelles, qu'en est-il des espèces de singes plus éloignés de l'homme et naïfs de tout entraînement linguistique ?

Quelques études ont tenté de répondre à cette question. Par exemple, Bovet et Vauclair (1998) ont entraîné des babouins à discriminer deux catégories d'objets (e.g., « objet alimentaire » vs. « objet non-alimentaire ») à l'aide d'objets réels. Dans cette expérience, un objet était présenté au babouin. Si cet objet était un aliment, le babouin devait tirer sur une corde située à sa droite. Par contre si l'objet n'était pas un objet alimentaire, il devait tirer sur la corde située à sa gauche. Après un apprentissage ayant nécessité plusieurs centaines d'essais, les auteurs ont conduit une phase test avec de nouveaux objets. Dans cette phase, les babouins ont correctement affecté les nouveaux objets aux catégories « aliment » et « non-aliment » avec une moyenne de 93% de réponses correctes dès les premiers essais test.

Une autre étude conduite chez le babouin s'est intéressée à l'existence des concepts d' « humain » et de « babouin » chez cette espèce (Martin-Malivel & Fagot, 2001). Dans cette étude, une tâche de go/no-go était proposée aux singes qui devaient discriminer deux types de sons ; des interjections humaines (e.g., « allez », « descends ») *versus* des vocalisations de babouins. La procédure consistait à présenter brièvement une photographie d'humain ou de babouin avant la diffusion du son à identifier. Les résultats montrent que lorsque la photographie présentée (e.g., « humain » ou « babouin ») est congruente avec le son diffusé, le temps de réponse des sujets diminue par rapport aux essais précédés d'une photographie non congruente. Cette étude suggère que le babouin possède les concepts naturels d' « homme » et de « babouin » qui sont activés par la présentation de photographies permettant une détection plus rapide des sons diffusés.

Une autre étude, conduite chez des singes de diane en milieu naturel suggère que cette espèce possède également des concepts naturels pour ses prédateurs, tels que le concept de

« léopard » ou encore celui d'« aigle » (Zuberbühler et al., 1999). Ces dernières études montrent que quelques espèces de singes, même naïfs pour le langage, sont capables de former des catégories conceptuelles à partir d'objets naturels.

4.2. Concepts relationnels

Les catégories conceptuelles regroupent également les concepts dits relationnels. Ce type de concept fait référence à la capacité de juger des relations qui existent entre deux objets ou plus. La capacité à former et utiliser des concepts relationnels constitue un prérequis indispensable au raisonnement par analogie.

De nombreux concepts relationnels ont été étudiés chez les primates non-humains, basés par exemple sur des relations spatiales (e.g., dessus/dessous : Dépy, Fagot, & Vauclair, 1999), sur des relations de proportions (Thomas & Ingram, 1979), de symétrie (Delius & Nowak, 1982) ou encore des relations transitives (Boysen, Berntson, Shreyer, & Quigley, 1993 ; D'Amato & Colombo, 1988). Cependant, la majorité des travaux dans ce domaine ont porté sur l'étude du concept d'identité considéré par James (1890, p. 459) comme « le pilier de base de la pensée humaine ». Plusieurs types de tâches ont été utilisés.

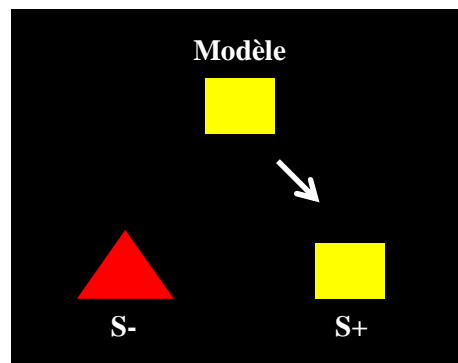
Certains auteurs se sont par exemple intéressés à la capacité des singes à discriminer spontanément des relations d'identité et de différence exprimées par des paires d'objets, en leur donnant successivement deux paires d'objets et en regardant le temps de manipulation de la seconde paire selon que celle-ci soit du même type ou non que la précédente (Oden, Thompson, & Premack, 1990 ; Thompson et al., 2000 ; Thompson & Oden, 1995). D'après le principe d'habituation/déshabituation, si les singes discriminent les relations d'identité et de différence, ce temps de manipulation devrait être plus important lorsque la seconde paire exprime une relation différente de la première paire.

Thompson a conduit ce genre d'expérience chez différentes espèces de singes et les résultats suggèrent que seuls les chimpanzés discriminent spontanément des relations d'identité et de différence (Oden et al., 1990), contrairement aux macaques (Thompson & Oden, 1995) et aux capucins (Thompson et al., 2000). Ce résultat peut être dû à une réelle différence dans la capacité de ces espèces à traiter certaines informations de l'environnement. Cependant, il peut également être expliqué par une différence dans l'histoire individuelle des sujets testés, liée par exemple à la variété des objets qu'ils ont eu l'occasion de manipuler dans leur vie. Afin de contrôler au moins partiellement l'effet de l'histoire individuelle des sujets, de nombreuses études portant sur le concept d'identité relationnelle ont été conduites à l'aide de tâches mettant en jeu une phase d'entraînement suivie d'une phase de test. Les deux types de tâches classiquement employées sont les tâches d'appariement à un modèle (matching-to-sample ou MTS, Figure 17.A) et les tâches de discrimination de relations (Figure 17.B).

La tâche de MTS a notamment été employée par Oden, Thompson et Premack (1988) pour étudier le concept d'identité chez des chimpanzés. Dans cette tâche, un objet, appelé « modèle », était présenté à l'animal qui devait le saisir et le mettre dans une boîte. Deux objets de comparaison étaient ensuite présentés, l'un étant identique au modèle et l'autre étant différent. L'animal devait saisir l'objet qui était identique au modèle et le placer dans la même boîte que le modèle. Les auteurs ont entraîné les chimpanzés dans cette tâche avec seulement une paire d'objets (e.g., un cadenas et une tasse) jusqu'à ce qu'ils atteignent un certain critère de réussite. Après un entraînement ayant nécessité plusieurs centaines d'essais, les chimpanzés ont été testés avec de nouveaux objets. Les auteurs ont alors observé un transfert immédiat des capacités d'appariement avec de nouveaux objets. Des données similaires ont été obtenues dans une autre étude chez le chimpanzé avec le même type de tâche (Nissen, Blum, & Blum, 1948). D'autres études conduites chez les singes non anthropoïdes montrent

que des capucins (D'Amato & Colombo, 1985 ; D'Amato, Salmon, & Colombo, 1985), des macaques (Overman Jr & Doty, 1980) et des babouins (Vauclair & Fagot, 1996) sont également capables de résoudre des tâches de MTS et de transférer ces apprentissages à de nouveaux stimuli, après avoir suivi un entraînement adapté. Ces quelques études suggèrent que différentes espèces de primates non humains sont capables d'utiliser le concept d'identité.

A. Tâche d'appariement à un modèle



B. Tâche de discrimination de relations

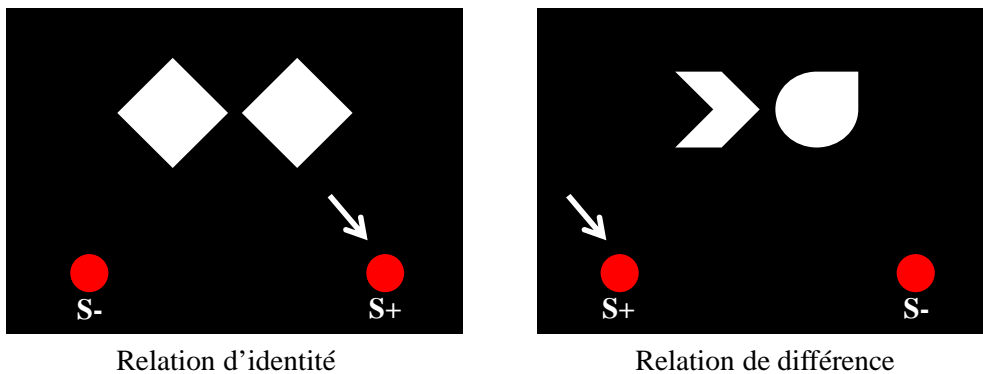


Figure 17. Illustration des tâches employées pour étudier le concept d'identité chez les primates non humains. Ces tâches peuvent être (ou non) informatisées et peuvent mettre en jeu des formes ou des objets réels. A. Tâche d'appariement à un modèle dans laquelle l'animal doit choisir parmi deux cibles celle qui est identique au modèle affiché. B. Tâche de discrimination de relations dans laquelle l'animal doit sélectionner la clé de réponse de droite lorsque le stimulus affiché est une paire identique et la clé de gauche dans le cas contraire.

D'autres études se sont intéressées au concept d'identité en utilisant des tâches de discrimination de relations (macaque : Bhatt & Wright, 1992 ; babouin : Bovet & Vauclair,

2001 ; Katz, Wright, & Bachevalier, 2002 ; capucin : Wright, Rivera, Katz, & Bachevalier, 2003 ; Wright, Santiago, & Sands, 1984). Dans ce type de tâche, à chaque essai, une paire composée de deux stimuli identiques ou différents est présentée à l'animal qui doit juger si cette paire représente une relation d'identité ou de différence, et sélectionner la clé de réponse associée à ce type de relation (Figure 17.B). Comme pour les procédures de MTS, les animaux sont d'abord entraînés à répondre à la consigne avec un lot de stimuli d'entraînement jusqu'à ce qu'ils atteignent un critère de réussite. Ils sont ensuite testés avec de nouveaux stimuli. Le concept d'identité est considéré comme acquis si la performance aux premiers essais avec de nouveaux stimuli ne diffère pas significativement de la performance atteinte au terme de l'entraînement.

Katz et al. (2002) ont proposé ce type de tâche à des macaques en utilisant des paires de photographies pour entraîner et tester leurs singes. Les singes étaient capables de discriminer des paires de photographies identiques et différentes à condition que le nombre de photographies utilisées dans l'entraînement soit suffisamment important. En effet, les macaques devaient être entraînés avec plus de huit photographies différentes pour être capables de généraliser leur apprentissage à de nouvelles photographies. De plus, lorsque la taille de ce lot de photographies augmentait, la longueur de l'entraînement diminuait. Des résultats similaires ont été trouvés chez le capucin avec le même type de tâche (Wright et al., 2003). Ces études suggèrent que des espèces de singes non-anthroïdes sont capables, comme les chimpanzés, de maîtriser le concept d'identité à condition d'avoir suivi un entraînement adéquat.

Cependant, selon certains auteurs, les résultats obtenus dans les tâches de MTS et de discrimination de relations peuvent être interprétés différemment (Fagot, Wasserman, & Young, 2004). En effet, les performances des singes dans ses tâches peuvent être expliquées par l'emploi de stratégies alternatives qui ne font pas appel à l'utilisation du concept abstrait

d'identité. Par exemple, dans l'étude d'Oden, Thompson et Premack (1988), les chimpanzés peuvent avoir répondu selon la familiarité relative des objets ; en saisissant l'objet qui était le plus familier des deux, dans la mesure où il venait juste d'être vu. Par ailleurs, dans l'étude de Katz et al. (2002), les macaques peuvent avoir répondu en considérant l'homogénéité perceptive des affichages ; une paire de photographies identiques étant plus homogène qu'une paire de photographies différentes. Ces éléments montrent la difficulté à identifier les stratégies cognitives réellement mises en œuvre par les singes pour résoudre ce type de tâches, et en particulier la difficulté à dissocier l'implication des processus perceptifs et des processus conceptuels dans ces stratégies.

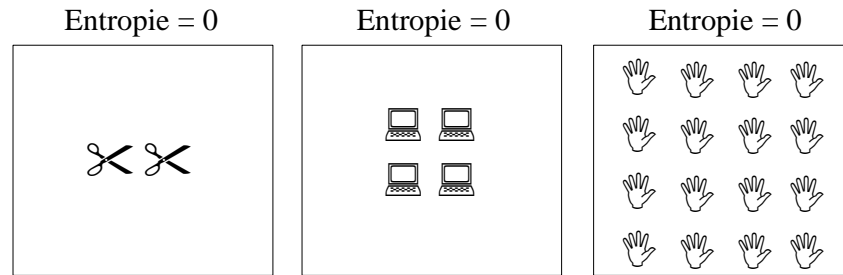
Face à ces éléments, des auteurs ont tenté de caractériser l'influence d'indices perceptifs comme l'homogénéité des affichages (i.e., l'entropie) dans des tâches de discrimination de relations sur écran, d'abord chez le pigeon (Young & Wasserman, 1997) et ensuite chez le babouin (Wasserman, Fagot, & Young, 2001). La notion d'entropie est issue de la théorie de l'information (Shannon & Weaver, 1949) et fait référence à un indice de variabilité lié à la quantité d'informations que contient un stimulus. La valeur d'entropie d'un stimulus correspond à l'équation suivante :

$$H(A) = - \sum_{a \in A} p_a \log_2 p_a$$

où $H(A)$ est l'entropie d'une variable catégorielle A , a est une catégorie de A et p_a est la proportion des valeurs observées pour chaque catégorie. Dans le cas d'une paire d'objets identiques, il n'y a qu'une seule catégorie avec une probabilité de 1. L'entropie exprimée par cette relation est donc de 0, puisque $\log_2(1) = 0$ (cf. Figure 18).

Pour mesurer l'effet de l'entropie sur le traitement des relations d'identité et de différence chez les animaux, on peut donc augmenter le nombre d'items qui constituent ces relations et manipuler la variabilité qu'ils expriment pour voir si cela influence leur capacité à discriminer les deux catégories de stimuli (cf. Figure 18).

Relation d'identité : Entropie = 0



Relation de différence : Entropie > 0

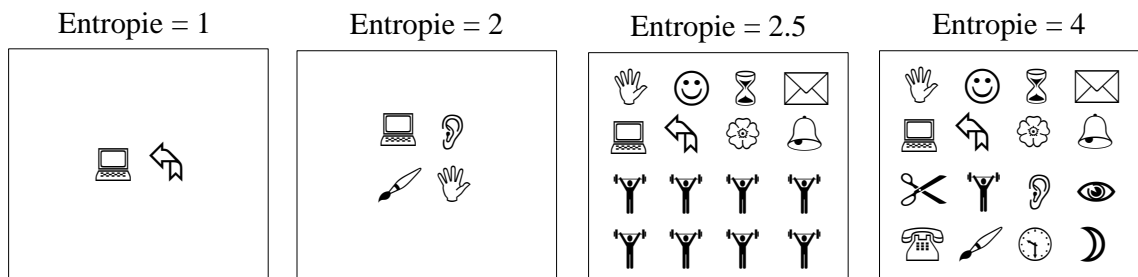


Figure 18. Illustration des variations d'entropie selon le nombre d'items utilisés pour exprimer une relation.

Wasserman et al. (2001) ont ainsi manipulé l'entropie de relations d'identité et de différence présentées à des babouins dans une tâche de discrimination mettant en jeu des affichages comportant, non plus deux, mais 16 items (e.g., des formes blanches). Lorsque les 16 items d'un affichage étaient identiques, ils exprimaient une relation d'identité ainsi qu'une homogénéité maximale (i.e., une entropie égale à 0). A l'inverse, lorsque les 16 items étaient différents, l'affichage exprimait une relation de différence et présentait une homogénéité minimale (i.e., une entropie égale à 4). Lors de l'entraînement, les babouins devaient répondre à ces deux types d'affichages (i.e., entropie=0 et entropie=4) en sélectionnant la clé de réponse correspondante, parmi deux. Puis, dans la phase de transfert, l'entropie des affichages était manipulée ; c'est-à-dire que les relations de différence étaient exprimées par des affichages plus ou moins homogènes (e.g., quatre items différents répétés chacun quatre fois,

avec une entropie égale à 2). Les résultats montrent que les réponses des babouins à ce type d'affichages dépendent de leur entropie plutôt que des relations absolues d'identité ou de différence qu'ils expriment. L'influence de cet indice perceptif a été confirmée par une autre étude montrant qu'une réduction du nombre d'items des affichages, de 16 items vers deux items, entraînait une chute des performances des babouins (Wasserman, Young, & Fagot, 2001). Dans cette étude, les affichages comprenant deux items induisaient une faible différence d'entropie entre les relations d'identité (entropie=0) et de différence (entropie=1) et les babouins ne parvenaient pas à les discriminer. Si ces études montrent l'importance des processus perceptifs dans la stratégie employée par les babouins dans ce type de tâche, des travaux effectués avec un autre matériel suggèrent que les singes sont également capables d'adopter d'autres stratégies lorsque les variations d'entropie ne sont pas des indices pertinents.

Par exemple, Bovet et Vauclair (2001) ont montré que des babouins pouvaient discriminer des relations d'identité et de différence (e.g. deux objets identiques *versus* deux objets différents) lorsqu'elles étaient exprimées non plus par des paires de symboles mais par des paires d'objets réels. Ils ont également entraîné des babouins à discriminer des relations d'identité et de différence de fonctions exprimées cette fois-ci par des paires d'objets appartenant aux catégories « aliment » ou « non-aliment » (Figure 19). Dans cette expérience, les singes ont dans un premier temps appris à juger par exemple les paires « pomme-banane » ou « cadenas-tasse » comme appartenant à la classe des relations d'identité, et la paire « pomme-cadenas » comme une relation de différence. Après plusieurs centaines d'essais d'entraînement avec des objets variés, les singes ont été capables de transférer ces apprentissages à des objets nouveaux (Bovet & Vauclair, 2001).

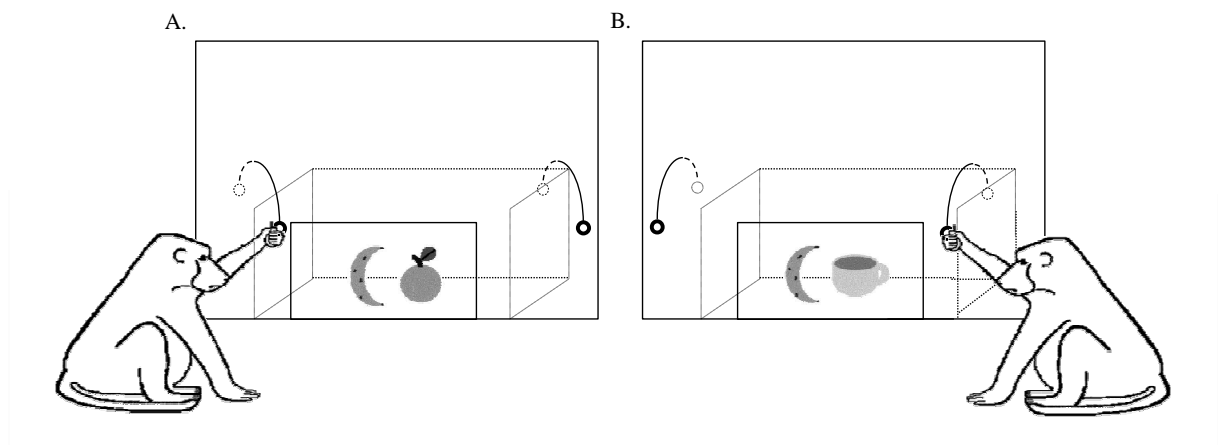


Figure 19. Illustration du protocole expérimental de Bovet et Vauclair (2001). A. La paire d'objets exprime une relation d'identité fonctionnelle (i.e., aliments) donc le babouin doit tirer sur la corde de gauche. B. Les objets de la paire appartiennent à des catégories fonctionnelles différentes (i.e., aliment et non-aliment) donc le babouin doit tirer sur la corde de droite.

Ces résultats montrent que les singes peuvent, selon le contexte, utiliser d'autres indices que l'homogénéité perceptive (i.e., l'entropie) pour résoudre des tâches de discrimination de relations. En l'occurrence, dans cette dernière expérience, les babouins ont dû considérer la dimension fonctionnelle des objets pour juger de l'identité relationnelle des paires proposées.

Tous ces éléments suggèrent que plusieurs espèces de primates non humains sont capables, avec un entraînement préalable, de maîtriser des concepts relationnels, comme celui d'identité. Cependant, la nature, perceptive ou abstraite, des processus impliqués dans ces tâches cognitives semble dépendre de plusieurs facteurs, comme par exemple le contexte des études et le matériel utilisé. Si certains singes peuvent percevoir et/ou concevoir des relations entre objets, sont-ils pour autant capables d'établir des relations de second ordre en effectuant des jugements de similarité entre des relations ?

Chapitre II

Raisonnement par analogie
chez les primates non humains

1. RAISONNEMENT PAR ANALOGIE CHEZ LES GRANDS SINGES

A la fin du XX^{ème} siècle, le raisonnement par analogie était considéré comme une caractéristique cognitive propre à l'espèce humaine. Depuis, des travaux conduits chez les grands singes et chez les singes non anthropoïdes remettent en question cette spécificité humaine. Gillian, Premack et Woodruff (1981) ont été les premiers à s'intéresser aux capacités d'analogies d'une femelle chimpanzé préalablement entraînée à utiliser un « langage » de symboles (Premack, 1976). Cette femelle prénommée Sarah connaissait la signification de plusieurs dizaines de symboles en plastique lorsque Gillian et al. (1981) lui ont proposé de résoudre une tâche de type $A:B :: C:D$, classiquement utilisée chez l'enfant (cf. Partie I - Chapitre II).

Dans cette étude, trois éléments (i.e., A, B et C) répartis sur un plateau dans une matrice 2 x 2 ont été présentés à Sarah, comme illustré dans la figure 20.A. Deux de ces formes constituaient la paire *source* A:B et Sarah devait choisir parmi un lot d'items-choix, l'item « D » qui s'associait à « C » de la même façon que « B » s'associait à « A ». Sarah a été rapidement capable de résoudre ce type d'analogie avec des formes géométriques variées en tenant compte simultanément des relations de taille, de couleur et de texture qu'elles entretenaient. De surcroît, cette femelle chimpanzé s'est avérée capable d'effectuer cette tâche avec des objets domestiques qu'elle connaissait en tenant compte de leurs relations fonctionnelles (e.g., « A : un cadenas, B : une clé :: C : un pot de peinture, D : un outil pour ouvrir le pot »). Dans une seconde expérience, illustrée en figure 20.B, elle a même été capable de juger si deux relations « A :B » et « C :D » étaient identiques ou différentes en posant entre ces deux relations le symbole représentant l'identité ou la différence (Gillian et al., 1981).

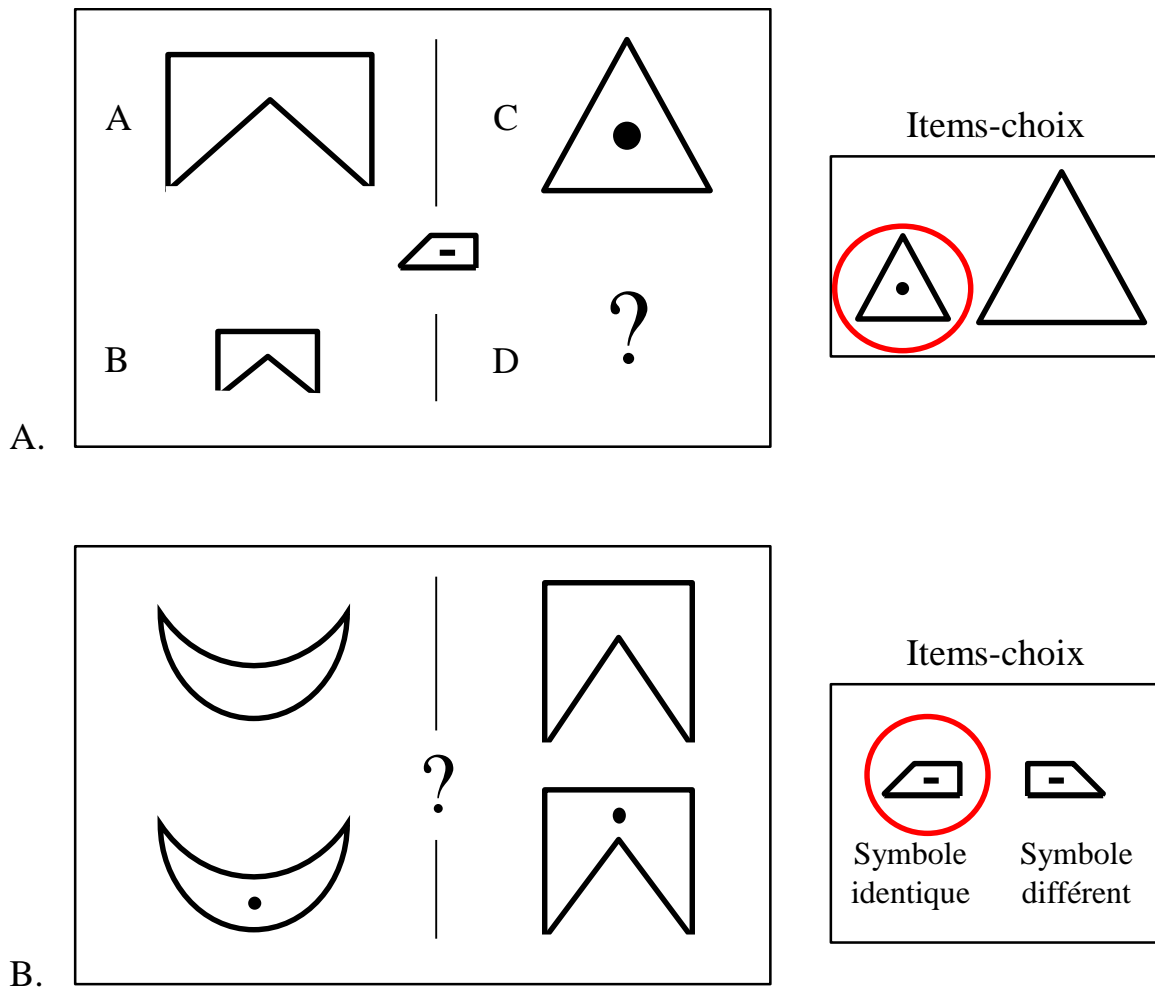


Figure 20. Illustration des expériences conduites par Gillan et al. (1981). L'expérimentateur pose des formes sur un plateau, les arrange d'une certaine manière et le chimpanzé doit compléter cet arrangement avec le symbole de son choix. Il y a deux types d'expérience ; dans l'expérience décrite en A., le chimpanzé doit choisir parmi les items-choix, l'élément « D » qui correspond à « C » comme l'élément « B » correspond à « A ». Dans l'expérience décrite en B., le chimpanzé doit placer le symbole « identique » au centre du plateau si les relations du côté gauche et du côté droit sont les mêmes. A l'inverse, il doit y placer le symbole « différent » si les deux relations ne sont pas les mêmes. Les réponses correctes pour les essais illustrés sont entourées en rouge.

D'après Premack (1983a, 1983b), l'excellente performance de Sarah dans ces différentes tâches d'analogie s'explique par son entraînement préalable au « langage » qui serait selon lui l'élément indispensable à l'émergence du raisonnement par analogie.

L'hypothèse de Premack (1983a, 1983b) sur la nécessité d'un entraînement au langage pour l'émergence d'un raisonnement analogique chez le primate non humain a par la suite été remise en cause par Thompson, Oden et Boysen (1997). Ces auteurs ont montré que des chimpanzés naïfs pour le langage mais entraînés à utiliser seulement deux symboles ; l'un pour labelliser les relations d'identité et l'autre pour labelliser les relations de différence, étaient capables de résoudre une tâche d'appariement relationnel au même niveau de performance que Sarah. Dans ce type de tâche, une paire d'objets identiques ou différents, appelée paire modèle, est présentée au singe (Figure 21). Ensuite, deux paires d'objets lui sont proposées, l'une exprimant l'identité et l'autre la différence, et le singe doit sélectionner la paire qui exprime la même relation que la paire modèle.

D'après Thompson et al. (1997), la performance des chimpanzés dans cette tâche s'explique par l'apprentissage préalable de symboles représentant l'identité et la différence. Selon eux, la connaissance de symboles aurait fourni aux chimpanzés un outil cognitif leur permettant de labelliser les relations pour ensuite pouvoir les appairer. Cette étude suggère donc que le langage ne serait un prérequis du raisonnement par analogie que dans la mesure où il confère un moyen de symboliser/labelliser des relations.

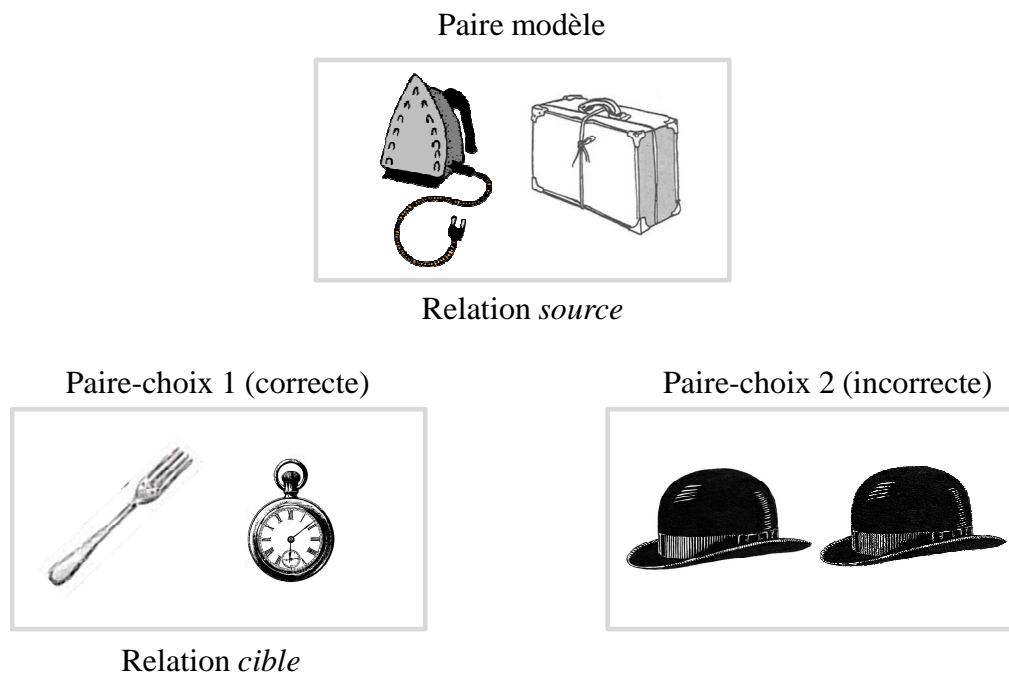


Figure 21. Un exemple de tâche d'appariement relationnel. La paire modèle est constituée de deux items différents (ou identiques) et exprime donc une relation de différence (ou d'identité). Une paire-choix exprime la même relation que la paire modèle (ici, la paire choix 1) que l'animal doit sélectionner pour être récompensé et l'autre paire-choix exprime la relation alternative.

Cependant, des travaux plus récents ont montré que certains grands singes (e.g. chimpanzé, gorille, orang-outang) étaient capables d'exprimer des capacités d'analogie sans apprentissage préalable de symboles pour labelliser les relations (Flemming & Kennedy, 2011 ; Haun & Call, 2009 ; Hribar, Haun, & Call, 2011 ; Vonk, 2003). Par exemple, Vonk (2003) a montré que l'orang-outang et le gorille étaient capables de résoudre des tâches d'appariements relationnels mettant en jeu des paires de formes colorées. D'autres auteurs ont montré que ces espèces ainsi que le chimpanzé pouvaient également résoudre des tâches d'analogie spatiale (Haun & Call, 2009 ; Hribar et al., 2011 ; Figure 22). Dans ces études, deux plateaux comportant trois gobelets étaient utilisés ; l'un correspondant au plateau de « cache » était installé en face de l'expérimentateur et l'autre correspondant au plateau de « choix » était

installé devant le singe. L'expérimentateur plaçait une récompense dans l'un des trois gobelets du plateau de « cache ». Le singe devait alors désigner sur le plateau de « choix » le gobelet qui avait la même position relative que le gobelet où était cachée la récompense ; par exemple, si le gobelet de droite du plateau de « cache » contenait la récompense, le singe devait pointer vers le gobelet de droite du plateau de « choix ».

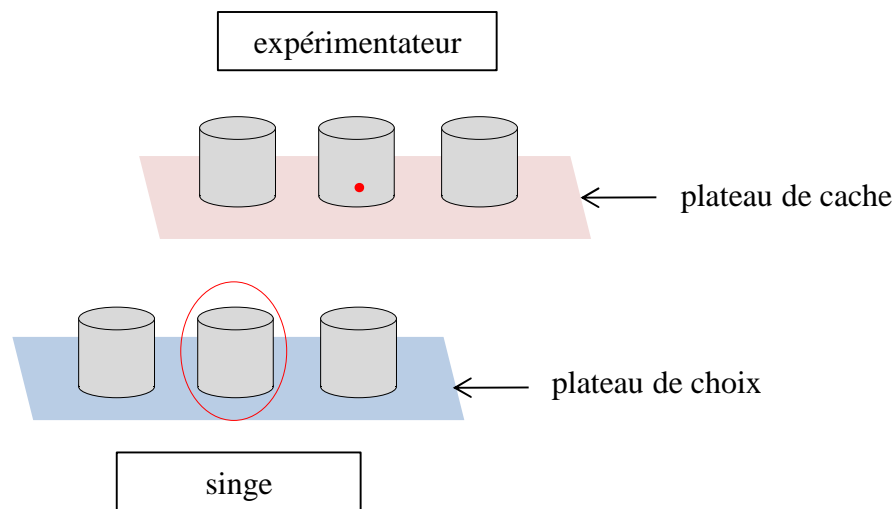


Figure 22. Illustration d'un essai tiré de Hribar et al. (2011). Au début de l'essai, l'expérimentateur cache devant le singe un appât dans un des trois gobelets du plateau de « cache » (ici, le gobelet central). Le singe doit ensuite pointer en direction du gobelet situé sur plateau de « choix » qui entretient les mêmes relations spatiales que le gobelet appâté (ici, la position centrale).

Dans une autre étude conduite chez le chimpanzé, Flemming et Kennedy (2011) ont utilisé le même type de dispositif, mais avec des gobelets de tailles différentes. Les singes se sont avérés capables de raisonner, non plus sur la position relative des gobelets, mais sur leur taille relative. Ces quelques études suggèrent que les grands singes sont capables de raisonner par analogie sur certains types de relations (e.g. relations spatiales et relations perceptives) sans avoir suivi un entraînement préalable au langage ou à l'utilisation de symboles.

Les grands singes sont les espèces les plus proches de l'homme d'un point de vue phylogénétique et sont capables d'effectuer des analogies mettant en jeu différents types de relations, selon qu'ils ont suivi, ou non, un entraînement au langage. Dans une perspective évolutive, on peut se demander dans quelle mesure des espèces de singes plus éloignées de l'homme en sont également capables.

2. RAISONNEMENT PAR ANALOGIE CHEZ LES SINGES NON ANTHROPOÏDES

Jusqu'au XXI^{ème} siècle aucun exemple d'analogie n'avait été rapporté chez des espèces de singes non anthropoïdes conduisant certains auteurs à évoquer l'existence d'une différence cognitive fondamentale entre les primates anthropoïdes, à savoir l'homme et les grands singes et les primates non anthropoïdes (Oden, Thompson, & Premack, 2001 ; Thompson & Oden, 1995, 2000 ; Thompson et al., 1997). Cependant, quelques récents travaux ont remis cette thèse en cause.

La première étude suggérant l'existence de capacités d'analogie chez une espèce de singe non anthropoïde a été conduite chez le babouin à l'aide d'une tâche informatisée qui mettait en jeu des appariements de relations spatiales de type dessus/dessous (Dépy et al., 1999 ; Figure 23).

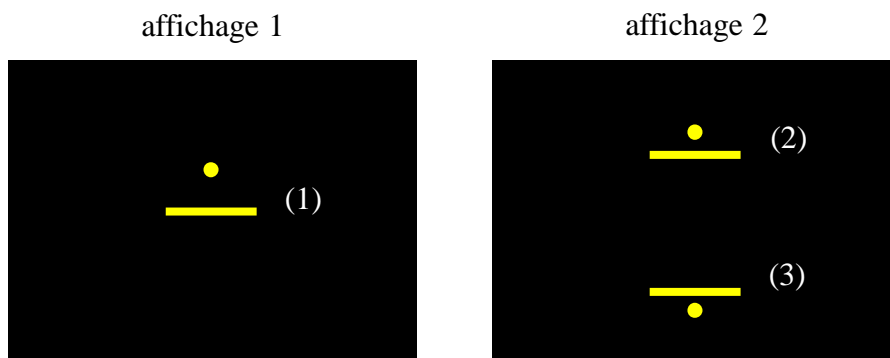


Figure 23. Représentation de la tâche d'appariement de relations spatiales proposée par Dépy et al. (1999). Cette tâche consiste à afficher séquentiellement l'écran 1, contenant le modèle (1), puis l'écran 2 contenant les relations-choix (2 et 3). La relation à choisir (2) exprime la même relation (ici, au-dessus de) que le modèle (1) mais avec une distance différente entre la barre de référence et le point. La relation à éviter (3) exprime l'inverse du modèle (1).

Après plusieurs centaines d'essais d'entraînement, les babouins ont été capables d'apparier correctement ces relations spatiales et de généraliser leurs apprentissages à de nouveaux stimuli. Ces résultats ont été répliqués chez le capucin avec un paradigme expérimental similaire (Spinozzi, Lubrano, & Truppa, 2004). Cependant, ces premières études sur l'analogie chez des singes non anthropoïdes ont fait l'objet d'une critique par Zentall, Wasserman, Lazareva, Thompson et Rattermann (2008). Ces auteurs soulignent que dans la tâche utilisée par Dépy et al. (1999) et Spinozzi et al. (2004), la relation-modèle et les deux relations-choix partagent toutes trois des similarités physiques (e.g., soit une barre de référence dans Spinozzi et al., 2004 ; soit une barre de référence et un point dans Dépy et al., 1999). Selon ces auteurs, la présence d'éléments identiques entre le modèle et les choix réduirait statistiquement l'espace de recherche du singe (Clark & Thornton, 1997) et l'aiderait à focaliser son attention sur la seule source de variabilité des stimuli, à savoir leurs caractéristiques relationnelles (Zentall et al., 2008). D'après ces auteurs, ces deux études ne permettent donc pas de conclure sur les capacités d'analogies des singes non anthropoïdes.

Une autre étude conduite par Kennedy et Fragaszy (2008) suggère que le capucin pourrait raisonner par analogie sur des relations de taille. En utilisant le même paradigme expérimental que Flemming et Kennedy (2011) avec des gobelets de tailles différentes, ces auteurs ont montré qu'après un entraînement de quelques centaines d'essais, un capucin (*Cebus apella*) sur les quatre testés a été capable de résoudre correctement la tâche. Cependant ces résultats obtenus chez un seul sujet n'ont pas été répliqués, ni chez le capucin, ni chez une autre espèce.

La tâche qui a été la plus utilisée pour étudier les capacités d'analogie des singes non anthropoïdes est la tâche d'appariement relationnel mettant en jeu des relations d'identité et de différence (babouin : Fagot & Parron, 2010 ; Fagot & Thompson, 2011 ; Fagot, Wasserman, & Young, 2001 ; macaque : Flemming, Beran, Thompson, Kleider, & Washburn,

2008 ; Flemming, Beran, & Washburn, 2007 ; capucin : Truppa, Mortari, Garofoli, Privitera, & Visalberghi, 2011). Ce paradigme a d'abord été utilisé chez le babouin par Fagot et al. (2001) avec des relations d'identité et de différence exprimées par des tableaux de 16 objets (Figure 24).

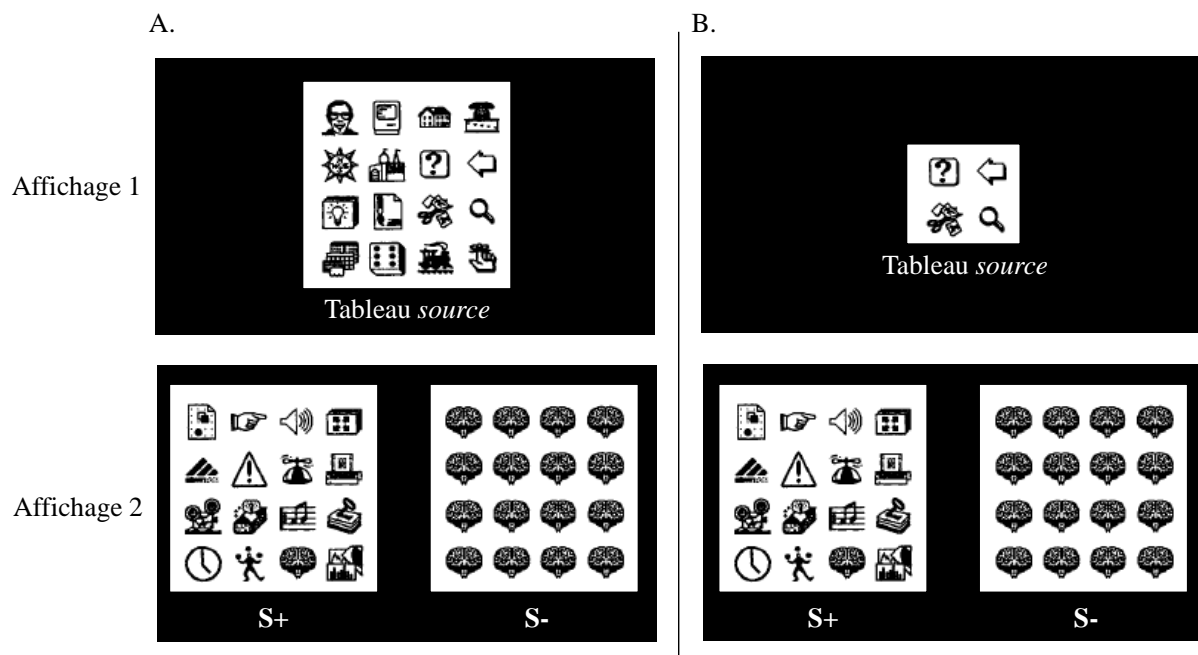


Figure 24. Représentation de la tâche d'appariement relationnel proposée par Fagot et al. (2001). A. Illustration de l'expérience 1 dans laquelle le singe doit appairer un tableau source de 16 items avec le tableau cible de 16 items qui exprime la même relation. B. Illustration de l'expérience 2 dans laquelle le singe doit appairer un tableau source de moins de 16 items (12, 8, 4 ou 2 items) avec le tableau cible de 16 items qui exprime la même relation.

Dans une première expérience, les auteurs ont montré que les babouins pouvaient apprendre à appairer ce type de relations et à généraliser leurs apprentissages à de nouveaux stimuli constitués de 16 objets après un entraînement de plusieurs milliers d'essais. En revanche, dans une seconde expérience, Fagot et al. (2001) ont diminué le nombre d'items utilisés pour former les relations *source* (i.e., 16 items → 12 items → 8 items → 4 items → 2 items) en maintenant constant le nombre d'items utilisés pour former les relations *cible* (i.e., 16 items ; cf. figure 24.B). Les résultats montrent que les babouins ne réussissent plus la tâche

lorsque la relation *source* ne contient plus que deux objets. En revanche, malgré les variations d'entropie provoquées par la manipulation du nombre d'items de la relation *source*, les babouins parvenaient à résoudre correctement la tâche avec des tableaux *source* constitués de 12, 8, voire 4 items. Ces résultats montrent que l'appariement relationnel chez le babouin peut se faire malgré une variation d'entropie entre la *source* et la *cible*. Cependant, ils suggèrent que les singes utilisent toutefois l'entropie comme indice pour discriminer les tableaux « identique » et les tableaux « différent » puisque leur performance diminue lorsque la relation *source* est exprimée par une paire d'objets. Ces résultats ne permettent donc pas de conclure quant aux capacités d'analogie du babouin. D'autres auteurs ont alors rappelé que pour étudier les capacités d'analogies des singes, il convenait d'utiliser la tâche d'appariement relationnel initialement décrite par Premack (1983b) mettant en jeu des relations d'identité et de différence exprimées par des paires d'objets (Flemming et al., 2007).

Des études récentes, utilisant des paires de formes ou de couleurs affichées sur des écrans tactiles, ont montré qu'au moins deux espèces de singes non anthropoïdes pouvaient apprendre à résoudre ce type de tâche et à généraliser ces apprentissages à de nouveaux stimuli ; le babouin (Fagot & Parron, 2010 ; Fagot & Thompson, 2011) et le capucin (Truppa et al., 2011). Dans l'étude de Fagot et Thompson (2011), après avoir été longuement entraînés (i.e. plus de 10 000 essais), les babouins parviennent à apparier des relations constituées par des paires de nouvelles formes jamais vues pendant l'entraînement. Dans une deuxième expérience, ils ont montré que ces singes pouvaient résister à une interférence perceptive introduite dans les essais-test selon la technique du « cross-mapping ». Plus précisément, dans ces essais, la paire-choix incorrecte contenait un objet qui était présent dans la paire modèle. Pour répondre correctement le babouin devait ignorer cette identité perceptive pour se focaliser sur la dimension relationnelle des stimuli (Figure 25).

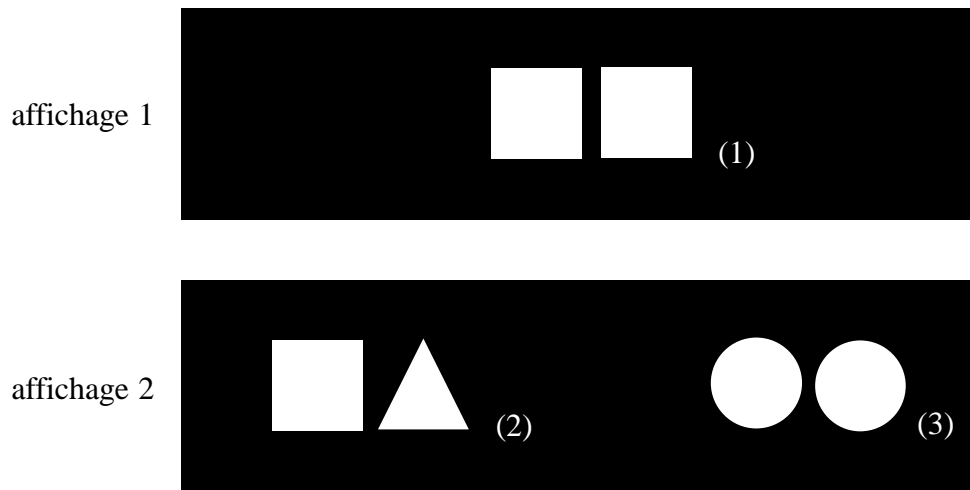


Figure 25. Représentation de la tâche d'appariement relationnel proposée par Fagot et Thompson (2011). Cette tâche consiste à afficher séquentiellement l'écran 1, contenant la paire modèle (1), puis l'écran 2 contenant les paires-choix (2 et 3). La paire à choisir (3) présente la même relation (ici une relation d'identité) que la paire modèle (1). La paire à éviter (2) partage un attribut (ici un carré) avec la paire modèle (1).

Parmi les 16 sujets testés dans cette étude, cinq ont atteint des performances supérieures à 80% dans cette tâche démontrant une aptitude à traiter prioritairement les informations relationnelles, et à négliger les informations non pertinentes liées aux attributs.

Cependant, si les résultats obtenus par Fagot et Thompson (2011) chez le babouin et par Truppa et al. (2011) chez le capucin suggèrent l'existence de capacités d'analogie chez ces espèces, certains auteurs remettent en question cette interprétation. En effet, selon Penn, Holyoak et Povinelli (2008), il existe une différence qualitative entre les processus cognitifs nécessaires pour résoudre ce type de tâche et ceux impliqués dans le raisonnement par analogie. Selon ces auteurs, cette différence vient du fait que la tâche d'appariement relationnel est basée sur des relations perceptives dans lesquelles les objets ont des rôles symétriques et indifférenciés, contrairement à une analogie de type $A : B :: C : D$ mettant par exemple en jeu des relations fonctionnelles. D'après ces auteurs, les singes pourraient employer dans la tâche d'appariement relationnel une stratégie consistant à traiter les paires d'objets comme des paquets d'informations en considérant uniquement leur homogénéité

visuelle (i.e., l'entropie) comme le proposait Fagot et al. (2001) avec les tableaux d'items. Les singes auraient alors tendance à appairer ces paquets plus ou moins homogènes, sans tenir compte des objets qui constituent ces paires, ni des relations d'identité ou de différence qu'ils entretiennent. Selon Penn et al. (2008) cette stratégie ne s'apparente donc en aucun cas au raisonnement par analogie, mais plutôt à un appariement simple d'objets laissant de nouveau place au débat sur les capacités d'analogies des singes non anthropoïdes.

RESUME - PARTIE II

Les primates non humains sont capables de catégoriser des objets sur la base de leurs ressemblances physiques et de leurs ressemblances fonctionnelles. Ils peuvent également apprendre à maîtriser certains concepts relationnels (e.g., la relation d'identité, la relation dessus/dessous) après avoir suivi un entraînement approprié. Par ailleurs, des capacités de raisonnement par analogie ont été mises en évidence chez un chimpanzé entraîné au langage capable de résoudre des tâches d'analogie mettant en jeu des relations perceptives et des relations fonctionnelles. D'autres études suggèrent que les chimpanzés non entraînés au langage seraient, quant à eux, capables de raisonner par analogie uniquement sur des relations perceptives (i.e., relations d'identité et de différence, relations spatiales, relations de taille). Concernant les singes non anthropoïdes, de récentes études mettant en jeu des tâches d'appariement relationnel de paires d'objets suggèrent qu'ils seraient également capables de raisonner par analogie sur des relations d'identité et de différence. Cependant la stratégie qu'ils emploient pour résoudre dans cette tâche reste inconnue, laissant ouvert le débat sur l'existence de capacités à raisonner par analogie chez ces espèces.

Problématique

Les primates humains et non humains ont en commun une capacité à détecter certaines similarités de l'environnement. Ils peuvent catégoriser des objets en tenant compte de leurs similarités perceptives ou encore fonctionnelles, et sont également capables de porter attention aux relations entre les objets qui les entourent. Cependant, un débat persiste quant à la capacité des primates non humains à raisonner par analogie.

La majorité des études dans ce domaine ont utilisé des tâches d'appariement relationnel et montré que plusieurs espèces de singes sont capables avec ce paradigme de mettre en correspondance des relations d'identité ou de différence (Fagot & Parron, 2010 ; Fagot & Thompson, 2011 ; Flemming et al., 2008; Thompson et al., 1997; Truppa et al., 2011 ; Vonk, 2003). Cependant, ces travaux ont donné lieu à des interprétations équivoques. En effet, selon certains auteurs, la tâche d'appariement relationnel pourrait être résolue en mettant simplement en correspondance la variabilité perceptive (i.e., l'entropie) des paires *source* et *cible*, sans faire appel au raisonnement par analogie (Penn et al., 2008). Pour ces auteurs, seuls les travaux de Premack (Gillan et al., 1981) avec un chimpanzé entraîné au langage, mettant en jeu une tâche d'analogie de type $A : B :: C : D$, fournissent un élément en faveur de l'existence de capacités d'analogie chez les primates non humains. Dans ce cadre, la question centrale de la continuité entre homme et primates non humains dans la capacité à raisonner par analogie reste à élucider. Ma thèse s'inscrit dans cette problématique générale et se décompose en trois objectifs principaux qui ont chacun fait l'objet d'expériences chez une espèce de singe non anthropoïde, le babouin.

Avant de m'intéresser aux capacités de raisonnement par analogie de cette espèce, le premier objectif de ma thèse est de déterminer les processus impliqués dans le traitement des relations chez le babouin et de comprendre comment ces processus se mettent en place. En effet, le traitement des relations, à la base du raisonnement par analogie chez l'homme, implique l'intégration de plusieurs niveaux d'informations relatives aux objets (i.e., niveau

perceptif) et aux relations (i.e., niveau conceptuel). Nous chercherons donc, en premier lieu, à vérifier l'existence de ce prérequis au raisonnement par analogie chez le babouin. En second lieu, nous utiliserons cette espèce de singe comme modèle pour comprendre les facteurs qui participent à la mise en place du traitement relationnel. Dans ce cadre, nous explorerons le rôle de l'expérience dans le développement de la perception des relations et nous demanderons plus précisément si le fait d'avoir expérimenté un grand nombre d'items illustrant une relation influence les processus de traitement qu'elle implique.

Le second objectif de ma thèse est de déterminer si la stratégie cognitive employée par le babouin pour résoudre une tâche d'appariement relationnel s'apparente au raisonnement par analogie. Plusieurs stratégies peuvent être envisagées, mais seule une stratégie faisant intervenir la prise en compte des objets qui constituent les paires et de leurs relations pourrait s'apparenter à du raisonnement par analogie. Cette question sera abordée en testant l'implication de la mémoire de travail dans la stratégie utilisée par les babouins pour résoudre cette tâche, afin de comprendre la nature et la complexité des traitements qu'elle implique.

Après avoir déterminé si la tâche d'appariement relationnel implique du raisonnement par analogie chez le babouin, le troisième objectif de ma thèse est de déterminer si ces animaux sont capables d'effectuer des analogies plus complexes après un simple apprentissage par essai-erreur. Nous testerons en particulier (1) leur capacité à traiter de manière flexible les informations relationnelles d'une paire *source* dont les objets sont liés par plusieurs relations, en fonction des propriétés des paires *cible* et (2) leur aptitude à appairer des relations d'identité et de différence exprimées par des dimensions différentes (e.g., appariement d'une relation d'identité de forme avec une relation d'identité de couleur).

Enfin, nous confronterons l'ensemble de nos résultats à la littérature pour essayer de mieux comprendre les divergences et continuités entre l'homme et les singes dans leur

capacité à raisonner par analogie, ainsi que les facteurs qui distinguent ou rapprochent leurs capacités cognitives respectives.

PARTIE III

VOLET EXPERIMENTAL



©Rachel Deville

Chapitre I

Matériel expérimental

1. SUJETS

Toutes les expériences effectuées dans le cadre de ma thèse ont été conduites à la station de Primatologie de Rousset sur Arc sur des babouins de Guinée (*Papio papio*) nés en captivité.

L'espèce *Papio papio* fait partie de la famille des cercopithécidés. Dans l'histoire évolutive des espèces, l'ancêtre commun à l'homme et au babouin *Papio papio* remonterait à 35 millions d'années environ selon Ciochon et Fleagle (1987).

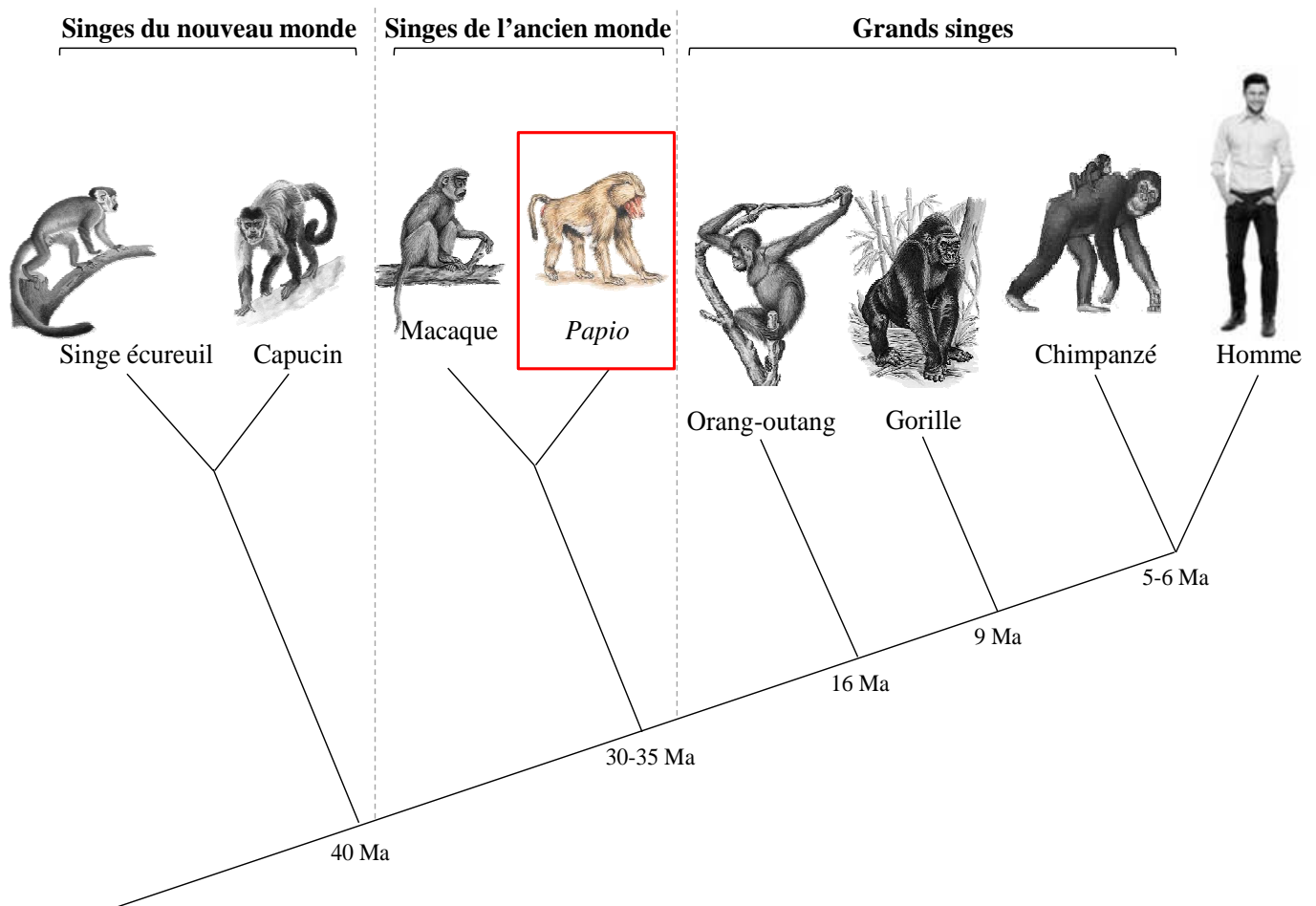


Figure 26. L'espèce *Papio papio* au sein de l'arbre phylogénétique de l'ordre des primates.

L'aire de répartition du babouin *Papio papio* est située en Afrique occidentale et s'étend du Sénégal jusqu'à l'ouest du Mali. Les babouins de Guinée sont des animaux terrestres et diurnes qui dorment en hauteur sur les arbres ou les rochers. Dans la nature, ils vivent généralement en troupes de plusieurs centaines d'individus qui se répartissent en différents sous-groupes pour aller fourrager le jour (Patzelt et al., 2011).

D'un point de vue cognitif, cette espèce a déjà fait l'objet de plusieurs recherches en laboratoire qui ont permis d'identifier certaines caractéristiques pouvant être déterminantes dans sa capacité à raisonner par analogie, notamment concernant son empan mnésique et l'efficacité de son contrôle exécutif. Concernant l'empan mnésique de cette espèce, Fagot et De Lillo (2011) ont montré que les babouins de Guinée possèdent une taille d'empan mnésique allant de quatre à cinq items. Pour comparaison, l'homme posséderait un empan mnésique de sept items plus ou moins deux (Miller, 1956). Par ailleurs, plusieurs études conduites chez le babouin montrent que cette espèce possède un contrôle exécutif dont l'efficacité évolue au cours de la vie (Bonté, Flemming, & Fagot, 2011 ; Bonté, Kemp, & Fagot, sous presse), avec une maturation des fonctions exécutives jusqu'à 6-8 ans puis une diminution progressive de leur efficacité (Bonté et al., 2011).

Le babouin de Guinée constitue un modèle idéal pour répondre aux objectifs de ma thèse dans la mesure où plusieurs travaux conduits chez cette espèce ont déjà mis en évidence leur capacité à résoudre différents types de tâches d'appariement relationnel (Fagot & Parron, 2010 ; Fagot & Thompson, 2011 ; Fagot et al., 2001).

Dans le cadre de cette thèse, j'ai travaillé avec des babouins appartenant à un groupe social de 28 individus d'âges et sexes variés (Figure 27) ayant un accès permanent à un enclos extérieur de 750 m² et un enclos intérieur de 20 m².

Nom	Famille	Sexe	Date de naissance	Âge (ans) Au 1 ^{er} jan. 11
PETOLETTE	1	F	14/03/1999	11.8
ANGELE		F	14/05/2005	5.7
CLOCLO		M	27/02/2007	3.9
DAN		M	10/03/2008	2.8
FELIPE		M	22/05/2010	0.7
FILO		M	28/10/2010	0.3
BRIGITTE	2	F	09/02/1996	14.9
ROMY		F	11/04/2000	10.8
ARIELLE		F	25/10/2005	5.3
CAUET		M	07/04/2007	3.8
DORA		F	28/07/2008	2.5
FEYA		F	05/08/2010	0.4
MICHELLE	3	F	17/02/1996	14.9
ARTICHO		M	20/10/2005	5.3
KALI	4	F	06/09/1995	15.3
URANIE		F	20/12/2003	7.1
BARNABE		M	28/06/2006	4.6
EWINE		F	27/07/2009	1.5
FANA		F	20/02/2010	0.9
FLUTE		F	18/09/2010	0.3
VANINA	5	F	22/11/2004	6.2
BOBO		M	09/08/2006	4.4
DREAM		F	28/05/2008	2.7
MONA	6	F	02/03/1997	13.8
VIOLETTE		F	20/12/2004	6.1
ATMOSPHERE	7	F	08/03/1998	12.8
PIPO	8	M	28/08/1999	11.4
VIVIEN	9	M	22/10/2004	6.3

Figure 27. Détail du groupe social de 28 babouins de Guinée vivant à Rousset-sur-Arc regroupant neuf familles de singes d'âges et sexes variés.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Tous les membres de ce groupe social ont un accès libre, jour et nuit, à 10 boxes individuels de travail depuis l'installation en 2009 par Joël Fagot de la plateforme « Comportement et Cognition du Primate » (CCDP ; Fagot & Bonté, 2010). Ces boxes de travail, appelés dispositifs ALDM pour « Automated Learning Device for Monkeys » (Fagot & Paleressompouille, 2009), sont installés dans des bungalows adjacents à l'enclos extérieur comme le montre la Figure 28.

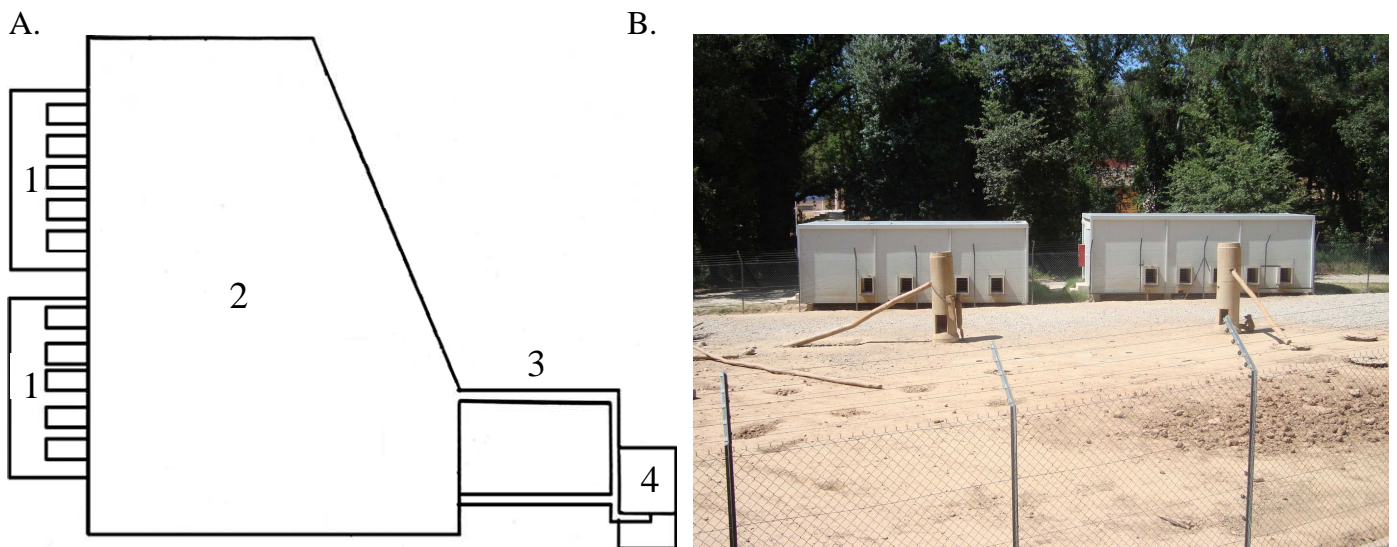


Figure 28. Illustration de la plateforme CCDP. A. Plan de la plateforme montrant les bungalows (1) comprenant chacun cinq boxes de travail (ALDM), l'enclos extérieur (2) et les tunnels (3) qui connectent l'enclos extérieur (2) et l'enclos intérieur (4), tiré de Fagot et Bonté (2010). B. Photographie de la plateforme montrant les deux bungalows vus de l'enclos intérieur.

Chaque système de conditionnement opérant automatisé (ALDM) est équipé d'une chambre de travail dans laquelle le babouin s'installe, d'un écran tactile sur lequel des tâches informatisées lui sont proposées et d'un distributeur de grains de blé pour le récompenser lorsqu'il répond correctement à un essai (Figure 29).

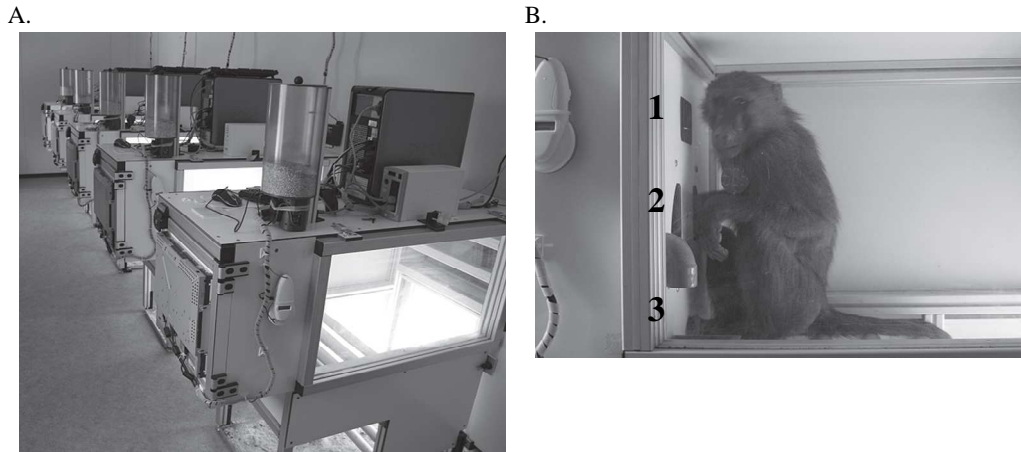


Figure 29 Illustrations du dispositif ALDM, tiré de Fagot et Bonté (2010). A. Photographie de l'intérieur d'un bungalow contenant cinq dispositifs ALDM. B. Photographie d'un singe dans la chambre de travail d'un dispositif ALDM qui comprend un port visuel (1) correspondant à une ouverture à travers laquelle le singe peut voir l'écran tactile, deux ports manuels (2) correspondant à des ouvertures à travers lesquelles le singe peut passer ses mains pour interagir avec l'écran tactile et un dispositif de récompense qui délivre des grains de blé dans la chambre de travail.

Cet environnement expérimental unique permet de connaître l'histoire individuelle des sujets dans chaque type de tâches et offre ainsi la possibilité de tester précisément l'influence de facteurs, tels que l'expérience, dans l'émergence des capacités cognitives. Toutes les expériences effectuées dans le cadre de ma thèse ont fait l'objet de tâches informatisées conduites à l'aide des dispositifs ALDM.

Concernant la sélection des participants, pour chacune des expériences rapportées dans cette thèse, les premières sessions d'entraînement étaient proposées à la totalité du groupe social. La sélection des participants a ensuite été faite sur la base de la rapidité avec laquelle les individus atteignaient les critères de réussite de ces premières sessions d'entraînements. Les individus les plus rapidement efficaces (et donc les plus performants dans nos tâches) étaient ainsi sélectionnés.

Chapitre II

Articles

Article I – Processus impliqués dans le traitement des relations chez le babouin et rôle de l'expérience

Effects of training condition on the contribution of specific items to relational processing in baboons (*Papio papio* ; Maugard, Wasserman, Castro, & Fagot, 2013)

Compte tenu de l'importance du traitement relationnel dans le raisonnement par analogie, cette étude vise à élucider les stratégies employées par les babouins pour traiter des relations, et à déterminer l'effet de l'expérience sur le développement de leurs stratégies.

Chez l'homme, plusieurs études suggèrent que le traitement des relations implique l'intégration de plusieurs niveaux d'informations comprenant les éléments concrets (les objets) ainsi que leurs relations. Une étude portant sur la discrimination de relations montre par exemple que les sujets ont plus de difficultés à discriminer des relations quand le rôle des objets est inversé par rapport aux relations utilisées dans l'entraînement (Rein & Markman, 2010). Dans une autre étude, Kroger, Holyoak et Hummel (2004) ont demandé à des participants de juger si deux configurations présentées séquentiellement, chacune composée de deux paires de carrés colorés, étaient identiques ou différentes à un niveau perceptif (i.e., la couleur des carrés), ou à un niveau relationnel (i.e., les relations d'identité ou de différence exprimées par les carrés). Quand les participants devaient juger de la similarité au niveau relationnel leurs temps de réponse étaient influencés par la similarité des carrés individuels, suggérant que le traitement des stimuli au niveau des objets influence le traitement des stimuli à un niveau relationnel. Le raisonnement par analogie mettrait également en jeu des processus de comparaison à ces deux niveaux d'informations (i.e., au niveau des objets et des relations), comme le souligne le *principe de transparence* introduit par Gentner qui décrit l'importance des similarités perceptives entre les situations *source* et *cible* (Gentner & Toupin, 1986). Plusieurs études ont en effet montré que la similarité des objets entre une relation *source* et

une relation *cible* influence les capacités d’analogie sur ces relations (Gentner & Markman, 1997 ; Gentner & Toupin, 1986 ; Ross, 1987, 1989).

Les études chez les primates non humains se sont surtout intéressées à leur capacité à détecter des relations, mais peu d’attention a été portée à la contribution des objets dans ce processus. Le premier objectif de ce travail est d’étudier l’implication possible d’un traitement parallèle des objets et des relations chez le babouin. Le deuxième objectif est de caractériser l’effet de l’expérience individuelle sur les stratégies de traitement des relations développées par les babouins. Pour ce faire, nous avons entraîné 13 babouins dans une tâche de discrimination de relations dans laquelle ils devaient distinguer des patterns relationnels horizontaux et verticaux (Figure 30).

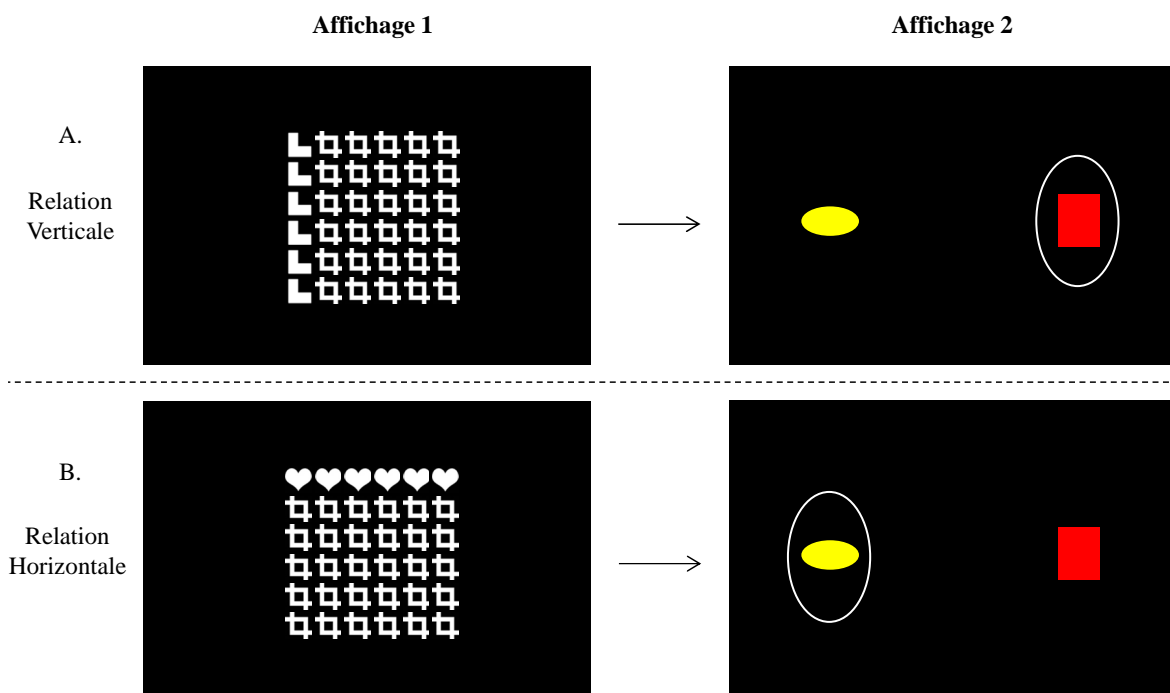


Figure 30. Illustration de la tâche de discrimination de relations présentée aux babouins sur un écran tactile. L’affichage 1 comprend une matrice exprimant soit une relation de verticalité (A.), soit une relation d’horizontalité (B.). Le babouin doit toucher la matrice pour déclencher l’apparition de l’affichage 2. Dans les cas où l’affichage 1 exprime une relation verticale, le babouin doit toucher la clé de réponse rouge pour obtenir une récompense, sinon il doit toucher la clé de réponse jaune.

Dans une première expérience, nous avons conduit trois phases d'entraînement, chacune suivie d'une phase de test pour évaluer les capacités de transfert à des patterns nouveaux. A chaque phase, le nombre d'objets utilisés pour l'entraînement augmentait. Dans la phase 1, chaque relation était exprimée par un seul objet (e.g., forme de cœur = horizontal ; forme de L = vertical). Dans la phase 2, le nombre d'objets exprimant chacune des relations était égal à six, puis égal à 60 dans la phase 3 (cf. Figure 31).

Nombre d'items utilisés dans l'entraînement pour exprimer :	Expérience 1						Expérience 2	
	Phase 1	Test	Phase 2	Test	Phase 3	Test	Phase 1	Test
la relation verticale	1				6			
la relation horizontale	1		6		60		1	

Figure 31. Tableau récapitulatif du nombre d'items utilisés pour l'entraînement dans les différentes phases de l'expérience 1 et l'expérience 2.

L'évolution des performances des babouins au cours de ces trois phases montre qu'ils passent d'une stratégie uniquement basée sur la prise en compte des objets à une stratégie plus relationnelle, avec une faible contribution des objets. Ce déplacement de l'attention des singes des objets vers la structure relationnelle des patterns peut être expliqué par une simple accumulation quantitative d'expérience, ou par l'augmentation du nombre d'exemplaires utilisés pendant les entraînements.

Pour départager ces deux hypothèses nous avons conduit une seconde expérience dans laquelle nous avons de nouveau entraîné les babouins de l'expérience 1, mais cette fois-ci en utilisant une seule illustration de chaque relation (cf. Figure 31). Ils se retrouvaient donc dans la même situation que dans la phase 1 de la première expérience, après avoir appris la tâche relationnelle sur un grand nombre d'exemplaires. Suite à cet entraînement, les babouins développent une stratégie mixte, basée à la fois sur le traitement des objets et des relations.

Le traitement des objets et celui des relations sont souvent présumés comme étant des processus psychologiquement distincts (e.g., Penn et al., 2008). La présente étude remet en question cette présomption. En effet, alors qu'au début de l'étude, les babouins semblent focaliser leur attention sur les informations perceptives portées par les objets, leur stratégie évolue lorsqu'ils sont entraînés avec un grand nombre de stimuli. Un tel entraînement génère une prise en compte des informations relationnelles certainement provoquée par l'augmentation de la prépondérance de la structure relationnelle des stimuli (Rein & Markman, 2010). Par ailleurs, même lorsque le contrôle du traitement relationnel est fermement établi, l'équilibre entre le traitement des objets et des relations peut être modifié en changeant le caractère informatif de chacun de ces indices. Une telle flexibilité suggère une interaction bien plus profonde et complexe entre ces deux sources de contrôle dans les traitements de haut-niveau comparé à ce qui avait pu être envisagé chez l'homme et les animaux (Penn al., 2008).

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration avec Edward Wasserman et Leyre Castro qui reproduisent actuellement ce protocole chez le pigeon.

Effects of training condition on the contribution of specific items to relational processing in baboons (*Papio papio*)

Anaïs Maugard · Edward A. Wasserman ·
Leyre Castro · Joël Fagot

Received: 12 July 2013 / Revised: 6 December 2013 / Accepted: 10 December 2013
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Abstract Relational processing involves learning about the relationship between or among stimuli, transcending the individual stimuli, so that abstract knowledge generalizable to novel situations is acquired. Relational processing has been studied in animals as well as in humans, but little attention has been paid to the contribution of specific items to relational thinking or to the factors that may affect that contribution. This study assessed the intertwined effects of item and relational processing in nonhuman primates. Using a procedure that entailed both expanding and contracting sets of pictorial items, we trained 13 baboons on a two-alternative forced-choice task, in which they had to distinguish horizontal from vertical relational patterns. In Experiment 1, monkeys engaged in item-based processing with a small training set size, and they progressively engaged in relation-based processing as training set size was increased. However, in Experiment 2, overtraining with a small stimulus set promoted the processing of item-based information. These findings underscore similarities in how humans and nonhuman primates process higher-order stimulus relations.

Keywords Baboon · Comparative psychology · Abstract concept learning · Item processing · Relational processing

A. Maugard · J. Fagot (✉)
Laboratory of Cognitive Psychology, Aix-Marseille University,
Fédération de Recherche 3C, CNRS, 3 Place Victor Hugo, Bât B,
Case D, 13331 Marseille Cedex, France
e-mail: joel.fagot@univ-amu.fr

E. A. Wasserman · L. Castro
Department of Psychology, Delta Center, University of Iowa,
Iowa City, IA 52242, USA

Introduction

Relational processing requires learning about the relations between or among two or more stimuli (e.g., sameness, differentness, oddity, less than, and greater than); the specific perceptual properties of the stimuli must be transcended, and knowledge of universal applicability must be extracted (Morgan 1896). Relational processing is vital to higher-order cognition in humans and is central to a variety of adaptive cognitive processes, including analogical reasoning (Vosniadou and Ortony 1989), categorization (Ramscar and Pain 1996), and inductive inference (Holland et al. 1989).

Some authors (e.g., Penn et al. 2008) have proposed that there is a sharp distinction between perceptually based behavior, based on the perceptual features of the stimuli, and conceptually based behavior, based on the abstract properties of the stimuli. In this article, we focus on how these two different kinds of information *jointly* participate in relational learning, and how the nature and quantity of experience of the learner interact with the processing of perceptual properties, such as the individual items presented, and their abstract properties, such as the relations between or among the presented items.

During human and animal development, processing the perceptual characteristics of stimuli seems to precede and support the emergence of abstract concepts and relational representations (Herrnstein 1990; Murphy and Smith 1982; Tomikawa and Dodd 1980; Zentall et al. 2008). Young children initially pay more attention to perceptual features than to the relational structures that bind stimuli together (Christie and Gentner 2007), but a relational shift later occurs and children progressively move their attention from perceptual attributes to higher-level properties, such as relational structures. The ability to process relational

structures is directly linked to the knowledge that children acquire about relations; the more experience children have with a particular relational concept, the better their ability to transfer that concept to new domains (Goswami and Brown 1990a, b). This developmental progression suggests that the variety of stimuli exemplifying a relationship to which a learner is exposed will play an important part in his/her ability to detect higher-level structures.

Relational learning in animals is often studied with same/different (Blaisdell and Cook 2005; Katz et al. 2002; Oden et al. 1990; Wasserman and Young 2010; Wright et al. 2003) and matching-to-sample tasks (Bodily et al. 2008; Truppa et al. 2010; Wasserman and Castro 2012). Use of these procedures has demonstrated that pigeons (Cook and Wasserman 2012; Katz and Wright 2006), parrots (Pepperberg 1987), rats (Nakagawa 1993; Wasserman et al. 2012), dogs (Pietrzykowska and Soetysik 1975), and nonhuman primates (Katz et al. 2002) can form abstract concepts, suggesting that this ability is widespread among animals. Even when presented with more challenging cognitive tasks, which require the animals to learn not only first-order relationships (as in a same-different task) but also second-order relationships (the relationship between relations, as in a relational matching-to-sample task), some animals have shown reliable success (e.g., Fagot and Parron 2010; Fagot and Thompson 2011; Fagot et al. 2001; Flemming et al. 2011; Vonk 2003).

Abstract concept learning in animals has been found to be boosted when they are trained with large sets of training items compared with small sets of training items (pigeons: Castro et al. 2010; Katz and Wright 2006; rhesus monkeys: Katz et al. 2002; capuchin monkeys: Truppa et al. 2010). In general, as the number of items in the training set progressively increases, transfer performance steadily rises, suggesting that the number of instantiations of a relational concept directly influences an animal's ability to appreciate it. A plausible reason for this set size effect is that the more items are in the training set, the more difficult it becomes to learn specific responses to specific stimuli. Because stimulus *identity* becomes difficult to use as a discriminative feature when the number of items is large, the animals must learn about the *relation* between or among the stimuli.

Studies conducted in humans suggest that the processing of perceptual features and stimulus relations may be *interdependent*. For instance, Rein and Markman (2010) trained participants to identify visual relational patterns (either horizontal or vertical groupings of items) instantiated by arrays of different individual items; they found that, when novel items were presented forming the horizontal and vertical relational patterns, participants' responses were slowed and their error rates were increased. That is, participants found it more difficult to judge the abstract relations with novel items, suggesting that, even

when abstract relations had been taught (participants were given explicit instructions to learn the relation among the items), the influence of the particular items involved in those relations persisted.

Similar conclusions were made by Kroger et al. (2004), who asked their participants to judge whether the relations among patterns of four colored squares were the same either based on the specific squares or based on the relationship among the squares. When the participants had to judge similarity at the relational level (among the patterns rather than among the single squares), their response times were influenced by the similarity of the specific squares, suggesting that processing of the stimuli at the item level had an influence on processing the stimuli at a still higher relational level. In a similar vein, Gentner and Markman (1997) found that participants more readily discerned relational similarity when the properties of the stimuli instantiating the relations were similar to one another than when they were different from one another. Altogether, the findings from these studies strongly suggest that, at least for humans, there may be no sharp distinction between relational processing and the processing of perceptual features, including the specific stimulus items themselves.

The contribution of item processing to relational representation seems to depend on the individual's prior experience with the specific items illustrating the relation, as well as on the individual's prior experience with the relation itself (Markman and Gentner 1993; Richland et al. 2006). Markman and Gentner (1993) presented college students with an analogical reasoning task involving pairs of scenes depicting one particular relation (e.g., Scene 1: a bird chasing a worm; Scene 2: a cat chasing a bird). The experimenter pointed to one item in Scene 1 (e.g., the bird) and asked the participant to select the corresponding item in Scene 2 (e.g., the cat). Relational similarity seemed to be more salient when the participants had previously seen several pairs of stimuli before they were asked to solve the task. Also using analogy scenes, Richland et al. (2006) found that young children were highly sensitive to distraction by the specific stimuli used in the scenes, but this sensitivity tended to decline with age. Overall, the likelihood of a child attending to the relational structure of a task and disregarding the irrelevant features of the individual items appeared to depend on the richness of the child's experience with the relation.

Studies of relational learning in nonhuman animals have been primarily interested in documenting their higher-order cognitive capabilities (Fagot and Maugard 2013; Fagot and Thompson 2011; Gillan et al. 1981), with rather less interest having been paid to animals' possible processing of individual items during relational learning (Maugard et al. 2013). Thus, the first aim of the current study was to assess

the possibly intertwined effects of item and relational processing in nonhuman primates, specifically baboons. Because baboons are capable of solving same–different (Wasserman et al. 2001) and relational matching-to-sample problems (Fagot et al. 2001; Fagot and Thompson 2011; Fagot and Maugard 2013; Maugard et al. 2013), this species was an interesting model for our study. The second aim was to investigate the effect of experience on the modes of information processing that animals deploy to master relational learning tasks.

Our experimental designs were largely inspired by Rein and Markman’s recent (2010) study on the interplay between item and relational processing in human cognition. Critical to the tasks that we gave our baboons was the fact that task mastery was possible by processing either the items in the stimulus arrays or the relations that built upon those items (or both). With such redundant relevant cues at their disposal, the baboons could attend to either in order to solve the problem (also see Gibson and Wasserman 2003, 2004 for similar work with pigeons). To which kind of information would they attend? Could they process the item information or the relation information (or both) at the same time? What factors might incline them to attend to one property or the other? These were the questions to which we sought answers.

Experiment 1

In Experiment 1, we trained guinea baboons (*Papio papio*) on a two-alternative forced-choice task, in which they had to discriminate horizontal from vertical relational patterns. In Phase 1, each spatial relation was exclusively expressed by a unique object (e.g., heart shape = horizontal; L shape = vertical, see Fig. 1a); the number of objects expressing each spatial relation was increased to 6 in Phase 2 and to 60 in Phase 3 (see details below). After each phase of training, we tested the baboons under the four different transfer conditions illustrated in Fig. 1.

Each transfer condition was designed to disrupt different kinds of perceptual information. First, Novel configuration transfer trials contained the same objects in the same relational patterns as the training trials, but the spatial location of the vertical or horizontal patterns within the overall stimulus differed from the training trials (see Fig. 1b). Second, Switched objects transfer trials contained the same objects as the training trials, but their function was reversed; the heart shape was now used to draw the vertical pattern, and the L shape was now used to draw the horizontal pattern (see Fig. 1c). Third, Novel objects transfer trials used Novel objects to draw the vertical or horizontal patterns, but retained the training background objects (see Fig. 1d), so that novel horizontal and vertical

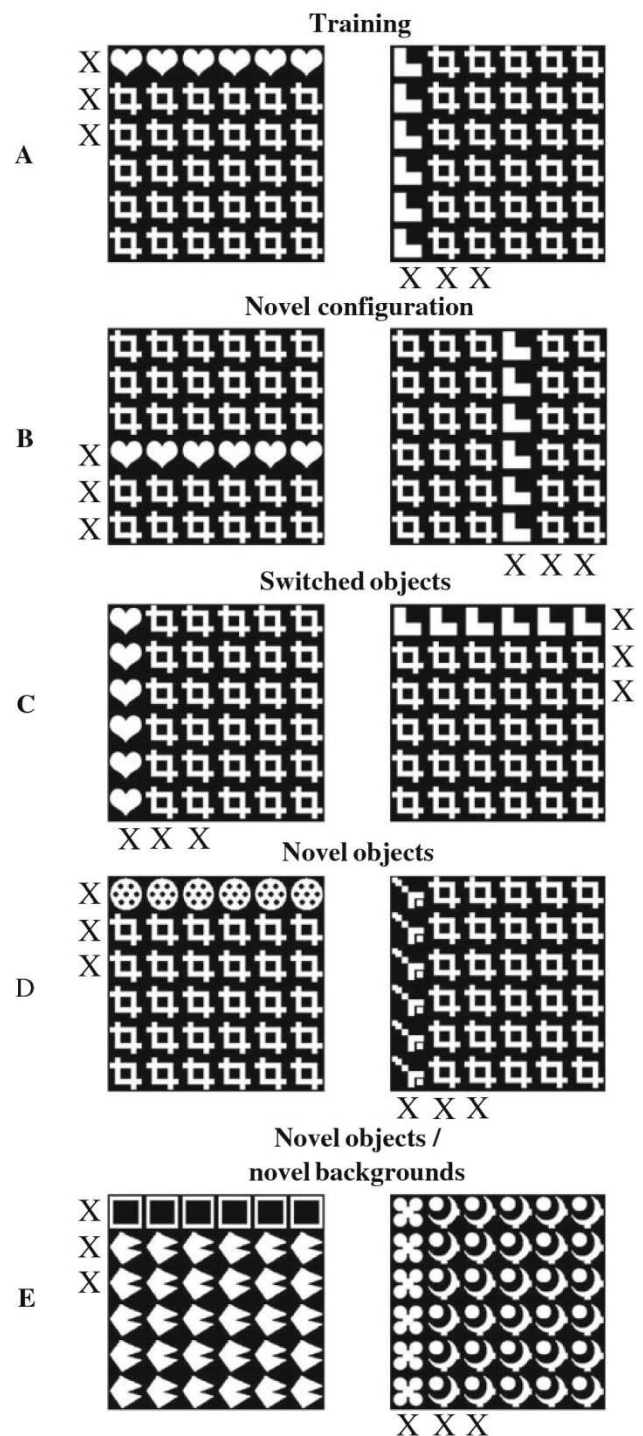


Fig. 1 Illustration of the horizontal and vertical displays used in training and transfer trials. In both the training and the transfer trials, horizontal (*left*) and vertical (*right*) patterns could be, respectively, displayed along the three different lines or columns denoted by the “Xs” next to each array. These test conditions were largely inspired by Rein and Markman (2010)

patterns were presented in a familiar context. Note that the items creating the background were the same for vertical and horizontal trials, so they could not be used to correctly

solve the task; still, some level of familiarity with the elements of the arrays may help the baboons' transfer performance. Fourth, Novel objects/Novel backgrounds transfer trials used Novel objects for drawing both the backgrounds and the patterns (see Fig. 1e), so that both the vertical and horizontal patterns and the backgrounds in which they were presented were unfamiliar.

This general testing procedure was given in three phases, as we progressively increased the size of the training stimulus sets (see below). By comparing the baboons' patterns of responding across the different transfer conditions and test phases, we hoped to see to what extent individual item processing contributed to relational processing. If accuracy to all testing trials is high, then the animals will have shown clear relational processing of the information in the arrays. On the other hand, if the animals merely learned item-specific responses, then their performance will be at chance with Novel objects and Novel objects/Novel backgrounds trials, and it will be below chance with Switched objects trials (because the training objects will now form the opposite geometrical pattern); item-specific learning could result in high accuracy to Novel configuration trials if the animals disregard the specific location where the item is presented, or it could result in low accuracy if location is processed along with the specific identity of the item. In addition, these response patterns could change depending on the number of exemplars presented during training. If the size of the item pool, and therefore the number of exemplars used to express each of the relations, matters, then we might see a transition from item-specific to relational learning from Phase 1 to Phase 3.

Method

Subjects

The subjects were 13 Guinea baboons (*P. papio*; age range 2.4–8.4 years), which had from 2 to 5 years of experience with computerized tasks (Bonté et al. 2011; Goujon and Fagot 2013; Maugard et al. 2013). A subset of six baboons had already been tested on relational matching-to-sample tasks involving the relations of identity and nonidentity, but none of the subjects had previously been tested in tasks involving horizontal and vertical relations. The baboons lived in a social group of 30 individuals within a 700 m² enclosure and had free access from their enclosure to the experimental area. Each animal had a microchip implanted in each forearm for automatic identification inside the test chambers. The baboons were never food or water deprived for the purpose of this study, but they only received their entire daily food ration at 5:00 p.m.

Apparatus

This research used the automated learning device for monkeys (ALDM, see Fagot and Bonté 2010; Fagot and Paleressompoulle 2009), allowing the baboons to freely exit their social group to enter into one of the ten testing booths (70 cm × 70 cm × 80 cm) in order to work on the task. Each testing booth was accessible through an open back entrance fitted in its innermost front side with a view port (7 cm × 7 cm) and two hand ports (8 cm × 5 cm each). Through the view port, the monkeys could readily see a 19-inch LCD touch monitor installed at eye level 25 cm from the port. Introducing one hand through one of the hand ports allowed the baboon to interact with the touch screen. Two antennas fixed around each hand port automatically read the microchip in the forearm of the baboon when the animal introduced its hand through a hand port. Numeric identification signals from the arm tags served to trigger the computer-controlled presentation of the stimulus and to assign behavioral measures (stimulus choices and response times) to each subject. Correct responses were rewarded by a few grains of dry wheat delivered inside the test booth by a dispenser.

The experiment was controlled by a customized test program developed by JF with E-Prime (version 1.2, Psychology Software Tools, Pittsburgh). Using this program, the appropriate stimulus presentation for a given subject could be administered, irrespective of the order in which the baboons spontaneously entered the test booth and the specific test booth that the animal decided to use.

Stimuli

The individual stimuli were white geometrical shapes (40 × 40 pixels, 1.7 × 1.7 cm, corresponding to 3.9° of visual angle). The total size of the set of individual stimuli increased from Phase 1 to Phase 2 to Phase 3, as described below. Two additional stimuli were used to draw the response buttons: an orange rectangle and a blue oval drawn in a 120 × 120 pixel area (4.4 × 4.4 cm, 10.1° of visual angle). All stimuli were displayed at a resolution of 1,024 × 768 pixels.

General procedure

The trials started when the baboon introduced one hand through a hand port for self-identification. This action triggered the presentation of the trial assigned to that subject. A trial began with the presentation of a 6 × 6 grid of stimuli (465 × 465 pixels, 17.2 × 17.2 cm, subtending 39.4° of visual angle) on a black background. Forty-five pixels separated two adjacent stimuli within the grid in the center of the screen. On horizontal trials, one object (e.g.,

heart shape, see Fig. 1a) was repeated six times in order to form a horizontal line, so that the relation among the six replications of the item was horizontal; the rest of the grid was filled with a neutral background object (e.g., a square with extended sides, see Fig. 1a). On vertical trials, another object (e.g., an L shape, see Fig. 1a) was repeated six times in order to form a vertical line, so that the relation among the six replications of the item was vertical; the rest of the grid was filled with the same neutral background object as for the horizontal pattern (e.g., a square with extended sides, see Fig. 1a).

Following one touch anywhere in the array, two response buttons appeared on the screen: a blue oval shape on the bottom part of the left hemi-screen and an orange rectangle on the bottom part of the right hemi-screen. The baboons had to touch the orange rectangle when the stimulus array entailed a vertical pattern and to touch the blue oval when the stimulus array entailed a horizontal pattern. Touching the correct button cleared the screen and delivered a food reward. Touching the incorrect button also cleared the screen, but triggered a 3-s time-out indicated by a green screen. Horizontal and vertical trials were randomly presented, with the constraint that these two kinds of trials were evenly presented within a block of trials (see below). An intertrial interval of 3 s separated two successive trials, but this delay could be longer because the baboons initiated the trials by themselves. A maximum of 5 s was allowed for the baboons to respond on each trial. The trial was aborted when the baboon did not respond within this time frame. The accuracy of the response (i.e., correct or incorrect) served as the main dependent variable.

Experiment 1 consisted of three successive phases (described in detail below), with each phase consisting of training followed by transfer trials. In each training phase, the items used to draw the stimulus arrays were selected from three distinct stimulus pools: one for drawing the horizontal line patterns in horizontal trials (Pool H), one for drawing the vertical line patterns in vertical trials (Pool V), and a third one for drawing the backgrounds (Pool B).

For each phase, the training sessions were continually repeated until the baboons reached an accuracy level of 80 % correct or better in two consecutive sessions. Then, transfer testing began. Testing sessions contained both Baseline trials and Probe trials. The Baseline trials were identical to the training trials, using the same objects and the same reinforcement contingency for each correct or incorrect response. Each testing session contained 6 Probe trials per transfer condition (i.e., Novel configuration, Switched objects, Novel objects, Novel objects/Novel backgrounds). Depending on the transfer condition, we used random objects from the three training pools (i.e., Pool B, Pool H, and Pool V) or from a pool of Novel

objects for the Novel objects and the Novel objects/Novel backgrounds conditions. Choice responses on probe trials were randomly reinforced at a likelihood of 80 %.

Training and testing in Phase 1

Training sessions consisted of 96 randomized trials (48 H-trials randomly intermixed with 48 V-trials). The three training pools used for drawing the sample displays contained 1 item each. The baboons needed a mean of 30 sessions (2,880 trials, range 480–5,376 trials) to reach a criterion of two consecutive sessions at 80 % correct. Transfer in Phase 1 involved five consecutive testing sessions. Each testing session contained 174 trials (150 Baseline trials and 24 Probe trials). For the Novel objects Probe trials and the Novel objects/Novel backgrounds Probe trials, a total of 18 stimuli that had never been shown before were used in each session.

Training and testing in Phase 2

Training sessions consisted of 216 randomized trials (108 H-trials randomly intermixed with 108 V-trials). The three training pools used for drawing the sample displays each contained 6 new items. The baboons needed a mean of 16 sessions (3,456 trials, range 1,080–7,992 trials) to reach a criterion of two consecutive sessions at 80 % correct. Transfer in Phase 2 involved 6 consecutive testing sessions. Each testing session contained 240 trials (216 Baseline trials and 24 Probe trials). For the Novel objects Probe trials and the Novel objects/Novel backgrounds Probe trials, a total of 18 stimuli that had never been shown before were used in each session.

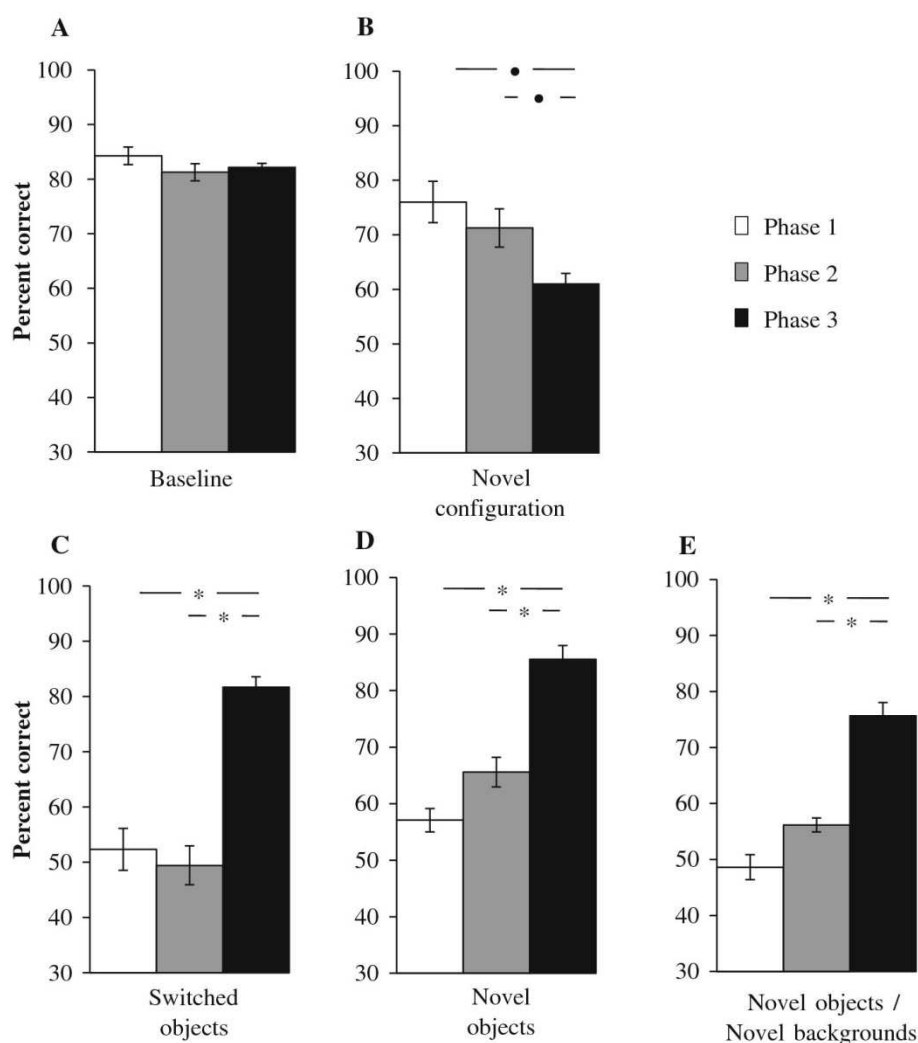
Training and testing in Phase 3

Training sessions consisted of 216 randomized trials (108 H-trials randomly intermixed with 108 V-trials). The three training pools used for drawing the sample displays each contained 60 items. The baboons needed a mean of 40 sessions (8,640 trials, range 3,888–13,824 trials) to reach a criterion of two consecutive sessions at 80 % correct. Transfer in Phase 3 involved 6 consecutive testing sessions. Each testing session contained 240 trials (216 Baseline trials and 24 Probe trials). For the Novel objects Probe trials and the Novel objects/Novel backgrounds Probe trials, a total of 18 stimuli that had never been shown before were used in each session.

Results

Arcsine transformations were applied to the baboons' accuracy data to correct for deviations from normality.

Fig. 2 Mean group accuracy in the three phases of Experiment 1 for each type of test condition; **a** Baseline, **b** Novel configuration, **c** Switched objects, **d** Novel objects, and **e** Novel objects/Novel backgrounds. The *error bars* represent the standard error. Reliable differences as inferred from Bonferroni-corrected *t* tests are indicated by the *stars*. Nonsignificant trends ($p < .006$) are indicated by the *dots*



Because long response times might reflect baboons exiting and entering the test system during a trial, trials were discarded from the data set if the response time to touch the screen exceeded 2 s. This rejection procedure removed only .7 % of all trials. Individual as well as group mean data are reported, for each test condition and phase, in Appendix 1.

To ascertain whether the baboons continued to pay attention to the training task during testing, in spite of the presence of potentially disturbing transfer stimuli, we analyzed the animals' performance in the Baseline trials of each testing phase. One-sample two-tailed *t* tests found that accuracy on Baseline trials was significantly above chance in all three of the testing phases [Phase 1 ($M = 84.25$): $t(12) = 15.95$, $p < .0001$; Phase 2 ($M = 81.27$): $t(12) = 16.92$, $p < .0001$; Phase 3 ($M = 82.15$): $t(12) = 36.10$, $p < .0001$; see Fig. 2].

The next analysis assessed how mean accuracy of the baboons varied across the three testing phases in each transfer condition (see Fig. 2) and asked, in each phase,

whether performance in the transfer conditions was lower than baseline performance. For this purpose, accuracy was analyzed with a two-way repeated-measures analysis of variance (ANOVA) considering conditions (Baseline, Novel configuration, Switched objects, Novel objects, Novel objects/Novel backgrounds) and phases (Phase 1, Phase 2, and Phase 3) as factors in a 5×3 full-factorial design. This analysis revealed significant main effects of condition, $F(4, 48) = 34.3$, $MSE = .011$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .74$, and phase, $F(2, 24) = 35.4$, $MSE = .012$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .75$, as well as a significant condition \times phase interaction, $F(8, 96) = 19.5$, $MSE = .011$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .62$.

Post hoc analyses using Bonferroni-corrected two-sample paired *t* tests (critical p value for 27 comparisons = .0018) showed that in Phase 1, the accuracy of Baseline trials ($M = 84.25$) was significantly higher than the accuracy of the Switched objects trials [$M = 52.34$: $t(12) = 7.37$, $p < .0001$], the Novel objects trials [$M = 57.08$: $t(12) = 7.8$, $p < .0001$], and the Novel

objects/Novel backgrounds trials [$M = 48.63$; $t(12) = 11.92$, $p < .0001$]. Performance on Baseline trials, however, did not differ from performance on Novel configuration trials [$M = 76.01$], $t(12) = 2.82$, $p > .0018$]. Thus, the pattern of results in Phase 1 suggests that the baboons engaged in item-specific learning, because they failed to transfer when Novel objects were used during testing (Novel objects and Novel objects/Novel backgrounds condition). In fact, only when the same objects were presented in the same relational patterns as in training (Novel configuration trials) did they show successful transfer performance. When the same objects were presented in the opposite patterns as in training (Switched objects), the accuracy of the baboons' responding dropped dramatically.

In Phase 2, post hoc analyses continued to reveal higher performance on Baseline trials ($M = 81.27$) than on Switched objects trials [$M = 49.43$; $t(12) = 6.91$, $p < .0001$], Novel objects trials [$M = 65.60$; $t(12) = 7$, $p < .0001$], and Novel objects/Novel backgrounds trials [$M = 56.16$; $t(12) = 9.47$, $p < .0001$]. Thus, an increase in the size of the item pools, from 1 item per relational pattern to 6 items per relational pattern, did not have an appreciable effect on transfer performance. Just as in Phase 1, the baboons based their responding on the identity of the items rather than on the relation among the items, so that the accuracy of their responses was near chance levels when the identity of the items was switched or when novel items were used. Curiously, performance on the Novel configuration trials was now significantly lower than on the Baseline trials [$M = 71.27$; $t(12) = 4.36$, $p < .001$], unlike what was observed in Phase 1. This change suggests that the baboons' cognitive processing may have begun to evolve in Phase 2 as a consequence of increased set size, although relational processing was not yet established.

In Phase 3, the baboons' behavior was dramatically different than in the first two phases. Accuracy on Baseline trials ($M = 82.15$) was significantly higher than on Novel configuration trials [$M = 61.01$; $t(12) = 8.05$, $p < .0001$], but it did not differ significantly from Switched objects trials, Novel objects trials, and Novel objects/Novel backgrounds trials ($M = 81.68$, $M = 85.53$ and $M = 75.64$, respectively, all $ps > .0018$). If item-specific processing had been the strategy used in learning, then testing trials should have supported very low accuracy (Switched objects) or near chance performance (Novel objects and Novel objects/Novel backgrounds trials); because this was not the case, it is safe to conclude that relational processing took place in Phase 3. Thus, the relational structure of the stimulus arrays became salient to the baboons when the set size of the

training items (60 items per relational pattern) was considerably increased.

Further post hoc analyses showed that performance on Baseline trials did not differ significantly across phases (Fig. 2a). By contrast, mean accuracy in the Novel configuration condition tended to decrease between Phase 1 ($M = 76.01$) and Phase 3 ($M = 61.01$) [$t(12) = 3.35$, $p = .0057$], and between Phase 2 ($M = 71.27$) and Phase 3 ($M = 61.01$) [$t(12) = 3.59$, $p = .0037$, Fig. 2b]. Interestingly, mean accuracy in the other three transfer conditions increased significantly between Phase 1 (Switched objects: $M = 52.34$; Novel objects: $M = 57.08$; Novel objects/Novel backgrounds: $M = 48.63$) and Phase 3 (Switched objects: $M = 81.68$; Novel objects: $M = 85.53$; Novel objects/Novel backgrounds: $M = 75.64$; all $ps < .0001$), and between Phase 2 (Switched objects: $M = 49.43$; Novel objects: $M = 65.60$; Novel objects/Novel backgrounds: $M = 56.16$) and Phase 3 (all $ps < .0001$) (Fig. 2c–e). We therefore conclude from these findings that the baboons had engaged in strong relational processing in Phase 3, because they could now make relational judgments in the two test conditions involving Novel objects (i.e., Novel objects and Novel objects/Novel Backgrounds) as well as in the Switched objects condition, in which the relational roles assigned to the objects were reversed.

Discussion

Experiment 1 disclosed a positive relationship between the increase in stimulus set size from Phases 1 through 3 and the prevalence of relational processing in our baboons' discrimination behavior in Phase 3. To account for this pattern of results, we hypothesize that presenting more different instances of the horizontal and vertical relations with a larger set of items more strongly directed the baboons' attention to the geometrical relation among the items, at the expense of their processing the individual items in the arrays. We note, however, that the baboons also received more training with continued testing; this greater amount of training might also have contributed to the increase in their relational processing. Experiment 2 addressed this issue.

Experiment 2

The transition from perceptual (Phases 1 and 2) to relational processing (Phase 3) that we observed in Experiment 1 could be due to the increase in the size of the training

pool and therefore to the number of instances of each relational pattern, or it could be due to an increase in the amount of overall training on the task. Experiment 2 sought to distinguish between these rival hypotheses. It also sought to determine whether overexposure to particular stimuli would affect the relational processing that appears to have developed with the large set size that was given in Phase 3. So, the baboons were overtrained and tested in Experiment 2 using the same three stimuli that they had been given in Phase 1 of Experiment 1. If the amount of training alone accounts for the emergence of relational processing, then such processing should be further strengthened by increased training, and we should observe more accurate performance to transfer arrays containing Switched objects, Novel objects, and Novel objects/Novel Backgrounds. By contrast, if the size of the stimulus set is what matters most, then the baboons might even evidence a decrease in relational processing, thereby reverting to object-based processing, despite the increased training that they had been given, and producing less accurate performance to transfer arrays containing Switched objects, Novel objects, and Novel objects/Novel Backgrounds.

Method

Subjects, apparatus, stimuli, and general procedure

The subjects, apparatus, stimuli, and general procedure were the same as in Phase 1 of Experiment 1.

Training and testing

One month elapsed between Experiments 1 and 2. Due to this delay, baboons were initially retrained until they achieved 80 % correct in the same condition as in Phase 3 of training in Experiment 1. Average performance in the first training sessions was 76.46 %, which was statistically different from chance [$t(12) = 12.1, p < .0001$]. In addition, reaching the 80 % training criterion required an average of only 2.1 sessions (454 trials, range 216–864 trials). Such high performance early in training demonstrates that relational processing had been preserved between Experiments 1 and 2. After this first training period, the baboons were given a total of 30 training sessions (2,880 trials) each, as in Phase 1 of Experiment 1, and involving the same three objects (the heart shape for the horizontal pattern, the L shape for the vertical pattern, and the square-like shape for the background in both horizontal and vertical arrays). Transfer testing was conducted for 6 consecutive sessions. Each testing session contained 174 trials (150 Baseline trials plus 6 Probe trials for each of the four test conditions). For the Novel objects Probe trials and the Novel objects/Novel backgrounds Probe trials, a total

of 18 stimuli that had never been shown before were used in each session.

Results and discussion

As in Experiment 1, arcsine transformations were applied to the baboons' accuracy data to correct for deviations from normality. Trials from the data set in which the time to contact the touch screen was >2 s were also discarded. This rejection procedure removed only .2 % of all trials. Appendix 2 reports the mean accuracy of the individual monkeys for the Baseline trials and for the four transfer conditions.

In a first analysis, a one-sample two-tailed t test confirmed that the percentage of correct responses in Baseline trials ($M = 96.30$) was significantly higher than 50 %, $t(12) = 30.19, p < .0001$. Interestingly, above-chance performance was also obtained in all of the other test conditions [Novel configuration: $M = 84.59, t(12) = 10.49, p < .0001$; Switched objects: $M = 84.66, t(12) = 14.94, p < .0001$; Novel objects: $M = 87.88, t(12) = 12.27, p < .0001$; Novel objects/Novel backgrounds: $M = 67.55, t(12) = 5.71, p < .0001$]. Above chance-performance in the test conditions using Novel objects—namely the Novel objects and Novel objects/Novel backgrounds conditions—indicates that the baboons continued to rely on relational cues to solve the task in Experiment 2. This fact is further confirmed by above-chance performance in the Switched objects condition, in which the two stimuli changed roles (the heart shapes were presented in a vertical pattern, whereas the L shapes were presented in a horizontal pattern).

The results of Experiment 2 were then directly compared to those of Phase 3 of Experiment 1, in order to assess the effect of overtraining with a small set size. This analysis involved a two-way ANOVA including conditions (Baseline, Novel configuration, Switched objects, Novel objects, Novel objects/Novel backgrounds) and Experiment (Phase 3 of Experiment 1, Experiment 2) as factors in a 5×2 full-factorial design. There was a significant main effect of condition, $F(4, 48) = 27.8, \text{MSE} = .011, p < .0001, \eta_p^2 = .70$, and Experiment, $F(1, 12) = 32.7, \text{MSE} = .013, p < .0001, \eta_p^2 = .73$. The condition \times experiment interaction was also significant, $F(4, 48) = 13.8, \text{MSE} = .012, p < .0001, \eta_p^2 = .54$ (see Fig. 3).

Post hoc analysis using Bonferroni-corrected two-tailed paired t tests (critical p value for 13 comparisons = .0038) indicated that accuracy in the Switched objects, Novel objects, and Novel objects/Novel backgrounds conditions did not differ significantly between Phase 3 of Experiment 1 and Experiment 2 ($ps > .0038$). However, the baboons' performance increased significantly between Phase 3 of

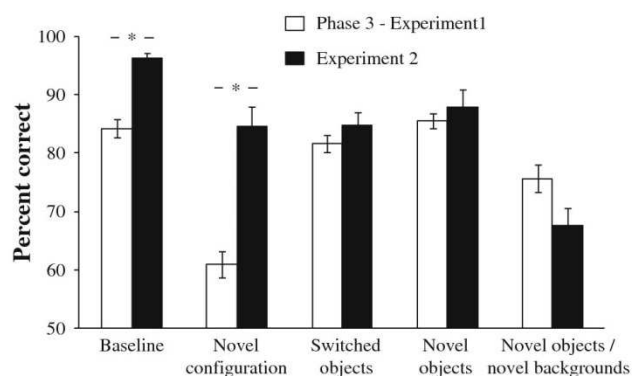


Fig. 3 Mean group accuracy in Experiment 1 (Phase 3) and Experiment 2 for each type of test condition. The *error bars* represent the standard error. Reliable differences as inferred from Bonferroni-corrected *t* tests are indicated by the *stars*

Experiment 1 and Experiment 2 for the Baseline trials [Phase 3 of Experiment 1: $M = 82.15$; Experiment 2: $M = 96.3$; $t(12) = 14.26$, $p < .0001$] as well as for the Novel configuration trials [Phase 3 of Experiment 1: $M = 61.01$; Experiment 2: $M = 84.59$; $t(12) = 6.18$, $p < .0001$]. Thus, although relational processing survived training with a reduced set size, there appeared to be some added value of such training which was restricted to the two conditions in which item processing alone could support the horizontal–vertical discrimination: Baseline trials and Novel configuration trials. This result suggests that information from the individual items, when available, can enhance performance based on relational information.

General discussion

Experiment 1 found that the type of information—item-based or relation-based—controlling our baboons' judgments of visual arrays depicting horizontal and vertical relational patterns strongly depended on the number of items in the training set. When each geometrical relation was illustrated by only a single exemplar during training (Phase 1), the baboons focused their attention on the identity of the diagnostic item—the most concrete, invariant feature of the array—thereby preventing them from appreciating the relational structure of the visual patterns. In short, they missed the forest for the trees (Soto and Wasserman 2010). Yet, after being trained with a large set of exemplars illustrating the same geometrical relations (Phase 3), the baboons effectively transferred their relational responding to arrays of entirely novel stimuli. These findings accord with other results in both the human and animal literature, indicating that training with a large number of exemplars increases the salience of the relational structure of stimuli and reduces the contribution of

specific stimulus features to accurate discrimination performance.

Abstract S/D concept learning is enhanced in animals by training them with a large set of items (Castro et al. 2010; Katz and Wright 2006; Katz et al. 2002). In humans, multiple instantiations of a relation also boost transfer performance (Gick and Holyoak 1983; Homa and Vosburgh 1976; Kotovsky and Gentner 1996; Loewenstein et al. 1999; Rein and Markman 2010). Along with our current results, these convergent findings in animals and humans confirm that the number and/or variety of exemplars of a relationship plays an important role in a learner's detection and application of relational structures. This salutary effect of enriched exemplar experience may be the source of the “relational shift” that is often discussed in the human developmental literature (Gentner 1988), in which a child gradually attends less to perceived physical similarities and more to relational similarities in problem solving.

Several experimental reports with humans suggest that their processing of relations is affected by the nature of the individual items instantiating that relation. Rein and Markman (2010) found that people had more difficulty discriminating abstract relations when the role of the individual items was reversed from that arranged with the original training stimuli (as in our Switched objects condition) or when novel items were given (as in our Novel objects and Novel objects/Novel backgrounds conditions). In Gentner and Toupin (1986), children were told a story involving three characters playing specific roles and were later asked to act out the same story with new characters. Children were less able to act out the same story when the new characters looked like the characters of the first story, but had to play different roles. Similar results were obtained with adult participants who first learned a probability principle using particular objects (Ross 1987, 1989); people were less able to solve new problems using this principle when the same objects as in the training example were used during the test, but with reversed roles. Finally, computational models of analogical mapping in humans—such as the SME of Falkenhainer et al. (1989), the STAR model of Halford et al. (1994), and the LISA model of Hummel and Holyoak (1997)—also postulate that the processing of particular objects is inherent in the relational representation process.

In line with this human literature, the present study provides additional evidence that the nature of training with individual items is an important factor affecting relational processing by monkeys. Here, we used a novel procedure—overtraining with a reduced set size after relational processing had already been established—to see whether the balance between item and relational processing might be measurably altered. Interestingly, we found with this novel procedure that performance did not reliably

decline on those testing trials on which relational cues alone had to be used for task solution (the Switched objects, Novel objects, and Novel objects/Novel backgrounds conditions); there was, by contrast, clear improvement in performance when item-specific information could also be used for task solution (the Baseline and Novel configuration trials) (see Fig. 3).

One possible interpretation of these results might be that the baboons shift from item-based processing to relation-based processing, and back again, depending on the availability of item-specific cues. They could, in the case of Experiment 2, use item-based information in the Baseline and Novel configuration conditions, but they would have to use relation-based information in the other three test conditions where memorizing the specific items would be useless. We therefore suspect that overtraining in Experiment 2 may have enhanced the salience of item-specific information, and that this information was combined with relational information to guide correct responding in the Baseline and Novel configuration trials, therefore promoting increased discrimination performance.

The comparison of our two experiments allows another conclusion. In Experiment 1, training set size and the total number of training trials each increased from Phase 1 to 3. In Experiment 2, the amount of training continued to increase, but enhanced control by item-specific information was found in comparison with the last test phase of Experiment 1. This finding suggests that the training set size may be a more critical variable for establishing relational processing than the duration of training per se, or the total number to training trials received.

Our conclusion that the baboons' discrimination behavior in our task was controlled by both item-specific information and relational information is supported by considerable published data. Thus, after monkeys learned a S/D or a relational matching-to-sample task (RMTS task, see Fagot et al. 2001; Fagot and Thompson 2011; for other examples in S/D tasks in pigeons or monkeys, see Wasserman et al. 1995; Wright and Katz 2006), they were given transfer trials involving new items. Accuracy on these trials was well above chance, but lower than on trials involving the original training items, suggesting that the animals' relation-based processing also included processing of the individual items. Further, Fagot and Thompson (2011) trained baboons on a RMTS task involving identity/non-identity relations. After training, the baboons were tested

with cross-mapped trials, in which one of the items illustrating the sample relation was also used to create the nonmatching relation. Performance remained above chance in these two conditions, but declined in comparison with non cross-mapped trials, further suggesting that properties of the individual items were retained and considered during processing of the abstract relations.

Item and relational processing are often presumed to be psychologically distinct (e.g., Penn et al. 2008), but the current study and other published investigations demand reconsideration of this presumption. Although our baboons appeared to focus on item-based information early in the category learning process, training with a large number of exemplars promoted a relational shift in information processing perhaps due to the increased salience of the relational structure of the stimuli in Rein and Markman's (2010) task. Nevertheless, even when relational control had been firmly established, the balance between item and relational processing could be altered by modifying the informativeness of item and relation information (see our Experiment 2 as well as Fagot and Thompson 2011). Such flexibility suggests a more intimate and intricate interplay between these sources of stimulus control in higher-order cognitive processing than many authors have envisioned—in both humans and nonhuman animals.

Acknowledgments JF and AM were funded by Grant ANR-2010-BLANC-1908-01 (project Anafonex). AM was supported by a grant from the "Société Francophone de Primatologie." JF was further supported a EuprimNet-II grant from the European Council. This research was conducted at the Rousset-sur-Arc primate center (CNRS-UPS846). The authors thank J. C. Marin, J. Di Grandi, and D. Paleressompouille for their technical assistance. Caralyn Kemp is acknowledged for her revision of the manuscript. We especially thank Jon Rein for providing us with several of the experimental stimuli from the Rein and Markman (2010) study.

Conflict of interest The authors declare that they have no conflict of interest.

Ethical Standard This research adhered to the French principles for ethical treatment for Nonhuman primates and received approval from the Provence Alpes Côte d'Azur Ethics committee for animal experimental research.

Appendix 1

See Table 1.

Table 1 Individual baboon performance in baseline and in the four transfer conditions for the three phases of Experiment 1

Subjects	Baseline	Novel configuration	Switched objects	Novel objects	No. objects No. backgrounds
<i>Phase 1</i>					
ARIELLE	85.83*	76.67*	56.67	46.67	60
BOBO	77.18*	60	66.67	34.48	55.17
DAN	92.93*	96.67*	53.33	53.33	43.33
DORA	95.47*	96.67*	33.33	63.33	46.67
DREAM	85.20*	73.33*	60	76.67*	40
EWINE	82.80*	86.67*	40	63.33	53.33
FANA	85.77*	80*	32.14	55.17	53.33
FELIPE	75.84*	66.67	43.33	60	50
FEYA	79.48*	62.96	64.29	37.04	51.72
FILO	86.19*	70.00*	70.00*	50	53.57
FLUTE	80.29*	51.85	60.71	65.38	35
VIOLETTE	88.27*	86.67*	50	63.33	43.33
VIVIEN	80.00*	80.00*	50	73.33*	46.67
Mean	84.25*	76.01*	52.34	57.08	48.63
<i>Phase 2</i>					
ARIELLE	85.35*	69.44*	38.89	63.89	52.78
BOBO	78.11*	60	61.11	66.67	72.22*
DAN	80.25*	72.22*	72.22*	69.44*	63.89
DORA	85.79*	88.89*	33.33	69.44*	66.67
DREAM	75.00*	61.11	27.78*	47.22	58.33
EWINE	79.21*	66.67	77.78*	63.89	61.11
FANA	74.79*	75.00*	38.89	55.56	48.57
FELIPE	84.49*	66.67	33.33	69.44*	48.57
FEYA	88.05*	72.22*	61.11	58.33	55.56
FILO	84.04*	77.78*	47.22	86.11*	61.11
FLUTE	90.03*	69.23*	69.44*	75.00*	52.38
VIOLETTE	70.94*	72.22*	50	61.11	41.67
VIVIEN	80.51*	75.00*	31.43	66.67	47.22
Mean	81.27*	71.27*	49.43	65.60*	56.16*
<i>Phase 3</i>					
ARIELLE	82.18*	66.67	77.78*	91.67*	62.86
BOBO	81.53*	72.22*	85.71*	83.33*	66.67
DAN	80.11*	66.67	76.47*	80.00*	75.00*
DORA	81.19*	63.89	80.56*	83.33*	72.22*
DREAM	84.18*	51.43	88.57*	85.71*	88.57*
EWINE	86.01*	55.56	86.11*	86.11*	83.33*
FANA	85.92*	44.44	83.33*	80.00*	72.22*
FELIPE	80.37*	52.78	69.44*	86.11*	75.00*
FEYA	77.38*	63.89	80.56*	91.67*	66.67
FILO	80.37*	69.44*	83.33*	80.00*	69.44*
FLUTE	85.71*	58.33	83.33*	88.89*	85.29*
VIOLETTE	80.36*	61.11	77.78*	91.67*	77.14*
VIVIEN	82.64*	66.67	88.89*	83.33*	88.89*
Mean	82.15*	61.01*	81.68*	85.53*	75.64*

Reliably above-chance performance for each individual and at the group level was inferred from binomial tests and one-sample *t* tests, respectively

* $p < .05$

Appendix 2

See Table 2.

Table 2 Individual baboon performance in baseline and in the four transfer conditions of Experiment 2

Subjects	Baseline	Novel configuration	Switched objects	Novel objects	No. objects No. backgrounds
ARIELLE	98.33*	82.35*	83.33*	100.00*	66.67
BOBO	93.27*	94.44*	75.00*	94.44*	69.44*
DAN	91.58*	96.88*	83.33*	88.89*	69.44*
DORA	97.44*	94.44*	80.00*	72.22*	68.57
DREAM	98.89*	91.67*	86.11*	91.67*	50
EWINE	98.74*	94.44*	94.12*	94.44*	77.78*
FANA	95.67*	88.89*	83.33*	97.22*	83.33*
FELIPE	90.84*	61.11	77.78*	69.44*	69.44*
FEYA	95.99*	68.57	88.89*	65.71	50
FILO	98.77*	75.00*	94.44*	91.67*	82.86*
FLUTE	98.77*	74.29*	100.00*	91.67*	75.00*
VIOLETTE	95.55*	80.56*	69.44*	91.67*	55.56
VIVIEN	98.03*	97.06*	84.85*	93.33*	60
Mean	96.30*	84.59*	84.66*	87.88*	67.55*

Reliably above-chance performance for each individual and at the group level was inferred from binomial tests and one-sample *t* tests, respectively

* $p < .05$

References

- Blaisdell AP, Cook RG (2005) Two-item same-different concept learning in pigeons. *Learn Behav* 33(1):67–77. doi:10.3758/BF03196051
- Bodily KD, Katz JS, Wright AA (2008) Matching-to-sample abstract-concept learning by pigeons. *J Exp Psychol Anim Behav Process* 34(1):178. doi:10.1037/0097-7403.34.1.178
- Bonté E, Flemming T, Fagot J (2011) Executive control of perceptual features and abstract relations by baboons (*Papio papio*). *Behav Brain Res* 222(1):176–182. doi:10.1016/j.bbr.2011.03.034
- Castro L, Kennedy PL, Wasserman EA (2010) Conditional same-different discrimination by pigeons: acquisition and generalization to novel and few-item displays. *J Exp Psychol Anim Behav Process* 36(1):23
- Christie S, Gentner D (2007) Relational similarity in identity relation: the role of language. In: Vosniadou S, Kayser D (eds) *Proceedings of the second European cognitive science conference*. Taylor & Francis, London, pp 601–666
- Cook R, Wasserman EA (2012) Relational discrimination learning in pigeons. In: Zentall TR, Wasserman EA (eds) *Oxford handbook of comparative cognition*. Oxford University Press, New York, pp 533–551
- Fagot J, Bonté E (2010) Automated testing of cognitive performance in monkeys: use of a battery of computerized test systems by a troop of semi-free-ranging baboons (*Papio papio*). *Behav Res Method* 42(2):507–516. doi:10.3758/brm.42.2.507
- Fagot J, Maugard A (2013) Analogical reasoning in baboons (*Papio papio*): flexible reencoding of the source relation depending on the target relation. *Learn Behav*. doi:10.3758/s13420-012-0101-7
- Fagot J, Paleressompouille D (2009) Automatic testing of cognitive performance in baboons maintained in social groups. *Behav Res Method* 41(2):396–404. doi:10.3758/brm.41.2.396
- Fagot J, Parron C (2010) Relational matching in baboons (*Papio papio*) with reduced grouping requirements. *J Exp Psychol Anim Behav Process* 36(2):184–193. doi:10.1037/a0017169
- Fagot J, Thompson RKR (2011) Generalized relational matching by guinea baboons (*Papio papio*) in two-by-two-item analogy problems. *Psychol Sci* 22(10):1304–1309. doi:10.1177/0956797611422916
- Fagot J, Wasserman EA, Young ME (2001) Discriminating the relation between relations: the role of entropy in abstract conceptualization by baboons (*Papio papio*) and humans (*Homo sapiens*). *J Exp Psychol Anim Behav Process* 27(4):316–328. doi:10.1037/0097-7403.27.4.316
- Falkenhainer B, Forbus KD, Gentner D (1989) The structure-mapping engine: algorithm and examples. *Artif Intell* 41(1):1–63. doi:10.1016/0004-3702(89)90077-5
- Flemming TM, Thompson RKR, Beran MJ, Washburn DA (2011) Analogical reasoning and the differential outcome effect: transitory bridging of the conceptual gap for rhesus monkeys (*Macaca mulatta*). *J Exp Psychol Anim Behav Process* 37:353–360
- Gentner D (1988) Metaphor as structure mapping: the relational shift. *Child Dev* 59(1):47–59. doi:10.1111/1467-8624.ep10513968
- Gentner D, Markman AB (1997) Structure mapping in analogy and similarity. *Am Psychol* 52(1):45–56. doi:10.1037/0003-066X.52.1.45
- Gentner D, Toupin C (1986) Systematicity and surface similarity in the development of analogy. *Cogn Sci* 10(3):277–300. doi:10.1016/s0364-0213(86)80019-2

- Gibson BM, Wasserman EA (2003) Pigeons learn stimulus identity and stimulus relations when both serve as redundant, relevant cues during same-different discrimination training. *J Exp Psychol Anim Behav Process* 29(1):84–91. doi:10.1037/0097-7403.29.1.84
- Gibson BM, Wasserman EA (2004) Time-course of control by specific stimulus features and relational cues during same-different discrimination training. *Learn Behav* 32(2):183–189. doi:10.3758/bf03196019
- Gick ML, Holyoak KJ (1983) Schema induction and analogical transfer. *Cogn Psychol* 15(1):1–38. doi:10.1016/0010-0285(83)90002-6
- Gillan DJ, Premack D, Woodruff G (1981) Reasoning in the chimpanzee. 1. Analogical reasoning. *J Exp Psychol Anim Behav Process* 7(1):1–17
- Goswami U, Brown AL (1990a) Higher-order structure and relational reasoning: contrasting analogical and thematic relations. *Cognition* 36(3):207–226. doi:10.1016/0010-0277(90)90057-Q
- Goswami U, Brown AL (1990b) Melting chocolate and melting snowmen: analogical reasoning and causal relations. *Cognition* 35(1):69–95. doi:10.1016/0010-0277(90)90037-K
- Goujon A, Fagot J (2013) Learning of spatial statistics in nonhuman primates: contextual cueing in baboons (*Papio papio*). *Behav Brain Res* 247:101–109. doi:10.1016/j.bbr.2013.03.004
- Halford GS, Wilson WH, Guo J, Gayler RW, Wiles J, Stewart JEM (1994) Connectionist implications for processing capacity limitations in analogies. In: Holyoak KJ, Barnden JA (eds) *Analogical connections: advances in connectionist and neural computation theory*, vol 2. Ablex Publishing Westport, CT, pp 363–415
- Herrnstein RJ (1990) Levels of stimulus control: a functional approach. *Cognition* 37(1–2):133–166. doi:10.1016/0010-0277(90)90021-B
- Holland JH, Holyoak KJ, Nisbett RE, Thagard P (1989) *Induction: processes of inference, learning, and discovery*. Bradford Books/MIT Press, Cambridge, MA
- Homa D, Vosburgh R (1976) Category breadth and the abstraction of prototypical information. *J Exp Psychol Hum Learn Mem* 2(3):322–330. doi:10.1037/0278-7393.2.3.322
- Hummel JE, Holyoak KJ (1997) Distributed representations of structure: a theory of analogical access and mapping. *Psychol Rev* 104(3):427–466. doi:10.1037//0033-295x.104.3.427
- Katz J, Wright A (2006) Same/different abstract-concept learning by pigeons. *J Exp Psychol Anim Behav Process* 32(1):80–86. doi:10.1037/0097-7403.32.1.80
- Katz JS, Wright AA, Bachevalier J (2002) Mechanisms of same-different abstract-concept learning by rhesus monkeys (*Macaca mulatta*). *J Exp Psychol Anim Behav Process* 28(4):358–368. doi:10.1037//0097-7403.28.4.358
- Kotovsky L, Gentner D (1996) Comparison and categorization in the development of relational similarity. *Child Dev* 67(6):2797–2822. doi:10.1111/j.1467-8624.1996.tb01889.x
- Kroger JK, Holyoak KJ, Hummel JE (2004) Varieties of sameness: the impact of relational complexity on perceptual comparisons. *Cogn Sci* 28(3):335–358. doi:10.1016/j.cogsci.2003.06.003
- Loewenstein J, Thompson L, Gentner D (1999) Analogical encoding facilitates knowledge transfer in negotiation. *Psychon Bull Rev* 6(4):586–597. doi:10.3758/bf03212967
- Markman AB, Gentner D (1993) Structural alignment during similarity comparisons. *Cogn Psychol* 25:431–467. doi:10.1006/cogp.1993.1011
- Maugard A, Marzouki Y, Fagot J (2013) Contribution of working memory processes to relational matching-to-sample performance in baboons (*Papio papio*). *J Comp Psychol*. doi:10.1037/a0032336
- Morgan CL (1896) *An introduction to comparative psychology*. Walter Scott Ltd., London
- Murphy GL, Smith EE (1982) Basic-level superiority in picture categorization. *J Verbal Learn Verbal Behav* 21(1):1–20. doi:10.1016/S0022-5371(82)90412-1
- Nakagawa E (1993) Matching and nonmatching concept learning in rats. *Psychobiology* 21(2):142–150
- Oden DL, Thompson RK, Premack D (1990) Infant chimpanzees spontaneously perceive both concrete and abstract same/different relations. *Child Dev* 61(3):621–631. doi:10.1111/j.1467-8624.1990.tb02807.x
- Penn DC, Holyoak KJ, Povinelli DJ (2008) Darwin's mistake: explaining the discontinuity between human and nonhuman minds. *Behav Brain Sci* 31(2):109–178. doi:10.1017/s0140525x08003543
- Pepperberg IM (1987) Acquisition of the same/different concept by an African Grey parrot (*Psittacus erithacus*): learning with respect to categories of color, shape, and material. *Anim Learn Behav* 15(4):423–432. doi:10.3758/bf03205051
- Pietrzykowska B, Soetysik S (1975) Transfer of the “same-different” differentiation task in dogs. *Acta Neurobiol Exp* 35(1):39–50
- Ramscar M, Pain H (1996) Can a real distinction be made between cognitive theories of analogy and categorization? In: *Proceedings of the 18th annual conference of the cognitive science society*. Erlbaum, Hillsdale, NJ, pp 346–351
- Rein JR, Markman AB (2010) Assessing the concreteness of relational representation. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 36(6):1452–1465. doi:10.1037/a0021040
- Richland LE, Morrison RG, Holyoak KJ (2006) Children's development of analogical reasoning: insights from scene analogy problems. *J Exp Child Psychol* 94(3):249–273. doi:10.1016/j.jecp.2006.02.002
- Ross BH (1987) This is like that: the use of earlier problems and the separation of similarity effects. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 13(4):629–639. doi:10.1037/0278-7393.13.4.629
- Ross BH (1989) Distinguishing types of superficial similarities: different effects on the access and use of earlier problems. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 15(3):456–468. doi:10.1037/0278-7393.15.3.456
- Soto FA, Wasserman EA (2010) Missing the forest for the trees: object-discrimination learning blocks categorization learning. *Psychol Sci* 21(10):1510–1517. doi:10.1177/0956797610382125
- Tomikawa SA, Dodd DH (1980) Early word meanings: perceptually or functionally based? *Child Dev* 51(4):1103–1109. doi:10.1111/1467-8624.ep12334326
- Truppa V, Garofoli D, Castorina G, Piano Mortari E, Natale F, Visalberghi E (2010) Identity concept learning in matching-to-sample tasks by tufted capuchin monkeys (*Cebus apella*). *Anim Cogn* 13(6):835–848. doi:10.1007/s10071-010-0332-y
- Vonk J (2003) Gorilla (*Gorilla gorilla gorilla*) and Orangutan (*Pongo abelii*) understanding of first and second order relations. *Anim Cogn* 13:77–86. doi:10.1007/s10071-003-0159-x
- Vosniadou S, Ortony A (1989) *Similarity and analogical reasoning*. Cambridge University Press, New York
- Wasserman EA, Castro L (2012) How special is sameness for pigeons and people? *Anim Cogn* 15(5):891–902. doi:10.1007/s10071-012-0516-8
- Wasserman EA, Young ME (2010) Same-different discrimination: the keel and backbone of thought and reasoning. *J Exp Psychol Anim Behav Process* 36(1):3–22. doi:10.1037/a0016327
- Wasserman EA, Hugart JA, Kirkpatricksteger K (1995) Pigeons show same-different conceptualization after training with complex visual-stimuli. *J Exp Psychol Anim Behav Process* 21(3):248–252. doi:10.1037/0097-7403.21.3.248

- Wasserman EA, Fagot J, Young ME (2001) Same-different conceptualization by baboons (*Papio papio*): the role of entropy. *J Comp Psychol* 115(1):42–52. doi:[10.1037//0735-7036.115.1.42](https://doi.org/10.1037//0735-7036.115.1.42)
- Wasserman EA, Castro L, Freeman JH (2012) Same-different categorization in rats. *Learn Mem* 19(4):142–145. doi:[10.1101/lm.025437.111](https://doi.org/10.1101/lm.025437.111)
- Wright AA, Katz JS (2006) Mechanisms of same/different concept learning in primates and avians. *Behav Process* 72(3):234–254. doi:[10.1016/j.beproc.2006.03.009](https://doi.org/10.1016/j.beproc.2006.03.009)
- Wright A, Rivera J, Katz J, Bachevalier J (2003) Abstract-concept learning and list-memory processing by capuchin and rhesus monkeys. *J Exp Psychol Anim Behav Process* 29(3):184–198. doi:[10.1037/0097-7403.29.3.184](https://doi.org/10.1037/0097-7403.29.3.184)
- Zentall TR, Wasserman EA, Lazareva OF, Thompson RKR, Rattermann MJ (2008) Concept learning in animals. *Comp Cogn Behav Rev* 3:13–45. doi:[10.3819/ccbr.2008.30002](https://doi.org/10.3819/ccbr.2008.30002)

Article II – Stratégie de résolution d’une tâche d’appariement relationnel chez le babouin : Implication de la mémoire de travail et raisonnement par analogie

Contribution of working memory processes to relational matching-to-sample performance in baboons (*Papio papio* ; Maugard, Marzouki, & Fagot, 2013)

La majorité des études sur le raisonnement par analogie chez les primates non humains ont utilisé des tâches d’appariement relationnel mettant en jeu des relations d’identité et de différence (Fagot & Parron, 2010 ; Fagot & Thompson, 2011 ; Flemming et al., 2008; Thompson et al., 1997; Truppa et al., 2011 ; Vonk, 2003). Or, bien que cette tâche ait toutes les apparences d’une tâche d’analogie, un débat persiste quant à la nature exacte des traitements cognitifs qu’elle implique (Penn et al., 2008).

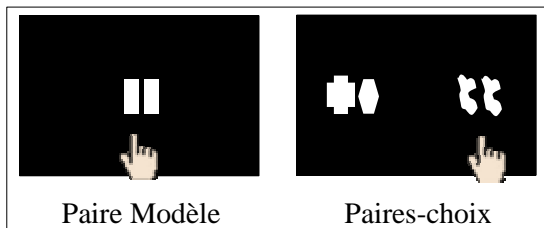
Chez l’homme, le raisonnement par analogie mobilise beaucoup de ressources en mémoire de travail du fait des multiples niveaux d’intégration qu’il implique (Halford et al., 1998). Les performances dans des tâches d’analogie sont donc diminuées lorsque des tâches interférentes sont introduites dans les paradigmes de test pour surcharger la mémoire de travail (Morrison, Holyoak, & Truong, 2001 ; Waltz, Lau, Grewal, & Holyoak, 2000).

Aucune étude ne s’est encore intéressée à l’implication de la mémoire de travail dans les processus mis en jeu lors de la résolution de tâches d’analogie chez le singe. L’objectif de cette étude est donc de (1) caractériser l’effet d’une surcharge de la mémoire de travail lors de la résolution d’une tâche d’appariement relationnel chez les babouins pour (2) déterminer la stratégie cognitive qu’ils utilisent dans cette activité.

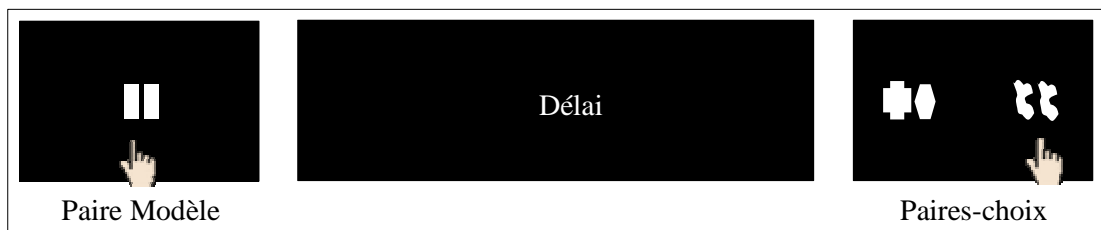
Nous avons testé 10 babouins avec une tâche d’appariement relationnel informatisée mettant en jeu des paires de formes, dans trois conditions induisant des charges différentes en mémoire de travail (Figure 32). La condition 1 « sans surcharge » correspond à une tâche

d'appariement relationnel classique impliquant la présentation successive d'une paire modèle et de deux paires-choix. Dans la condition 2 « avec faible surcharge », nous avons introduit un simple délai entre la présentation de la paire modèle et des paires-choix. Dans la condition 3 « avec forte surcharge », nous avons introduit une tâche interférente, mobilisant des ressources en mémoire de travail, entre la présentation de la paire modèle et des paires-choix.

A. Condition 1



B. Condition 2



C. Condition 3

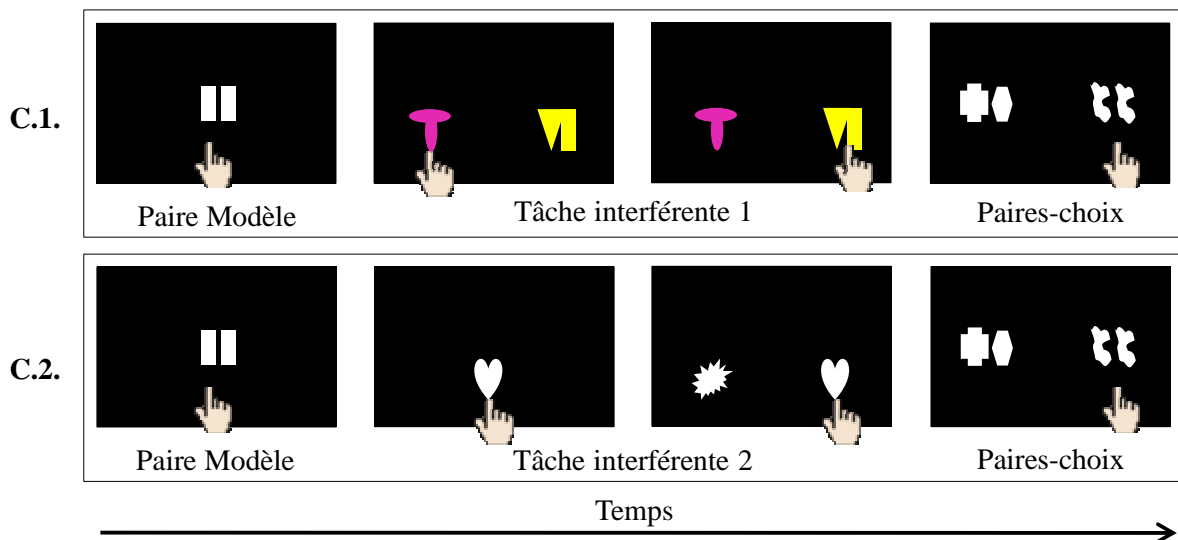


Figure 32. Illustration des trois conditions de test induisant différentes charges en mémoire de travail. A. La condition 1 « sans surcharge » correspond à une tâche d'appariement relationnel classique. B. Dans la condition 2 « avec faible surcharge », un délai est introduit entre la présentation du modèle et des paires-choix. C. Dans la condition 3, une tâche interférente est introduite entre la présentation du modèle et des paires-choix. Dans cette condition, nous avons testé l'effet de deux tâches interférentes (C.1. et C.2.).

Les résultats dans ces trois conditions montrent que la surcharge de la mémoire de travail tend à impacter davantage les performances des singes dans les essais impliquant une relation de différence, que dans les essais de type « identique ». Ce profil de performance laisse entendre que les singes ne traitent pas seulement les paires d'objets en termes de variabilité perceptive comme le suggère Penn et al. (2008). En effet, la stratégie proposée par Penn et al. (2008) n'implique qu'un codage binaire de la relation qui consiste à coder si les paires d'objets à catégoriser sont hétérogènes (valeur d'entropie = 0) ou homogènes (valeur d'entropie >1) d'un point de vue perceptif. Ce type de codage à faible charge mnésique ne devrait pas être influencé par une surcharge de la mémoire de travail, et ne devrait pas affecter différenciellement les relations d'identité ou de différence. Nos résultats suggèrent au contraire que les babouins emploient bien une stratégie impliquant le traitement des objets constituant les paires, complété d'une prise en compte de leurs relations. Elle nécessite donc bien l'intégration d'informations à plusieurs niveaux (i.e., perceptif et conceptuel), ce que l'on observe également chez l'homme dans des tâches d'analogie.

Contribution of Working Memory Processes to Relational Matching-to-Sample Performance in Baboons (*Papio papio*)

Anaïs Maugard, Yousri Marzouki, and Joël Fagot
Aix-Marseille University

Recent studies of monkeys and apes have shown that these animals can solve relational-matching-to-sample (RMTS) problems, suggesting basic abilities for analogical reasoning. However, doubts remain as to the actual cognitive strategies adopted by nonhuman primates in this task. Here, we used dual-task paradigms to test 10 baboons in the RMTS problem under three conditions of memory load. Our three test conditions allowed different predictions, depending on the strategy (i.e., flat memorization of the percept, reencoding of the percept, or relational processing) that they might use to solve RMTS problems. Results support the idea that the baboons process both the items and the abstract (same and different) relations in this task.

Keywords: monkeys, analogy, working memory, dual task

Analogical reasoning is a fundamental and ubiquitous aspect of human thought. It is at the core of a variety of cognitive processes of considerable adaptive significance, such as categorization (Ramscar & Pain, 1996), inductive inference (Holland, Holyoak, Nisbett, & Thagard, 1989), and more generally the ability to develop a flexible body of knowledge (Brown, Kane, & Echols, 1986). Technically, analogical reasoning implies judgments of relations between relations. When confronted with analogy problems, the participant must first represent the relation between the items of a source domain, for instance, between a rocket and a moped, in order to subsequently recognize that relation in a target domain, such as between a rabbit and a turtle. Reasoning by analogy therefore implies a sense of sameness as well as the coding of the relational similarity between the source and the target domains.

Analogical reasoning has long been considered the hallmark of human cognition, presumably permitted by our linguistic skills (Christie & Gentner, 2007), but experimental data collected over the last three decades has suggested that our closest primate relatives can also judge similarities between relations. Several experimental procedures have been used for that purpose. Thus, Gillan, Premack, and Woodruff (1981) employed an AB:C? pro-

cedure with a language-trained female chimpanzee, and documented her ability to correctly choose from a set of alternatives the correct D item that completed the analogy. Analogy-making has also been studied in great apes using spatial analogical problems (Haun & Call, 2009; Hribar, Haun, & Call, 2011). After observing a reward being hidden in a first array of three cups, the apes could use spatial relational similarity to locate a food item in a different set of three cups.

However, researchers in this domain have most commonly used the relational matching-to-sample (RMTS) task (Fagot & Maugard, 2013; Fagot & Parron, 2010; Flemming, Beran, & Washburn, 2007; Flemming, Thompson, & Fagot, 2013; Premack, 1983; Thompson, Oden, & Boysen, 1997; Vonk, 2003; Washburn, Thompson, & Oden, 1997). The RMTS task implies that the subject initially perceives two sample items that are either identical (*same* relation) or different (*different* relation). After an exploration period, it perceives two other stimulus pairs, one showing the same (same or different) relation as the sample pair and the other the alternative relation. Because the items in the comparison pairs all differ from the items in the sample pair, matching responses imply the consideration of relational cues. Recent studies have shown that apes (Flemming, Beran, Thompson, Kleider, & Washburn, 2008; Thompson et al., 1997; Vonk, 2003), baboons (Fagot & Thompson, 2011), and one capuchin monkey (Truppa, Mortari, Garofoli, Privitera, & Visalberghi, 2011) successfully learned this RMTS task when it involved pairs of shapes to represent the stimulus relations. Success in the RMTS task suggests that these animals matched relations with relations and that this ability may be the cognitive foundation for analogical reasoning (Fagot & Thompson, 2011).

Although the above RMTS task has all the appearance of a relational task, debate remains over the exact nature of the cognitive processes involved in this task. Penn, Holyoak, and Povinelli (2008) recently questioned the validity of the RMTS task to study analogical reasoning. They argued that nonhuman primates might only pay attention to the perceptual variability of the stimulus pairs, without considering the pairs' constituent elements as enti-

This article was published Online First June 17, 2013.

Anaïs Maugard, Yousri Marzouki, and Joël Fagot, Laboratory of Cognitive Psychology, CNRS, Aix-Marseille University, Marseille, France.

Supported by Project Anafonex (Grant No. ANR-2010-BLANC-1908-01), the Provence Regional Council (research grant Projet Exploratoire), and the European Council (EuprimNet-II grant). We thank J. C. Marin, J. Di Grandi, and D. Paleressompouille for technical assistance. We acknowledge Timothy Flemming for stimulating discussions on preliminary data, as well as Caralyn Kemp and Edward A. Wasserman for their revision of the manuscript.

Correspondence concerning this article should be addressed to Joël Fagot, Laboratory of Cognitive Psychology, CNRS, Aix-Marseille University, Fédération de recherche 3C, 3 place Victor Hugo, Bât B, Case D, 13331 Marseille Cedex, France. E-mail: joel.fagot@univ-amu.fr

ties and, consequently, the relations that these entities instantiate. In other words, nonhuman primates might use the following cognitive strategy: If the variability of the sample display (taken as a whole) is low, then select the choice display with low variability, and vice-versa for high variability sample displays. This “variability” hypothesis is inspired by numerous data that have shown the entropy of the stimulus displays (an information-theoretic measure of the stimulus’ variability¹) robustly controls the behavior of pigeons and nonhuman primates in both same–different (Cook, Katz, & Cavoto, 1997; Wasserman, Fagot, & Young, 2001; Wasserman, Hugart, & Kirkpatrick-Steger, 1995; Wasserman, Young, & Fagot, 2001; Young & Wasserman, 1997) and relational matching tasks (e.g., Fagot, Wasserman, & Young, 2001).

Processing relations is much more complex than a strict comparison of displays along a “high” versus “low” variability dimension, because relation-based responses imply a complementary processing of the items and their relations, rather than only processing perceptual wholes. In analogy tasks, the complementary encoding of the items and their relations is demonstrated by the dramatic negative effect observed in people when one item of the source pair is also present in the negative relational pair, when the participant has to ignore object similarity to solve the analogy (e.g., the cross-mapping procedure; see Gentner & Toupin, 1986; Markman & Gentner, 1993).

Support for complementary processing of items and relations was further provided by a recent study with humans (Rein & Markman, 2010). In this study, participants viewed relational displays in which some shapes illustrated different patterns (e.g., vertical or horizontal lines) displayed on backgrounds composed of other shapes. People had trouble generalizing their abstract judgments of these patterns when the role played by the shapes was changed in the displays. This result suggests that people’s representations of abstract relations preserved information on the concrete shapes.

Interestingly, several studies have shown that processing the relations in analogy tasks by people is highly demanding in terms of working memory (WM) resources, and it requires a sufficiently large memory span to process the items and their relations in these tasks (Halford, Wilson, & Phillips, 1998). A review of relevant evidence has revealed that: (a) the performance of humans on analogical tasks is reduced when dual tasks are introduced to load their WM (Morrison, Holyoak, & Truong, 2001; Waltz, Lau, Grewal, & Holyoak, 2000); (b) WM capacity and analogical reasoning ability develop simultaneously during childhood (Gathercole, Pickering, Ambridge, & Wearing, 2004; Scholnick, 2008); (c) the prefrontal cortex involved in WM (Glahn et al., 2002; Goldman-Rakic, 1987) is also involved in the processing of analogical tasks (Waltz et al., 1999; Wharton et al., 2000); and, finally (d) computational models of analogical mapping, such as the STAR model of Halford et al. (1994) and the LISA model of Hummel and Holyoak (1997) postulate that there are inherent limitations in analogy-making due to WM limits.

Regarding monkeys, there is thus far no study on the contribution of WM to processing analogies. However, two of our most recent findings have suggested that baboons (*Papio papio*) may have sufficient WM resources to process analogies, although WM capacity is admittedly more limited in nonhuman primates than in humans (Elmore et al., 2011). Thus, Fagot and De Lillo (2011) tested baboons in an analog of the Corsi task (Corsi, 1972), in

which the animals had to reproduce on the screen a sequence of items in an appropriate serial order. Monkeys showed a memory span of four to five items in the task, depending on the subjects (see Botvinick et al., 2009; Wright, 2007, for similar findings on macaques). Although smaller than the memory span of humans tested in the same study (Fagot & De Lillo, 2011), a memory span of four items appears large enough to process two sets of two items within WM, and therefore to process analogies.

Another constraint of analogical reasoning is that subjects must be able to remember the characteristics of the first set of items (source domain), when processing the second set (target domain), in order to later compare the relations illustrated by these two domains. This ability also appears within the scope of baboons. Thus, Rey, Perruchet, and Fagot (2012) recently showed that baboons can embed the processing of two stimulus pairs in an ABBA structure. Baboons can process the first item of a pair, and then process the second pair, to finally resume the processing of the second item of the initial pair. Of course, having a flexible WM system does not imply that the monkeys use that system for relational thinking. In summary, monkeys appear to have a sufficiently large memory span to process and compare several items at once in the RMTS task. Moreover, they demonstrate a flexible use of their memory in which the processing of the stimuli can be suspended and then resumed to adapt to the constraints of the task. Although these findings suggest that they have sufficient WM resources to solve analogy problems, this ability has to be confirmed by experimental data.

In principle, three possible strategies can be used by nonhuman primates to solve the RMTS task. One possible strategy is to memorize the sample items as wholes, in order to match the sample and comparison pairs that have the same overall perceptual structure (e.g., perceptual variability) as the sample. The second strategy is to reencode the perceptual structure of the stimuli with a binary code, whatever form it takes (e.g., high vs. low variability), and to match the codes associated with the sample and comparison pairs (rather than the percepts) to find the correct response. The third strategy implies that the baboons process both the items and their relations in the task, and solve RMTS with relational cues.

The current study capitalized on the WM load of relational tasks to test the above three hypotheses. In Experiment 1, baboons were tested in three test conditions involving different memory loads. The first test condition consisted of a zero-delay RMTS task (zero-delay condition) similar to that used by Fagot and Thompson (2011, Experiment 2, baseline trials). The second test condition (dual-serial task condition) introduced a dual task between the presentation of the sample and comparison displays of the RMTS task. The third test condition (delayed condition) replaced the dual task with a delay that had the same duration as the initial dual task.

Different predictions can be derived from these three test conditions, depending on the strategy used by the baboons to solve the

¹ This literature often considers entropy to be synonymous with *perceptual variability* (e.g., Penn et al., 2008), but note that this is misleading. The concept of entropy derives from information theory and describes the informativeness of a stimulus, whatever the nature of the information (perceptual or not) conveyed by this stimulus. Entropy variations therefore do not necessarily imply that the source of the variation is purely perceptual; they only demonstrate that the informativeness of the displays varies.

RMTS task. These predictions are illustrated in Figure 1. First, assuming that the baboons memorize the sample pairs as wholes (Hypothesis 1), we would expect that their performance on the zero-delay condition should be greater for the different than for the same trials, because the baboons have more perceptual information to rely on for correct matching in these former trials. Because memorization of the greatest amount of information for the different displays should be affected by reduced memory resources, we also complementarily expected a performance decline with an increased memory load that would be of greater amplitude for the different trials than for the same trials. The curves for same and different trials should therefore cross. Second, assuming that the baboons reencode the whole percepts using a binary code (e.g., low vs. high variability, Hypothesis 2), performance on same and different trials should remain equal within each condition of memory load, with no interaction between these factors. This prediction should hold because the codes for “same” should not occupy more space in WM than the complementary code for “different,” whatever form it takes. Performance might, however, optionally decline in a parallel fashion for same and different trials with an increased memory load, due to memory decay (delayed condition) or reduced WM resources (dual-serial task condition). Finally, assuming relational encoding of the task (Hypothesis 3), the monkeys should exhibit higher performance on same than on different trials in the zero-delay condition. This prediction follows from the fact that the relation of sameness is more exclusive than the relation of differentness (Wasserman & Young, 2010), thereby making it easier to match. Due to memory decay (delayed condition) or to reduced WM resources (dual-serial task condition), performance should thus decline more dramatically for the inclusive different relation than for the exclusive same relation.²

Two experiments are reported in the current article. Experiment 1, which was aimed at testing the three hypotheses above, will provide support for Hypothesis 3. Experiment 2 will further confirm, with a new dual task, the involvement of WM resources during the RMTS task.

Experiment 1

Experiment 1 was comprised of two tests phases. Test Phase 1 assessed the effect of memory load on RMTS performance. That phase distinguished the zero-delay, dual-serial task, and delayed conditions, which were presented in that order. Test Phase 2 served as a control for a potential test order effects in Test Phase 1.

General Method

Participants. Ten Guinea baboons (*Papio papio*) were tested, including six males and four females, ranging in age from 3–7 years. These baboons had several years of experimental history during which they were tested in a variety of computerized tasks, and they were already familiar with the RMTS task (see Fagot & Thompson, 2011). The baboons lived in a large social group of 30 individuals maintained within a 700 m² outdoor enclosure adjacent to the test booths. Each animal had a microchip implanted in each forearm for automatic identification within the test systems. Baboons were never deprived of food or water, but they did receive their regular daily food ration at 5:00 p.m.

Apparatus. This research used a new experimental system, called the Automated Learning Device for Monkeys (ALDM; see

Fagot & Bonté, 2010; Fagot & Paleressompoulle, 2009), which allows monkeys to be tested on an entirely voluntary basis. In our laboratory, monkeys can freely exit their social group and large enclosure to enter into one of two experimental rooms, each containing five ALDM experimental test systems freely accessible on a 24-hour basis. Each test system is comprised of a test chamber (70 × 70 × 80 cm) that is accessible through an open back entrance, and it is fitted in its innermost front side with a view port (7 × 7 cm) and two hand ports (8 × 5 cm each). Through the view port, the monkeys can readily see a 19-in. LCD touch monitor installed at eye level 25 cm from the port. Introducing one hand through one of the hand ports allows the baboon to interact with the touch screen. Two antennas fixed around each hand port automatically read the microchip on the baboon’s forearm when the animal introduces its hand through a hand port. Numeric identification signals from the arm tags trigger the computer-controlled presentation of the stimulus and assign behavioral measures (i.e., stimulus choices and response times) to each subject. Correct responses are rewarded by a few grains of dry wheat delivered inside the test booth by a homemade dispenser. The experiment was controlled by a customized test program developed by coauthor Fagot with E-Prime, Version 1.2 (Psychology Software Tools, Pittsburgh, PA). With this program, the appropriate stimulus presentation for a given subject can be administered, irrespective of the order in which the baboons spontaneously enter the test booth or the test booth the animal decides to use. Stimulus displays had a resolution of 1024 × 768 pixels.

Stimuli. The stimulus set was comprised of 50 white geometrical shapes (100 × 100 pixels maximum). In Experiment 1, a yellow geometrical shape and a pink one (100 × 100 pixels) were used in addition for the dual task (see below). Experiment 2 also used six novel (100 × 100 pixel) color stimuli for the dual task, using a matching-to-sample (MTS) procedure. All stimuli were drawn on a blue background.

General test procedure. A schematic presentation of the testing procedure is provided in Figure 2. Briefly stated, the trials started when the baboon introduced one hand through a hand port for self-identification. This action triggered the presentation of the test trial assigned to that subject. A sample pair made of either two identical (same relation) or nonidentical (different relation) shapes appeared in the middle of the screen on a blue background immediately after identification. These two shapes were selected randomly from the set of 50 stimulus shapes, and were displayed adjacent to one another, with 4 pixels separating their inner borders. When the baboon touched the sample pair, the sample pair disappeared from the screen and was replaced by two comparison pairs on the horizontal median axis of the screen: one on the left and the other one on the right hemiscreen. One comparison pair instantiated the same relation as the sample (i.e., either the same or different relation, depending on the trial), whereas the other illustrated the alternative relation. The stimulus shapes of the comparison pairs all differed from those of the sample pair, and moreover differed between

² Note that we consider purely relational accounts of the relational matching-to-sample performance, in the absence of perceptual influences, to be nonviable. Our rationale is that the processing of same versus different relations minimally requires an initial processing of the perceptual attributes of the items that illustrate these relations, therefore, opening avenues for perceptual influences on relational judgments.

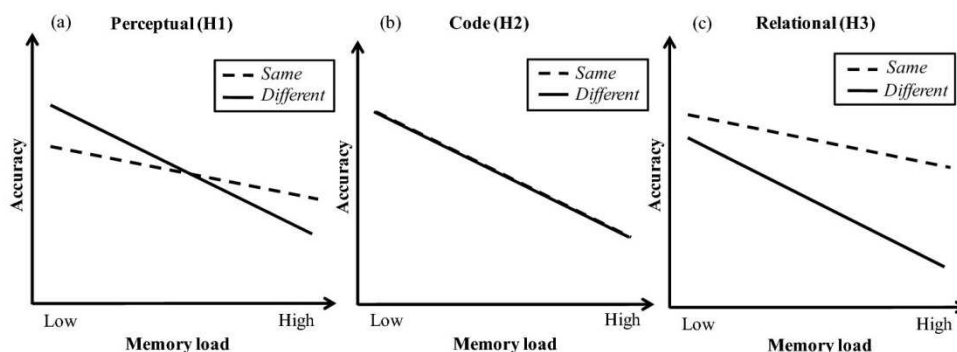


Figure 1. Predictions drawn from our three hypotheses that monkeys process relational matching-to-sample considering purely perceptual (e.g., variability) cues (a), encode the displays to be matched with a binary code (b), or solve the task considering relational (same/different) cues (c). H1 = Hypothesis 1; H2 = Hypothesis 2; H3 = Hypothesis 3.

the positive and the negative comparison pairs. The task required the baboon to touch the comparison pair instantiating the same (same or different) relation as the sample pair. Touching the comparison pair showing the same relation as the sample pair cleared the screen and delivered a food reward. Touching the alternative (incorrect) relation also cleared the screen, but triggered a 3-s time-out indicated by a green screen. The same or different relation shown by the sample varied randomly from one trial to the next; so too did the left and right location of the positive comparison pair on the screen. An intertrial interval of 3 s separated two successive trials, but this delay could be longer because the baboons initiated the trials by themselves. A maximum of 10 s was allowed for the baboons to respond to each

display. The accuracy of the response (correct or incorrect) served as the main dependent variable.

Test Phase 1. The following three conditions were used in Test Phase 1.

Zero-delay condition. The zero-delay condition used the same procedure as described in the General Test Procedure section. Its main feature was that there was no delay between the offset of the sample pair and the onset of the two comparison pairs. It was therefore a zero-delay sequential RMTS task. This condition sought to establish baseline performance, which would be compared with performance obtained in the other two test conditions of memory load. Each baboon performed three consecutive sessions

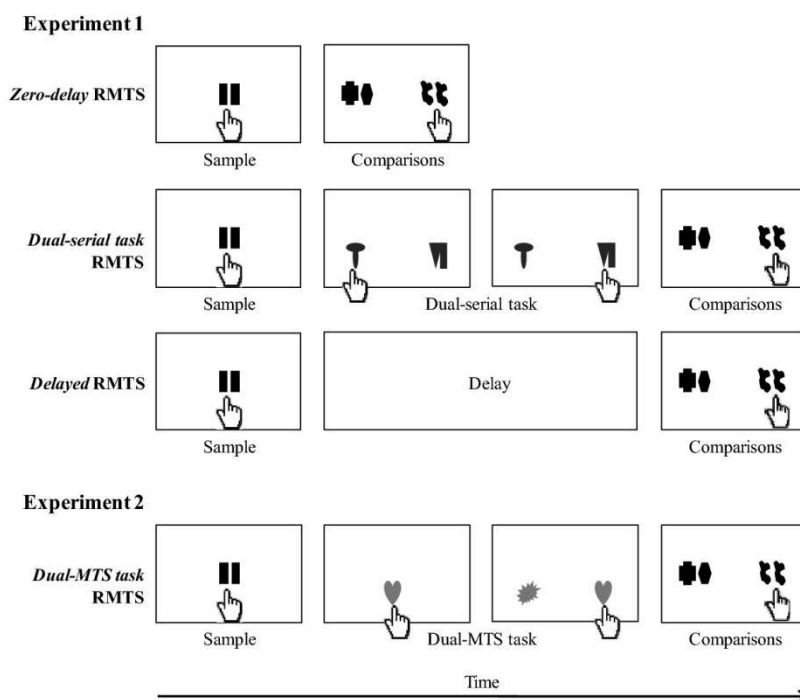


Figure 2. Illustration of the test procedure in each condition. RMTS = relational matching-to-sample.

of 100 randomized trials (50 same trials randomly intermixed with 50 different trials).

Dual-serial task condition. The dual-serial task condition introduced a dual task involving serial touches between the sample and the comparison pairs (see Figure 2). In that condition, immediately after the baboons had touched the sample pair, they perceived a yellow and a pink shape on a blue background located on the horizontal axis at the bottom of the screen, one on the left and the other on the right hemiscreen. Baboons were required to touch the yellow and pink stimuli in that order, irrespective of their randomized left–right location. Touching these two stimuli in the specified order triggered the immediate display of the comparison pairs of the RMTS task; touching them in the incorrect order aborted the trial. All subjects performed this dual task well above chance, with 93.74% accuracy. Aborted trials were excluded from analysis. Each baboon completed four 100-trial sessions in the dual-serial task condition. Sessions were organized as for the zero-delay condition and therefore included 50 same trials mixed with 50 different trials. The reaction time (RT) to complete the dual-task was recorded on each trial.

Delayed condition. The delayed condition used the same RMTS procedure as in the dual-task condition, except that the time interval between the offset of the sample pair and the onset of the comparison pairs was now simply filled with a blue background, during which no action was required from the baboon. The duration of that delay was controlled independently for each participant, and determined as being equal to the median RT to complete the dual task, therefore varying across subjects. Each participant completed four 100-trial test sessions, which had the same design as the test sessions of the zero-delay condition.

Test Phase 2. In Test Phase 1, the dual-serial task condition was presented before the delayed condition. That order was justified by our need to adjust the delay in the delayed condition given the RT of the dual task in the dual-serial task condition. However, a potential pitfall with this procedure is that differences between these conditions can potentially be accounted by an effect of test order. Test Phase 2 aimed to control for an effect of test order. Now, the baboons completed eight 100-trial sessions (four in the dual-serial task condition and four in the delayed condition) presented in a counterbalanced ABBABAAB design. Each session was preceded by 40 warm-up trials involving RMTS zero-delay trials. Because one subject was no longer available for testing, Test Phase 2 was conducted with nine of the 10 previous baboons tested in Test Phase 1.

Pretraining. Because all participants were already familiar with the RMTS task (see Fagot & Thompson, 2011), they only received pretraining with the task prior to the zero-delay condition. Pretraining continued until the baboons achieved 80% correct in three consecutive 40-trial training sessions. It required from two to eight sessions to reach that criterion. Additional training was required to have the baboons learn the dual task. After completing the zero-delay condition, the baboons were presented with displays that only contained the yellow and pink stimuli of the dual task, and were requested to touch them in the correct order to obtain a reward, regardless of their left–right spatial location. Correct trials were rewarded; incorrect trials were followed by a 3-s time-out indicated by a green screen. Training sessions of 100 trials were continually repeated until each baboon reached an accuracy rate of 80% correct or better in three consecutive sessions. We proceeded

to the dual-serial task condition immediately after the animals reached that criterion.

Results

Repeated-measure analyses of variance (ANOVAs) require a normally distributed dependent variable. Thus, arcsine transformations were applied to accuracy data to correct for normality. In Test Phase 1, our analysis considered Trial Type (same, different) and Test Condition (zero-delay, dual-serial task, delayed) as factors in a 2×3 full factorial design. Planned contrasts were used to test the decrease in performance over time as a function of the test condition. In addition, a posteriori comparisons were conducted using Tukey's honestly significant difference (HSD) test. Statistical analyses in Test Phase 2 considered Trial Type (same, different) and Test Condition (dual-serial task, delayed) as factors in a 2×2 full factorial design. Another important issue was to determine whether the group of baboons performed on average above 50% correct in each condition, and for each (same or different) relation. That question was assessed using nonparametric two-tailed z tests. Bonferroni corrections were applied to all of these tests to counteract the problem of multiple comparisons. For all statistical analyses, we discarded trials from the data set if the RT to touch the sample or comparison pairs was greater than 5 s, or if more than 5 s was needed to complete the dual task. This rejection procedure only removed 0.5% of the total trials.

Test Phase 1. The Trial Type (same, different) \times Test Condition (zero-delay, dual-serial task, delayed) repeated-measure ANOVA on accuracy data indicated significant main effects of trial type, $F(1, 9) = 9.2$, $MSE = .017$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .50$, and test condition, $F(2, 18) = 84.5$, $MSE = .004$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .90$. The significant main effect of trial type was reflected by a higher accuracy for the same ($M = 77.85$), 95% confidence interval (CI) [74.05, 81.66], than for the different trial types ($M = 68.84$), 95% CI [62.71, 74.98]. The effect of test condition was analyzed by planned (contrast analyses) comparisons. Accuracy was significantly lower in the dual-serial task condition ($M = 62.31$), 95% CI [55.39, 69.17], than in the delayed condition ($M = 72.96$), 95% CI [68.09, 77.84]; $p < .05$, $F(1, 9) = 27.6$, $MSE = 455.63$, $p < .005$, $\eta_p^2 = .75$. It was also significantly lower in the average of these two latter conditions than in the zero-delay condition ($M = 84.80$), 95% CI [81.75, 87.84], $F(1, 9) = 171.7$, $MSE = 1386.96$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .95$.

The ANOVA further indicated a significant Trial Type \times Test Condition interaction, $F(2, 18) = 4.2$, $MSE = .009$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .32$ (see Figure 3). Post hoc analyses (Tukey HSD tests, $p < .05$) of the same trials showed that the dual-serial task condition induced lower performance ($M = 71.85$), 95% CI [65.41, 78.28], than the zero-delay condition ($M = 85.87$), 95% CI [81.61, 90.13], $p < .05$. By contrast, there was no significant difference for the same trials between the delayed condition ($M = 75.84$), 95% CI [68.60, 83.08], and the other two conditions ($ps > .05$). Results differed for the different trials; the following pattern of results was obtained for these trials: dual-serial task ($M = 52.71$), 95% CI [43.29, 62.13], less than delayed ($M = 70.09$), 95% CI [62.65, 77.54], less than zero-delay condition ($M = 83.73$), 95% CI [78.60, 88.86]. Comparison across conditions showed a higher performance in the same than in the different trials of the dual-

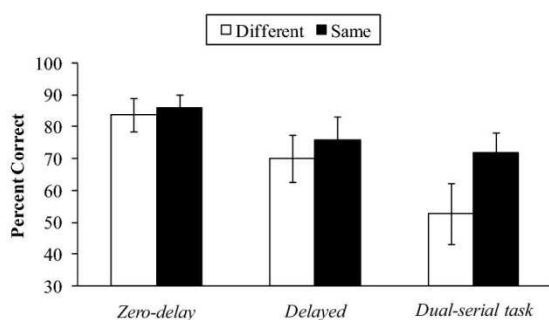


Figure 3. Percent of correct responses for same and different trials under the three test conditions. Note that the test conditions are ordered based on their memory load rather than on test order. Error bars represent 95% confidence intervals.

serial task condition ($p < .05$), but no reliable difference between same and different trials of the remaining two conditions ($p > .05$).

The Bonferroni-corrected two-tailed z tests verified in which of our six test conditions the group of baboons expressed performance significantly greater than 50% correct (i.e., chance level). The group performed reliably above chance in all conditions ($ps < .05$), except in the different trials of the dual-serial task condition ($z = 0.651, p > .05$).

Test Phase 2. Figure 4 illustrates the findings in Test Phase 2. The Trial Type (same vs. different) \times Test Condition (dual-serial task vs. delayed) repeated-measure ANOVA showed a significant main effect of test condition, $F(1, 8) = 26.4, MSE = .009, p < .001, \eta_p^2 = .77$, as well as a significant effect of trial type, $F(1, 8) = 9, MSE = .008, p < .05, \eta_p^2 = .53$. As in Test Phase 1, accuracy was higher in the delayed condition ($M = 78.95$), 95% CI [74.80, 83.09], than in the dual-serial task condition ($M = 64.55$), 95% CI [56.51, 72.58]. The significant main effect of trial type was reflected by a higher accuracy for the same ($M = 75.77$), 95% CI [70.21, 81.34], than for the different trial types ($M = 67.72$), 95% CI [59.39, 76.05]. Note that these two main effects replicated the main effects of Test Phase 1.

Although Figure 4 reveals a performance decline in the different trials of the dual-serial task condition, the Trial Type \times Test Condition interaction only approached significance, $F(1, 8) = 4.2, MSE = .020, p = .07, \eta_p^2 = .35$. Nevertheless, Bonferroni-corrected two-tailed z tests revealed that the group performed above chance in all four test conditions reported in Figure 4 ($ps < .05$), except on the different trials of the dual-serial task condition, $z = 1.191, 95\% \text{ CI } [44.49, 67.30], p > .05$.

Discussion

In Experiment 1, performance in the RMTS task was worsened by the presentation of a dual task between the sample and the choice RMTS pairs, and more so for the different relation than for the same relation. Because test order was a possible confounder in Test Phase 1, the presentation of the dual-serial task and delayed conditions in Test Phase 2 was counterbalanced in several blocks of trials. Findings of Test Phase 2 ruled out the possible influence of test order and confirmed that the dual task remained the most detrimental condition for RMTS performance.

One possible reason for this finding is that the dual task induced an added WM load, limiting the processing of the relational pairs of the RMTS task. According to this hypothesis, the serial processing of the two stimulus items of the dual task would affect the memory of the relational sample pair of the RMTS task, and more so when the RMTS task requires memorization of two different items (i.e., different relation).

Experiment 2

Experiment 1 had one critical limitation because it engaged both long-term and WM memory components. Indeed, long-term memory was involved in this task because the baboons had to touch the two shapes of the dual task in a fixed order, regardless of their actual location on the screen. WM was in turn involved because the task requires the animal to process the two items sequentially and to shift to the second item once the first has been touched.

Experiment 2 used a new dual task to further selectively assess the involvement of WM in RMTS task while limiting long-term memory influences. This new dual task was an MTS task. In our dual-MTS task, the baboons had to find, among two comparison stimuli, the one corresponding to the sample stimulus seen in a previous sample display. This task limited long-term influences, because the sample changed on a trial-to-trial basis (see Hartman, Dumas, & Nielsen, 2001, for a use of the MTS task in studying WM). Note that we had no clear prediction on which dual task (serial or MTS) should more strongly affect RMTS performance. We, however, expected that the two dual tasks would reveal similar response patterns, because they both strongly rely on WM processes.

Method

Participants and apparatus. Experiment 2 involved the same baboons previously used in Test Phase 1 of Experiment 1, except two individuals who declined testing.

Test procedure of the dual-MTS task. Figure 2 illustrates the test procedure. The general design of the trials was identical to the dual-serial task condition of Experiment 1, except that an MTS, rather serial-touching task, was now embedded within the relational sample and comparison pairs of the RMTS task to induce a WM load. In practice, that task implied the following sequence of responses: (a) touch the relational sample pair of the RMTS task;

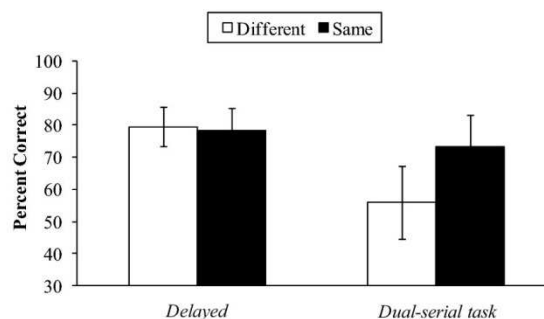


Figure 4. Percent of correct responses for same and different trials in the delayed and dual-serial task conditions of Test Phase 2. Error bars represent 95% confidence intervals.

(b) touch the sample shape of the MTS task, (c) select and touch the comparison shape that matches the sample just seen in b, and (d) select and touch comparison relational pair showing the same relation as the sample pair of the RMTS task. During this process, an incorrect response in the third display aborted the trial, and this trial was not scored. A correct response to that third display provided no immediate reward, but triggered the next (i.e., fourth) display. A food reward was only delivered if the monkeys responded correctly to that fourth display. In the case of an incorrect response to that display, the monkey received a 3-s time-out with no reward.

Each baboon completed four 100-trial sessions in the dual-MTS task condition. Sessions included 50 same trials intermixed with 50 different trials. The dependent variable was the accuracy of the response on the RMTS task.

Training procedure. Training was required for the baboons to learn the MTS task. Training trials started with the display of a stimulus, which was randomly selected among a set of six colored shapes. Touching that form cleared the screen and triggered the display of two comparison stimuli on the left and right hemiscreen. The baboons were thus requested to touch the comparison stimulus that was identical to the sample. A food reward was delivered in case of a correct matching response. By contrast, incorrect responses triggered a 3-s time-out indicated by a green screen. Training blocks of 100 trials were continually given in a random order until each baboon performed over 80% correct on three consecutive blocks. The left–right location of the two comparison pairs were counterbalanced in these blocks. After the learning criterion was met, the baboons also received one block of 100 trials using the zero-delay RMTS task of Experiment 1. This session served as a warm-up session before testing began.

Results

A one-way repeated-measure ANOVA on arcsine-transformed RMTS data revealed a significant effect of the trial type (same, different), $F(1, 7) = 10.9$, $MSE = .032$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .61$. As shown in Figure 5, this effect was reflected by a higher accuracy for same ($M = 73.91$), 95% CI [66.07, 81.75], than for different trial types ($M = 46.36$), 95% CI [32.37, 60.36]. Two-tailed z tests on nontransformed accuracy scores further revealed that the baboons performed reliably above chance on same trials ($p < .05$),

but remained at chance level (50%) on different trials, $z = -.614$, 95% CI [32.37, 60.36], $p > .05$.

Cross-experiment analysis. The first aim of this analysis was to determine whether significant differences emerged between performance in Experiment 2 and performance during the dual task of Test Phase 2 of Experiment 1. A mixed ANOVA with test condition (Experiment 1: dual-serial task; Experiment 2: dual-MTS task) as a between-block factor and trial type (same, different) as a within-block factor on arcsine-transformed data revealed a significant main effect of trial type, $F(1, 7) = 11.5$, $MSE = .037$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .62$ (see Figure 5) in favor of same ($M = 73.21$), 95% CI [67.19, 79.24], rather than different trials ($M = 51.64$), 95% CI [42.84, 60.44]. However, this analysis showed neither a significant main effect of test condition, $F(1, 7) = 2.6$, $MSE = .007$, $p > .05$, $\eta_p^2 = .27$, nor an interaction between trial type and test condition, $F(1, 7) = 4.2$, $MSE = .019$, $p > .05$, $\eta_p^2 = .19$.

To guaranty that the effect of WM load was more important for the different trials, compared to the same trials, we conducted a complementary analysis comparing the dual-MTS task of Experiment 2 to the delayed condition of Experiment 1 (Test Phase 2). This analysis showed a significant main effect of test condition, $F(1, 7) = 36.5$, $MSE = .011$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .84$. This effect indicates a higher accuracy in the delayed condition ($M = 80.29$), 95% CI [76.17, 84.41], than in the dual-MTS task condition ($M = 60.14$), 95% CI [49.83, 70.44]. The main effect of trial type was also reliable, $F(1, 7) = 11.2$, $MSE = .013$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .62$. It corresponded to a higher accuracy for the same ($M = 76.55$), 95% CI [71.48, 81.62], than for the different trials ($M = 63.88$), 95% CI [52.27, 75.48]. Of note, these two main effects were accounted by a Trial Type (same vs. different) \times Test Condition (dual-MTS task vs. delayed) interaction of a higher level, $F(1, 7) = 8.3$, $MSE = .024$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .54$. Post hoc analyses of that interaction confirmed our previous findings. They showed that the dual-MTS task selectively impaired the different trials ($M = 46.36$), 95% CI [32.37, 60.36], compared to the delayed condition ($M = 81.39$), 95% CI [76.42, 86.36], but revealed no reliable effect of test condition for the same trials (delayed condition, $M = 79.19$), 95% CI [71.25, 87.12]; (dual-MTS task condition, $M = 73.91$), 95% CI [66.07, 81.75].

Discussion

A striking similarity emerged between Experiments 1 and 2. These two experiments showed that the use of a dual task (dual-serial task in Experiment 1 and dual-MTS task in Experiment 2) reduced our baboons' performance compared to the delayed condition. In addition, both experiments found that the performance decline observed as a consequence of the dual task was stronger for different than for same trials. The implications of these two major findings are discussed below.

General Discussion

Recent studies have shown that monkeys and apes can solve RMTS tasks (e.g., Fagot & Thompson, 2011; Truppa et al., 2011; Vonk, 2003), but the cognitive strategy they deploy to solve this task remains uncertain. Given that relational tasks imply the processing of both the stimulus items and their relations (Halford et al., 1998), we hypothesized that manipulation of the WM resources

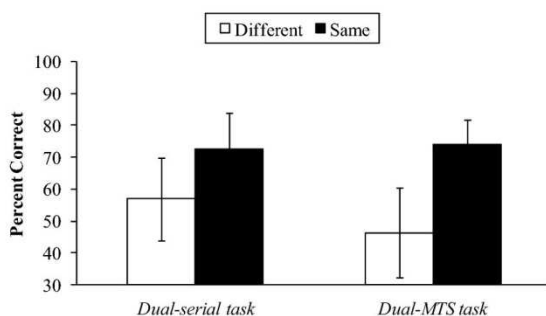


Figure 5. Percent of correct responses for same and different trials in the dual-serial task (Test Phase 2 of Experiment 1) and the dual-MTS task condition (Experiment 2). MTS = matching-to-sample. Error bars represent 95% confidence intervals.

of the participants using dual-task procedures should provide new insights into their processing strategy.

For that purpose, Experiment 1 (Test Phase 1) contrasted three conditions of memory load. The best performance was obtained in the zero-delay condition, which minimized the memory load, and this performance was reliably greater than in the other two conditions. Performance was lowest in the dual-serial task condition, which maximized the memory load, with performance in the delayed condition intermediate between the other two test conditions. Interestingly, the strong detrimental effect in the dual-serial task condition cannot be accounted for by a differential time interval between the relational sample and comparison pairs, because caution was taken to keep intervals constant during testing between this condition and the delayed condition. Furthermore, the strong detrimental effect in the dual-serial task condition cannot be explained by an effect of test order, because we replicated the effect in Test Phase 2, which counterbalanced the order of the dual-serial task condition and the delayed condition.

The strong detrimental effect in the dual-serial task condition of Experiment 1 is likely to have involved WM with no or limited influence of long-term memory processes, because it was quite similar to the detrimental effect in the dual-MTS task condition in Experiment 2, which selectively tapped WM processes. Our demonstration of the role of WM processes in baboon RMTS converges with the literature for people, which has shown that WM processes play a critical role during analogy formation (Morrison et al., 2001; Waltz et al., 2000).

Earlier, we proposed that the baboons might follow three different strategies to solve the RMTS tasks. The first strategy (Hypothesis 1) implies a coarse memorization process of the whole sample percept in order to compare that percept stored in WM to that of the comparison pairs. The second strategy involves a reencoding of that percept into a binary (e.g., high vs. low variability) code, to memorize and then match the codes rather than the percepts. Third, the baboons may use more relational strategies involving the processing of both the items and their relations. Interestingly, these three hypotheses allowed us to evaluate the three predictions illustrated in Figure 1 concerning the effect of memory load on the processing of same and different relations.

Inspection of our data (see Figure 3) does not support Hypothesis 1 (perceptual); contrary to our prediction (see Figure 1a), performance was not greater in the zero-delay condition for different than for same trials. Also, contrary to Hypothesis 2 (see Figure 1b), our study rules out the idea that the monkeys reencoded the sample and comparison displays in a binary format; that hypothesis predicts equal effects of memory load for same and different trials, with no interaction. Hypothesis 3 (relational) predicts that performance on same trials should be higher in the zero-delay condition than in the different trials (see Figure 1c). It further predicts stronger effects of memory load for the different trials. Experiment 1 provides partial support for this hypothesis because of the selective effect of memory load on the different trials (see Figure 3). Moreover, this finding was replicated by the comparison of the results obtained in the dual-MTS task condition of Experiment 2 to those of the delayed condition of Experiment 1 (Test Phase 2). Note, however, that these analyses failed to indicate a reliable difference between the same and different trials when the tasks minimized the memory load.

To further address a possible advantage for same trials in absence of memory load, we reexamined the literature in both apes and monkeys that used the RMTS tasks. Because the use of arrays in this task might promote perceptual strategies (Castro & Wasserman, 2013), our attention was focused on studies that have shown that either apes or monkeys have successfully solved the RMTS tasks with pairs of items (Fagot & Parron, 2010; Fagot & Thompson, 2011; Thompson et al., 1997; Truppa et al., 2011; Vonk, 2003). Unfortunately, neither Thompson et al. (1997) nor Vonk (2003) reported values distinguishing same and different trials. Similarly, Fagot and Thompson (2011, baseline of Experiment 2) did not mention the percent correct for these two types of trials. However, a reanalysis of their initial data set showed that all five baboons involved in this study clearly evidenced higher performance on same trials (Barn: 82.2% correct for same trials, 78.5% for different trials; Bob: 83.6% vs. 66.6%; Cau: 87.5% vs. 79.5%; Clo: 80.9% vs. 58.6%; Drea: 84.8% vs. 68.7%). The same pattern was furthermore replicated in Fagot and Thompson (2011, Experiment 3) in which baboons were retested after a long break of 1 year (Barn: 81.3 [same] vs. 68.7% [different]; Bob: 80.0% vs. 66.0%; Cau: 84.3% vs. 72.6%; Clo: 73.4% vs. 61.2%; Drea: 84.0% vs. 70.3%). These findings are also consistent with Fagot and Parron's (2010) study, in which the baboons had to solve the RMTS tasks that considered the color of the sample and comparison items. Although the authors reported a nonsignificant difference at the group level ($M_{\text{same}} = 69.3\%$ correct; $M_{\text{different}} = 54.7\%$), three of the five baboons in this study showed higher performance on same than on different trials (B03: 72.9% [same] vs. 54.2% [different]; B05: 72.9% vs. 43.7%; B08: 64.6% vs. 60.4%). Finally, Truppa et al. (2011) reported data for one capuchin monkey that learned RMTS with 2-item displays. In a first test (see their results on Set VII), that monkey performed higher (75% correct) on same than on different trials (i.e., 70.8%). The identical bias in favor of the same trials also emerged in a second test ($M = 54\%$ vs. 44%), although that performance had declined compared to its first test. All in all, findings indicate a bias for higher performance on same trials, as predicted by the hypothesis of relational encoding of the stimulus pairs.

Admittedly, one limitation of our research is that we did not directly test the idea that the baboons encoded the identity of the items composing the sample pairs. Nonetheless, two sets of published data already support this idea. The first concerns transfer trials with new shapes given to monkeys once they learned the same/different or the RMTS task (see Fagot et al., 2001; Fagot & Thompson, 2011, for RMTS task; see Wasserman et al., 1995; Wright & Katz, 2006, for other examples in same and different tasks in pigeons and monkeys). The results of these tests systematically indicate that performance remained above chance with the new sets, suggesting the application of a general relational strategy. However, their results also reveal a decline in performance from the training set, suggesting some processing of the individual items.

The second even more striking result concerns the effect of cross-mapping trials given to baboons in Fagot and Thompson (2011), in which one of the two items composing the sample pair was shared with the negative comparison pairs. The level of performance of all five baboons was reliably above chance in these cross-mapped trials (see Fagot & Thompson, 2011, Figure 2), but again it was reliably lower than in regular (non-cross-mapped)

trials. All of these findings, along with the current results on the effect of WM manipulations, strongly suggest that the baboons conjointly processed the items and their relations in the RMTS task, although the animals appear to give priority to the relations when these two kinds of information conflict in cross-mapping trials. Definitively, the baboons in the RMTS task use a cognitive strategy that is much more complex than matching on overall perceptual variability.

References

- Botvinick, M. M., Wang, J., Cowan, E., Roy, S., Bastianen, C., Mayo, J. P., & Houk, J. C. (2009). An analysis of immediate serial recall performance in a macaque. *Animal Cognition*, *12*, 671–678. doi:10.1007/s10071-009-0226-z
- Brown, A. L., Kane, M. J., & Echols, C. H. (1986). Young children's mental models determine analogical transfer across problems with a common goal structure. *Cognitive Development*, *1*, 103–121. doi:10.1016/S0885-2014(86)80014-4
- Castro, L., & Wasserman, E. A. (2013). Humans deploy diverse strategies in learning same–different discrimination tasks. *Behavioural Processes*, *93*, 125–139. doi:10.1016/j.beproc.2012.09.015
- Christie, S., & Gentner, D. (2007). Relational similarity in identity relation: The role of language. In S. Vosniadou & D. Kayser (Eds.), *Proceedings of the Second European Cognitive Science Conference* (pp. 601–666). London, England: Taylor & Francis.
- Cook, R. G., Katz, J. S., & Cavoto, B. R. (1997). Pigeon same-different concept learning with multiple stimulus classes. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *23*, 417–433. doi:10.1037/0097-7403.23.4.417
- Corsi, P. M. (1972). Human memory and the medial temporal region of the brain. *Dissertation Abstracts International: Section B: Sciences and Engineering*, *34*(2), 891.
- Elmore, L. C., Ma, W. J., Magnotti, J. F., Leising, K. J., Passaro, A. D., Katz, J. S., & Wright, A. A. (2011). Visual short-term memory compared in rhesus monkeys and humans. *Current Biology*, *21*, 975–979. doi:10.1016/j.cub.2011.04.031
- Fagot, J., & Bonté, E. (2010). Automated testing of cognitive performance in monkeys: Use of a battery of computerized test systems by a troop of semi-free-ranging baboons (*Papio papio*). *Behavior Research Methods*, *42*, 507–516. doi:10.3758/BRM.42.2.507
- Fagot, J., & De Lillo, C. (2011). A comparative study of working memory: Immediate serial spatial recall in baboons (*Papio papio*) and humans. *Neuropsychologia*, *49*, 3870–3880. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2011.10.003
- Fagot, J., & Maugard, A. (2013). Analogical reasoning in baboons (*Papio papio*): Flexible reencoding of the source relation depending on the target relation. *Learning & Behavior*. Advance online publication. doi:10.3758/s13420-012-0101-7
- Fagot, J., & Paleressompoulle, D. (2009). Automatic testing of cognitive performance in baboons maintained in social groups. *Behavior Research Methods*, *41*, 396–404. doi:10.3758/BRM.41.2.396
- Fagot, J., & Parron, C. (2010). Relational matching in baboons (*Papio papio*) with reduced grouping requirements. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *36*, 184–193. doi:10.1037/a0017169
- Fagot, J., & Thompson, R. K. R. (2011). Generalized relational matching by guinea baboons (*Papio papio*) in two-by-two-item analogy problems. *Psychological Science*, *22*, 1304–1309. doi:10.1177/0956797611422916
- Fagot, J., Wasserman, E. A., & Young, M. E. (2001). Discriminating the relation between relations: The role of entropy in abstract conceptualization by baboons (*Papio papio*) and humans (*Homo sapiens*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *27*, 316–328. doi:10.1037/0097-7403.27.4.316
- Flemming, T. M., Beran, M. J., Thompson, R. K. R., 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*). *Journal of Comparative Psychology*, *122*, 176–185. doi:10.1037/0735-7036.122.2.176
- Flemming, T. M., Beran, M. J., & Washburn, D. A. (2007). Disconnect in concept learning by rhesus monkeys (*Macaca mulatta*): Judgment of relations and relations-between-relations. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *33*, 55–63. doi:10.1037/0097-7403.33.1.55
- Flemming, T. M., Thompson, R. K. R., & Fagot, J. (2013). Baboons, like humans, solve analogy by categorical abstraction of relations. *Animal Cognition*. doi:10.1007/s10071-013-0596-0
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology*, *40*, 177–190. doi:10.1037/0012-1649.40.2.177
- Gentner, D., & Toupin, C. (1986). Systematicity and surface similarity in the development of analogy. *Cognitive Science*, *10*, 277–300. doi:10.1207/s15516709cog1003_2
- Gillan, D. J., Premack, D., & Woodruff, G. (1981). Reasoning in the chimpanzee. 1. Analogical reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *7*, 1–17. doi:10.1037/0097-7403.7.1.1
- Glahn, D. C., Kim, J., Cohen, M. S., Poutanen, V. P., Therman, S., Bava, S., . . . Cannon, T. D. (2002). Maintenance and manipulation in spatial working memory: Dissociations in the prefrontal cortex. *NeuroImage*, *17*, 201–213. doi:10.1006/nimg.2002.1161
- Goldman-Rakic, P. (1987). Circuitry of primate prefrontal cortex and regulation of behavior by representational knowledge. In F. Plum & V. Mountcastle (Eds.), *Handbook of Physiology. Section I: The nervous system. Vol. 5: Higher functions of the brain* (pp. 373–417). Bethesda, MD: American Physiological Society.
- Halford, G. S., Wilson, W. H., Guo, J., Gayler, R. W., Wiles, J., & Stewart, J. E. M. (1994). Connectionist implications for processing capacity limitations in analogies. In K. J. Holyoak & J. A. Barnden (Eds.), *Analogical connections: Advances in connectionist and neural computation theory* (Vol. 2, pp. 363–415). Westport, CT: Ablex Publishing.
- Halford, G. S., Wilson, W. H., & Phillips, S. (1998). Processing capacity defined by relational complexity: Implications for comparative, developmental, and cognitive psychology. *Behavioral and Brain Sciences*, *21*, 803–831. doi:10.1017/S0140525X98001769
- Hartman, M., Dumas, J., & Nielsen, C. (2001). Age differences in updating working memory: Evidence from the delayed-matching-to-sample test. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *8*, 14–35. doi:10.1076/anec.8.1.14.847
- Haun, D. B. M., & Call, J. (2009). Great apes' capacities to recognize relational similarity. *Cognition*, *110*, 147–159. doi:10.1016/j.cognition.2008.10.012
- Holland, J. H., Holyoak, K. J., Nisbett, R. E., & Thagard, P. R. (1989). *Induction: Processes of inference, learning, and discovery*. Cambridge, MA: Bradford Books/MIT Press.
- Hribar, A., Haun, D., & Call, J. (2011). Great apes' strategies to map spatial relations. *Animal Cognition*, *14*, 511–523. doi:10.1007/s10071-011-0385-6
- Hummel, J. E., & Holyoak, K. J. (1997). Distributed representations of structure: A theory of analogical access and mapping. *Psychological Review*, *104*, 427–466. doi:10.1037/0033-295X.104.3.427
- Markman, A. B., & Gentner, D. (1993). Structural alignment during similarity comparisons. *Cognitive Psychology*, *25*, 431–467. doi:10.1006/cogp.1993.1011
- Morrison, R. G., Holyoak, K. J., & Truong, B. (2001). Working memory modularity in analogical reasoning. In J. D. Moore & K. Stenning (Eds.), *Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 663–668). Mahwah, NJ: Erlbaum.

- Penn, D. C., Holyoak, K. J., & Povinelli, D. J. (2008). Darwin's mistake: Explaining the discontinuity between human and nonhuman minds. *Behavioral and Brain Sciences*, *31*, 109–130. doi:10.1017/S0140525X08003543
- Premack, D. (1983). Animal cognition. *Annual Review of Psychology*, *34*, 351–362. doi:10.1146/annurev.ps.34.020183.002031
- Ramscar, M., & Pain, H. (1996). Can a real distinction be made between cognitive theories of analogy and categorization? In G. Cottrell (Ed.), *Proceedings of the 18th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 346–351). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Rein, J. R., & Markman, A. B. (2010). Assessing the concreteness of relational representation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *36*, 1452–1465. doi:10.1037/a0021040
- Rey, A., Perruchet, P., & Fagot, J. (2012). Centre-embedded structures are a by-product of associative learning and working memory constraints: Evidence from baboons (*Papio Papio*). *Cognition*, *123*, 180–184. doi:10.1016/j.cognition.2011.12.005
- Scholnick, E. K. (2008). New directions in Piagetian theory and practice. *Journal of Applied Developmental Psychology*, *29*, 345–347. doi:10.1016/j.appdev.2008.04.001
- Thompson, R. K. R., 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*, 31–43. doi:10.1037/0097-7403.23.1.31
- Truppa, V., Mortari, E. P., Garofoli, D., Privitera, S., & Visalberghi, E. (2011). Same/different concept learning by capuchin monkeys in matching-to-sample tasks. *PLoS One*, *6*. doi:10.1371/journal.pone.0023809
- Vonk, J. (2003). Gorilla (*Gorilla gorilla gorilla*) and orangutan (*Pongo abelii*) understanding of first- and second-order relations. *Animal Cognition*, *6*, 77–86. doi:10.1007/s10071-003-0159-x
- Waltz, J. A., Knowlton, B. J., Holyoak, K. J., Boone, K. B., Mishkin, F. S., Santos, M. de M., . . . Miller, B. L. (1999). A system for relational reasoning in human prefrontal cortex. *Psychological Science*, *10*, 119–125. doi:10.1111/1467-9280.00118
- Waltz, J. A., Lau, A., Grewal, S. K., & Holyoak, K. J. (2000). The role of working memory in analogical mapping. *Memory & Cognition*, *28*, 1205–1212. doi:10.3758/BF03211821
- Washburn, D., Thompson, R., & Oden, D. (1997, November). *Monkeys trained with same/different symbols do not match relations*. Paper presented at the 38th Annual Meeting of the Psychonomic Society, Philadelphia, PA.
- Wasserman, E. A., Fagot, J., & Young, M. E. (2001). Same–different conceptualization by baboons (*Papio papio*): The role of entropy. *Journal of Comparative Psychology*, *115*, 42–52. doi:10.1037/0735-7036.115.1.42
- Wasserman, E. A., Hugart, J. A., & Kirkpatrick-Steger, K. (1995). Pigeons show same-different conceptualization after training with complex visual stimuli. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *21*, 248–252. doi:10.1037/0097-7403.21.3.248
- Wasserman, E. A., & Young, M. E. (2010). Same–different discrimination: The keel and backbone of thought and reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *36*, 3–22. doi:10.1037/a0016327
- Wasserman, E. A., Young, M. E., & Fagot, J. (2001). Effects of number of items on the baboon's discrimination of same from different visual displays. *Animal Cognition*, *4*, 163–170. doi:10.1007/s100710100095
- Wharton, C. M., Grafman, J., Flitman, S. S., Hansen, E. K., Brauner, J., Marks, A., . . . Honda, M. (2000). Toward neuroanatomical models of analogy: A positron emission tomography study of analogical mapping. *Cognitive Psychology*, *40*, 173–197. doi:10.1006/cogp.1999.0726
- Wright, A. A. (2007). An experimental analysis of memory processing. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *88*, 405–433. doi:10.1901/jeab.2007.88-405
- Wright, A. A., & Katz, J. S. (2006). Mechanisms of same/different concept learning in primates and avians. *Behavioural Processes*, *72*, 234–254. doi:10.1016/j.beproc.2006.03.009
- Young, M. E., & Wasserman, E. A. (1997). Entropy detection by pigeons: Response to mixed visual displays after same-different discrimination training. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *23*, 157–170. doi:10.1037/0097-7403.23.2.157

Received May 23, 2012

Revision received February 4, 2013

Accepted February 4, 2013 ■

E-Mail Notification of Your Latest Issue Online!

Would you like to know when the next issue of your favorite APA journal will be available online? This service is now available to you. Sign up at <http://notify.apa.org/> and you will be notified by e-mail when issues of interest to you become available!

Article III – Complexité des analogies chez le babouin

Analogical reasoning in baboons (*Papio papio*): Flexible reencoding of the source relation depending on the target relation (Fagot & Maugard, 2013)

Le raisonnement par analogie est une activité centrale de la cognition humaine qui évolue au cours du développement pour s'appliquer à des relations de plus en plus complexes. Nous avons vu que les primates non humains sont capables de raisonner par analogie pour appairer des relations d'identité et de différence (cf. article II). Cependant, les études dans ce domaine ont seulement montré la capacité des singes à raisonner sur des relations exprimées par une seule dimension à la fois ; par exemple la forme des objets (Fagot & Thompson, 2011) ou encore leur couleur (Fagot & Parron, 2010).

Le raisonnement par analogie chez l'homme implique des processus cognitifs plus complexes que le simple appariement de relations unidimensionnelles. L'une de ses composantes est par exemple la capacité à ré-encoder de manière flexible une relation *source* en fonction des propriétés du domaine *cible*. Considérons par exemple une tâche dans laquelle le domaine *source* contient la paire suivante : abeille-ruche. Plusieurs relations existent entre ces deux items (e.g., « travaille dedans » ou « vit dedans »). Dans ce cas, la relation *source* pertinente est spécifiée par les propriétés du domaine *cible* ; ainsi un domaine *cible* contenant le couple ouvrier-usine soulignera la relation *source* « travaille dans » (comme illustré dans la figure 33) alors que le couple humain-maison soulignera la relation *source* « vit dedans ».

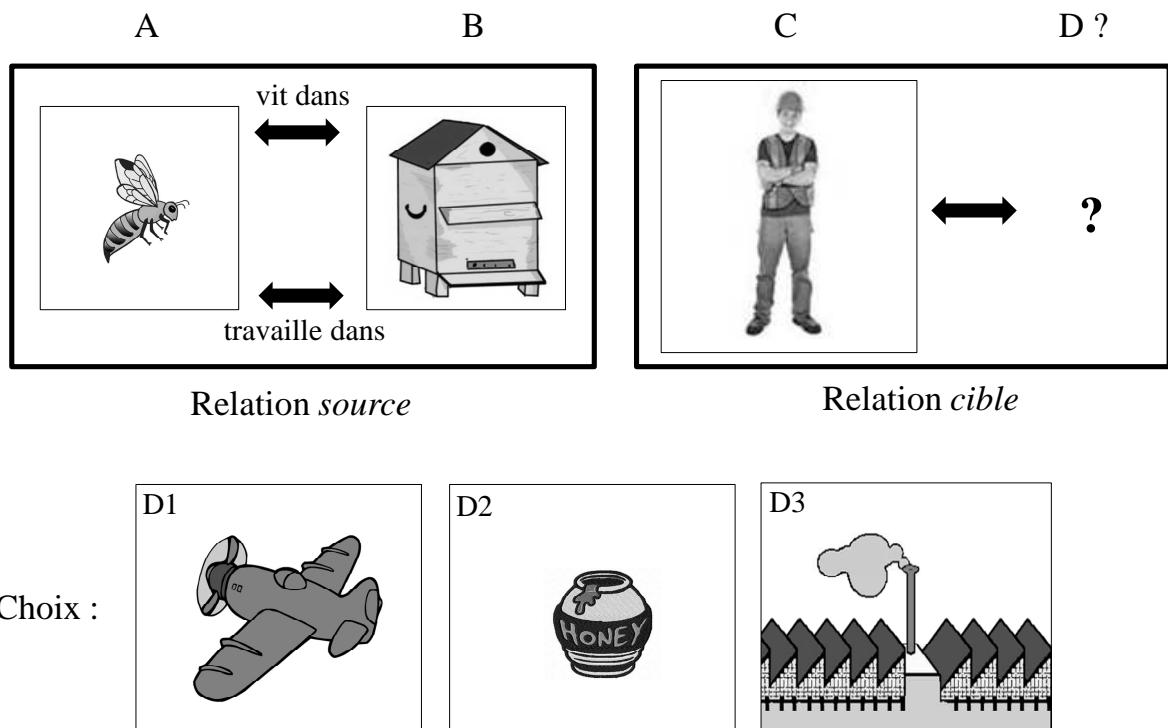


Figure 33. Illustration du principe de ré-encodage de la relation source en fonction des propriétés de la cible. Dans cette tâche de type $A : B :: C : D$, les objets de la source expriment plusieurs relations (e.g., « vit dans » et « travaille dans »). Ce sont les propriétés des items-choix D et en particulier l’item D3 (i.e., une usine) qui permet de ré-encoder la source de manière à sélectionner la relation « travaille dans » pour résoudre correctement la tâche.

Une autre composante du raisonnement par analogie chez l’homme est la capacité à appairer des relations exprimées par des dimensions différentes. La relation d’identité peut par exemple être illustrée par différentes paires d’objets, selon la dimension que ces objets ont en commun ; ballon-lune (i.e., identité de forme), tomate-camion de pompier (i.e., identité de couleur), camion-avion (i.e., identité de fonction). Dans une tâche d’analogie, un humain serait aisément capable d’associer ces paires qui représentent la même relation (i.e., relation d’identité) bien qu’elle soit exprimée par des dimensions différentes (i.e., forme, couleur, fonction).

Les objectifs de cette étude sont donc de tester (1) la capacité des babouins à ré-encoder de manière flexible une paire *source* en fonction des propriétés des paires *cible* et (2) leur capacité à appairer des relations exprimées par des dimensions différentes (i.e., couleur et forme).

Chacun de ces objectifs a fait l'objet d'une expérience conduite sur quatre babouins qui devaient résoudre une tâche d'appariement relationnel informatisée. Dans la première expérience, une paire *source* bidimensionnelle était présentée au babouin (Figure 34.A). Puis, de façon aléatoire, deux types de paires *cible* pouvaient lui être présentés. En fonction du type de paires *cible*, le babouin devait considérer l'une ou l'autre des dimensions de la paire *source* et donc ré-encoder la paire *source* pour répondre correctement. Dans une seconde expérience, les babouins devaient appairer des relations d'identité et de différence exprimées par des dimensions différentes. Par exemple, si la paire *source* exprimait une relation d'identité de forme, le babouin devait l'appairer avec une paire *cible* exprimant une relation d'identité de couleur (Figure 34.B).

Dans l'expérience 1, après un entraînement de plusieurs milliers d'essais, les quatre babouins testés ont obtenu des performances supérieures à la chance. Dans l'expérience 2, réalisée sans entraînement complémentaire, deux babouins sur les quatre ont obtenu des performances supérieures à la chance.

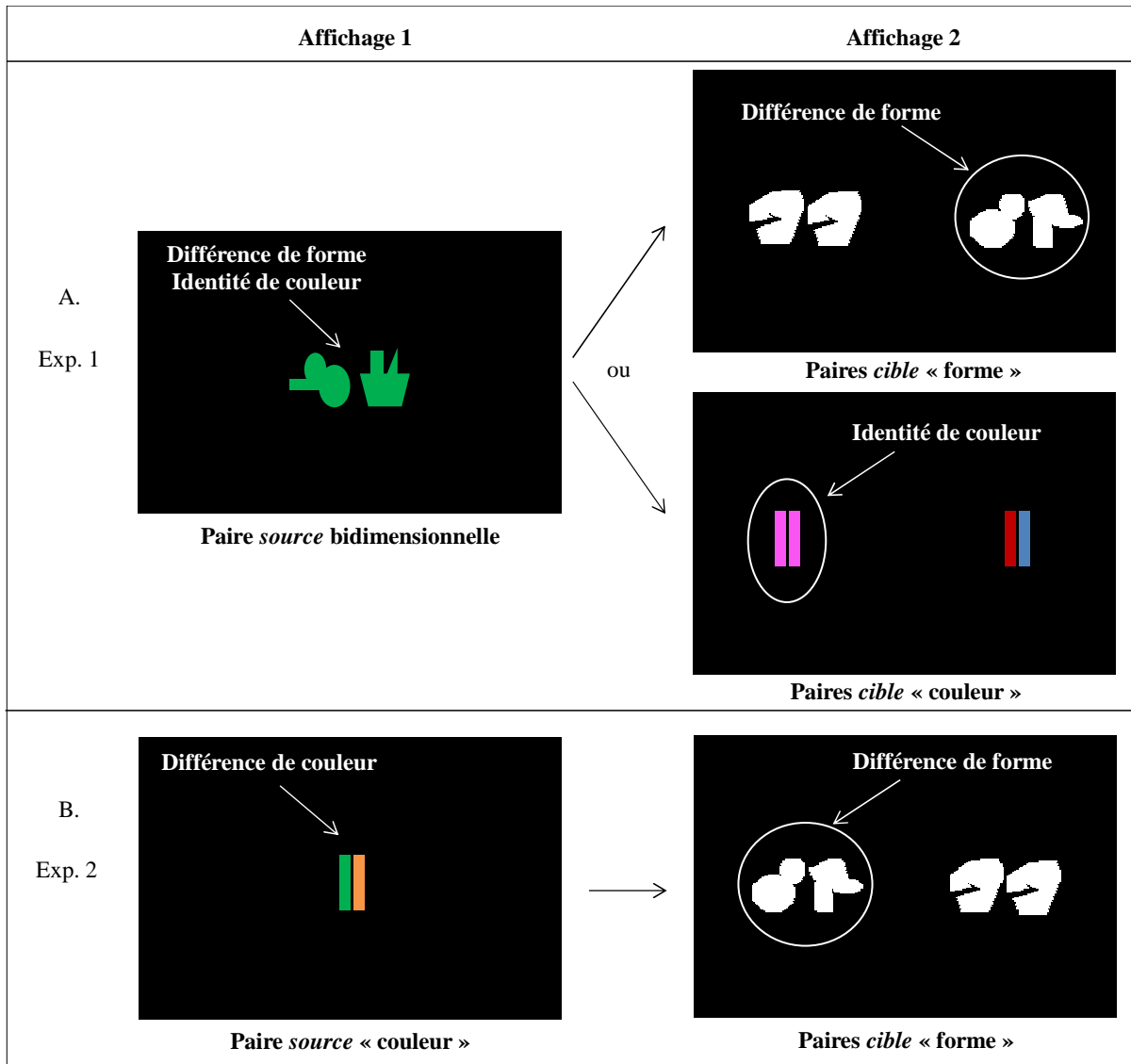


Figure 34. Illustration des tâches d'appariement relationnel utilisées pour les expériences 1 (Figure 34.A) et 2 (Figure 34.B).

Ces résultats montrent que le babouin peut être capable, comme l'homme, dans une tâche d'analogie, (1) de ré-encoder une paire *source* en fonction des propriétés des paires *cible* et (2) d'apparier des relations exprimées par des dimensions différentes. Ces éléments suggèrent que le raisonnement par analogie chez le babouin est régi, comme chez l'homme, par des processus cognitifs complexes permettant une certaine flexibilité des encodages ainsi que des opérations de haut niveau impliquant des associations inter dimensionnelles.

Analogical reasoning in baboons (*Papio papio*): Flexible reencoding of the source relation depending on the target relation

Joël Fagot · Anaïs Maugard

Published online: 27 January 2013
© Psychonomic Society, Inc. 2013

Abstract Analogical reasoning is a cornerstone of human cognition, but the extent and limits of analogical reasoning in animals remains unclear. Recent studies have demonstrated that apes and monkeys can match relations with relations, suggesting that these species have the basic abilities for analogical reasoning. However, analogical reasoning in humans entails two additional cognitive processes that remain unexplored in animals. These include the ability to (1) flexibly reencode the relations instantiated by the source domain as a function of the relational properties of the target domain, and (2) to match relations across different stimulus dimensions. Using a two-dimensional relational matching-to-sample task, the present study demonstrates that these two abilities are in the scope of baboons, given appropriate training. These findings unveil the richness of the cognitive processes implicated during analogical reasoning in nonhuman primates and further reduce the apparent gap between animal and human cognition.

Keywords Comparative cognition · Categorization · Cognitive flexibility · Nonhuman primate

Electronic supplementary material The online version of this article (doi:10.3758/s13420-012-0101-7) contains supplementary material, which is available to authorized users.

J. Fagot
Laboratory of Cognitive Psychology, Fédération de recherche 3C,
Brain and Language Research Institute, CNRS, Aix-Marseille
University, Marseille, France

J. Fagot (✉)
CNRS,
3 place Victor Hugo, Bât B, Case D,
13331 Marseille Cedex, France
e-mail: joel.fagot@univ-amu.fr

A. Maugard
Laboratory of Cognitive Psychology, Fédération de recherche 3C,
CNRS, Aix-Marseille University, Marseille, France
e-mail: amaugard@hotmail.com

Analogical reasoning is a cornerstone of human thought (Sternberg, 1977). It is fundamental for a diversity of cognitive processes of considerable importance, such as classification (Ramscar & Pain, 1996), transfer of learning in new contexts (Gentner, Loewenstein, & Thompson, 2003), problem solving (Gick & Holyoak, 1980), and creative thinking (Holyoak & Thagard, 1996). Analogical thinking requires an ability to associate a relation instantiated by a first set of stimuli (source domain) to another relation shown by a second set of stimuli (target domain) (Gentner, 2002). Consider, for instance, the following analogy: Fish is to water as bird is to air. Understanding this analogy requires that the listener identify the relational similarity between the elements of the source domain (fish and water) and determine that the same relation exists between the elements of the target domain (bird and air). The ability to solve analogy problems is promoted during childhood by the acquisition of relational language (Gentner, Simms, & Flusberg, 2009; Loewenstein & Gentner, 2005). However, it remains unclear whether language learning acts as a booster that shifts attention toward the relational structure of a problem, or is simply a mandatory prerequisite for the appropriate encoding of analogy problems. Studies on analogy making in animals are perfect means to assess this issue of great theoretical importance.

Analogical reasoning has mostly been studied in animals with the relational matching-to-sample (RMTS) task (but see Haun & Call, 2009; Hribar, Haun, & Call, 2011; Kennedy & Fragaszy, 2008). In this task, the subject first perceives a set of stimuli (source domain) that are all the same (*same* relation) or all different (*different* relation), and then perceives two new sets of stimuli. One of the latter two sets (the target set) shows the same (*same* or *different*) relation as the source set, and the other shows the alternative relation. The animal is rewarded for choosing the comparison pair showing the same relation as the sample pair. A historical perspective on the use of the RMTS task pinpoints the pioneering contribution of Premack (1983), who

reported that a language-trained chimpanzee (named Sarah) could solve the RMTS task. According to Premack, that success indicates that linguistic encoding is required for successful appreciation of second-order relations (i.e., relations between relations). Indeed, numerous studies following this first demonstration have failed to reveal RMTS abilities in language-naïve apes and monkeys (e.g., Flemming, Beran, & Washburn, 2007; Oden, Thompson, & Premack, 1988, 1990; Premack, 1983), with the notable exception of Thompson, Oden, and Boysen (1997), who reported that training to associate tokens to relations permits relational matching in language-naïve chimpanzees. However, this theoretical perspective on the contribution of language to successful RMTS has been challenged in light of a new set of experimental findings. Thus, a first set of studies showed that baboons (Fagot, Wasserman, & Young, 2001), and then pigeons (Cook & Wasserman, 2007), can solve this task when the relations are illustrated by arrays of multiple stimuli rather than by pairs of items. In addition, recent studies have revealed that nonhuman primates can pass the RMTS task with pairs of items rather than arrays after extensive training on the task (in a capuchin, Truppa, Mortari, Garofoli, Privitera, & Visalberghi, 2011; in baboons, Fagot & Parron, 2010; Fagot & Thompson, 2011) or with specific reinforcement contingencies (Flemming, Thompson, Beran, & Washburn, 2011). Vonk (2003) further reported relational matching in a gorilla and orangutans with limited training. These findings demonstrate some abilities to process second-order relations, and this is arguably a phylogenetic basis of analogical reasoning.

The demonstration that animals can match relations with relations is a very important first step in the assessment of analogy making in the species considered. However, analogical reasoning implies cognitive processes that are not restricted to the ability to match relations with relations. One important component of analogical reasoning in humans is that the encoding of the source domain often depends on the properties of the target domain (Holyoak & Thagard, 1989). Imagine an analogy task in which the source domain contains the “bee–hive” pair of items. Various relations exist between a bee and a hive, such as that the bee “lives in” or “works in” the hive. In that case, the relation to be processed must be specified by the relational properties of the target items. Thus the relation “works in” is highlighted when the target domain contains the “secretary–office” pair, but the relation “lives in” becomes salient when the target domain comprises the “human–house” pair.

Previous RMTS tasks used with animals have only manipulated a single stimulus dimension at a time, such as the shape (e.g., Fagot & Thompson, 2011; Truppa et al., 2011) or color (e.g., Fagot & Parron, 2010) of the stimuli. With these procedures, inspection of the source stimuli provided

all the cues necessary to determine the (*same* or *different*) relation to be processed, with no need to reencode the source domain in terms of the properties of the target domain. This aspect of the task is at odds with analogy making in humans, in which the source domain is reencoded after the items of the target domain have been processed (Gitomer, Curtis, Glaser, & Lensky, 1987; Yan, Forbus, & Gentner, 2003). The strategy implying a reencoding of the source domain is of a higher level of complexity. It requires that the subject select the appropriate relation among a set of possible ones, and further imposes working memory constraints that are absent in the RMTS tasks previously employed with animals.

A second important feature of analogical reasoning in humans is the capacity to match relations instantiated by very different means. Consider, for instance, the “identity” relation: Two objects might be considered identical because they have the same color (e.g., tomato, fire truck), the same shape (moon, ball), or the same function (train, plane). Humans would have no real difficulty associating these pairs during an analogy task, because the items within each pair have something in common, independent of the dimension (shape, color, or function) shared by these items. Unfortunately, that ability to match relations across dimensions cannot be tackled by the version of RMTS procedure used so far with animals, again because these tasks only imply the processing of a single dimension at a time (e.g., the shape dimension, Fagot & Thompson, 2011; Truppa et al., 2011; or the color dimension, Fagot & Parron, 2010). Empirical data are needed in this domain to evaluate the power and flexibility of analogical thinking in animals.

We present below two experiments on baboons suggesting for the first time that an animal species can flexibly reencode the relations instantiated by the source domain as a function of the relational properties of the target domain (Exp. 1) and can, moreover, solve analogy problems involving the matching of relations instantiated by different stimulus dimensions (Exp. 2).

Experiment 1: Reencoding of the source relation depending on the target relation

In Experiment 1, we tested the ability of baboons to flexibly reencode the source domain as a function of the relational properties of the target domain. Baboons were trained and tested with a new version of the RMTS task in which the color and the shape of the source items were manipulated independently. In this task, the relevant (shape or color) dimension to process was only indicated by the properties of the target (comparison) pairs, which appeared after the sample had disappeared, therefore imposing a reencoding of the relational properties of the source pair—stored in working memory—after the target pairs have been processed.

Method

Subjects and apparatus The subjects were four male Guinea baboons (*Papio papio*; age range 4–7.6 years) previously trained in the RMTS task using pairs of monochromatic shapes as stimuli (Fagot & Thompson, 2011). They lived in a social group of 30 individuals within a 700-m² enclosure and had free access to ten operant-conditioning test chambers, each equipped with a 19-in. touch screen, a food dispenser, and a radio frequency identification (RFID) reader that identified each baboon via a microchip implanted in each arm (Fagot & Bonté, 2010; Fagot & Paleressompouille, 2009). A test program written with E-Prime Version 2 professional used the subjects’ identity to determine its “last stopping point” in the sequence of trial presentations, and assigned the independent variables to be experienced by each subject during the trial.

Procedure For this study, we used a sequential zero-delay two-dimensional RMTS procedure (see Fig. 1 and the illustrative Video S1 provided as supplemental information). After identification of the subject via the microchip, one of four possible types of source pairs was presented in the center of the touch screen. As is shown in Fig. 1, the source pair could comprise (1) two items of the same color and same shape, (2) two identical shapes of different colors, (3) two different shapes of a unique color, or (4) two items differing in both color and shape. Note that these four conditions allowed us to distinguish consistent trials, in which the information provided by the shapes of the sample items and their colors illustrated the same relation (e.g., the relation of sameness in Option 1 and of differentness in Option 4), from inconsistent trials, in which the shape and

the color of the sample items illustrated different relations (i.e., the relation of sameness for shapes and differentness for colors in Option 2, or the inverse relations in Option 3). These shapes measured a maximum of 100 × 100 pixels (6.8° of visual angle), and were separated by a minimum of four pixels. Touching the source pair made it disappear and triggered the immediate display of two comparison stimulus pairs centered on the left and right sides of the screen. The structure of the comparison pairs identified the relevant dimension on which the correct matching response was to be based. When color was the relevant dimension (color trials), the comparison pairs comprised two vertical 150 × 50 pixel bars (7.4° of visual angle), separated from each other by four pixels, that were of the same (*same* relation) or different (*different* relation) colors. In this case, the shape of the comparison could not inform the subject as to the correct response, as it was constant across the two stimulus pairs. Therefore, the subjects had to focus on the color of the stimuli and select the comparison pair showing the same (*same* or *different*) relation that had been illustrated by the color of the source items. When the shape was the relevant dimension (shape trials), the comparison pairs only contained white shapes. One comparison pair was drawn from two identical shapes (*same* relation) and the other from two different shapes (*different* relation). The color of the comparison shapes was consistently white, and therefore noninformative as to the correct response. Therefore, the subjects had to select the comparison pair matching the source pair with respect to the shape cues. Particularly interesting in this design are the trials in which the subjects had to provide a *same* response when the alternative dimension illustrated a *different* relation (i.e., inconsistent trials). These trials could not be solved by processing the overall

























		Color trial			Shape trial		
Consistent trials	Same	 S+		 S-	 S+		 S-
	Different	 S+		 S-	 S+		 S-
Inconsistent trials	Same	 S+		 S-	 S+		 S-
	Different	 S+		 S-	 S+		 S-

Fig. 1 Illustration of the experimental displays used in Experiment 1. Each panel illustrates a trial for which the color (left-hand panels) or the shape (right-hand panel) was the relevant dimension to process. The source pair is shown in the middle of each panel, and the comparison pairs are shown on the left and right sides (S+ = target pair, S- = foil pair) of each panels. The upper four panels represent the consistent trials, in which the color and shape of the sample items illustrated the same

(*same* or *different*) relation (e.g., the same shape and same color, in the upper left example). The bottom four panels represent the inconsistent trials, in which the color and shape of the sample item pairs illustrated different (*same* or *different*) relations (e.g., different colors but the same shape, in the bottom left example). Note that the sample and comparison pairs were presented in two successive screens in these trials, with no delay between these displays

variability of the stimulus pairs, with all dimensions combined, but required independent processing of the two dimensions.

The source and target pairs were drawn from two distinct sets of six colors and six shapes, precluding physical matching by either color or shape. The left/right locations of the target pair were counterbalanced within each block. Correct responses were reinforced by a drop of dry wheat, and incorrect responses gave rise to a green screen and a 3-s time-out. Solving this task required the animal to remember the relationships instantiated by the source pair and to re-encode that pair a posteriori, once the relevant dimension has been indicated by the structure of the comparison pairs.

Training and testing In the two-dimensional RMTS task, flexible reencoding of the source items can only be demonstrated if the relevant (color or shape) dimension to be processed varies randomly from one trial to the next. To meet this requirement, the baboons underwent a long and effortful training regimen involving alternated blocks of color and shape trials of progressively reduced block sizes (from 120-trial blocks, to 80-, 40-, 16-, 8-, 4-, and 2-trial blocks) to teach the baboons to flexibly shift their attention from one stimulus dimension (e.g., the color) to the other (e.g., the shape). Blocks of color and shape trials were presented in an ABBA BAAB order (the “A” blocks involving color trials only and the “B” blocks shape trials only). The baboons had to reach 80 % correct or more in each block to move to the next “A” or “B” block, until the block sizes were reduced to 16 trials. At that point, the baboons were submitted to randomized color or shape trial blocks of 8, 4, and 2 trials, and were required to achieve 100 sequences of 80 % correct in two consecutive blocks before the block size was reduced. Table 1 summarizes

the numbers of color and shape blocks performed by each subject throughout training. This extensive training required an average of 58,541 trials per baboon (range: 38,400–71,690 trials) and took from 5 to 6 weeks, depending on the subject.

Two test phases followed the initial training. Test Phase 1 was aimed to determine reencoding of the source item as a function of the properties of the target items. It consisted of six consecutive 120-trial blocks, each comprising 60 color trials randomly intermixed with 60 shape trials (see Fig. 1). The second test phase determined whether baboons preferentially processed relational rather than perceptual similarity in the two-dimensional RMTS task. Test Phase 2 consisted of ten 128-trial blocks that comprised 112 baseline trials (56 color and 56 shape trials) identical to those of Test Phase 1, intermixed with 16 probe cross-mapping trials (see Fig. 2). The probe trials differed from baseline trials in that the incorrect comparison pair shared with the sample pair an attribute of the relevant dimension. Illustrative examples of cross-mapped trials are provided in Fig. 2 for *same* (upper panels) and *different* (bottom panels) trials involving a relational judgment on the color (left-hand panel) and the shape (right-hand panels) dimensions.

Results and discussion

During Test Phase 1, the four baboons performed 77 % correct on average (range: 74.9 %–80.8 %; see also Video S2, available in the online supplemental materials). For the statistical analyses, we first distinguished each dimension (color or shape) by relation (*same* or *different*) condition. Individual performance in each condition was analyzed by way of two-tailed binomial tests. Bonferroni corrections were applied to all of these tests to counteract the problem

Table 1 Numbers of training blocks performed by each subject as a function of block size (from 120- to 2-trial blocks) for each type of trial (color and shape), as well as total numbers of trials and the corresponding standard deviations (SDs) per subject and trial type

Block Size	120	80	40	16	8	4	2	Total Trials
Color Blocks								
CAUET	141	128	30	17	206	216	86	31,316
DAN	80	169	13	26	284	158	125	27,210
DREAM	146	27	9	10	146	134	124	22,152
VIVIEN	104	190	44	47	212	224	139	33,062
Mean	117.75	128.5	24	25	212	183	118.5	28,435
SD	31.37	72.40	16.15	16.06	56.50	43.95	22.72	4,854.07
Shape Blocks								
CAUET	199	90	30	27	196	187	55	35,138
DAN	163	84	20	17	278	177	64	30,412
DREAM	92	31	19	23	107	161	50	16,248
VIVIEN	117	232	44	19	302	361	52	38,628
Mean	142.75	109.25	28.25	21.5	220.75	221.5	55.25	30,106.5
SD	47.65	86.02	11.62	4.43	88.38	93.61	6.19	9,833.33

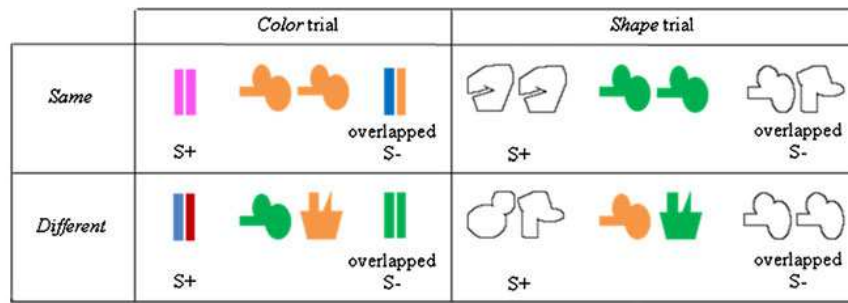


Fig. 2 Illustration of the cross-mapped trials of Test Phase 2 of Experiment 1. In these trials, S⁻ systematically shared one stimulus dimension with the sample pair. For example, in the color cross-mapped trials of the upper left panel, the light orange color used to draw the sample items was also used to draw the negative, S⁻ comparison pair. Similarly, in the cross-mapped shape trials (right hand panels), one of the shapes within the sample pair served to draw S⁻.

The same procedure was followed for the *same* trials (upper panels) and the *different* trials (bottom panels). Note that Fig. 2 only illustrates consistent trials, but that the same procedure was used for inconsistent trials. It was reasoned that a correct choice for S⁺ in these cross-mapped trials, either consistent or inconsistent, would imply that the baboons gave priority to the relational cues

of multiple comparisons. A first analysis showed that all subjects performed well above chance in each of these four conditions (all *ps* < .0001; see Fig. 3). A second analysis assessed the effect of trial order and distinguished the trials for which the relevant (color or shape) dimension was identical to that of the previous (i.e., *n* – 1) trial, from those trials that required an attentional shift because of a change in the relevant dimension. The average performance for the “shift” trials was 73.7 % correct (range: 70.9 %–78.6 %), and for the “no-shift” trials it was 80.3 % (range: 78.6 %–83.4 %); the four baboons showed reliable performance in both types of trials (two-tailed binomial tests, all *ps* < .0001). This finding suggests that the baboons based their responses on the relational cues provided in the current trial, with very limited proactive interference from the previous trial.

The final analysis contrasted the trials in which the relations shown by the color or shape cues of the source pair were either consistent (the color and shape dimensions showed the same relation) or inconsistent (they showed different relations). Relational inconsistency induced a performance decline, and more so for the color (55.4 % vs. 94.3 % correct for inconsistent vs. consistent trials, respectively) than for the

shape trials (62.2 % vs. 96.3 % correct for inconsistent vs. consistent). That decline shows that the processing of the relational color and shape cues interfered within a trial. Computation of Bonferroni-corrected two-tailed binomial tests provided mixed results for three of the baboons (see Table 2), but revealed that one baboon (DAN) was reliably above chance in both the color (68.5 % correct) and shape (70.2 %) inconsistent trials (all *ps* < .0001), suggesting that this animal efficiently processed the relational cues provided by each dimension. Of most importance, the same analyses showed that DAN was reliably above chance in the *same* color trials (76.2 % correct) and *same* shape trials (75 % correct), in which the relation expressed by the dimension to be neglected conflicted with that of the relevant dimension (all *ps* < .0001). The high performance of DAN in these two types of trials demonstrates that this animal did not encode an overall estimate of the perceptual variability of the stimuli to solve the task, but considered instead the relational cues provided by each dimension. Altogether, this remarkable performance demonstrates a capacity to reencode the source domain of

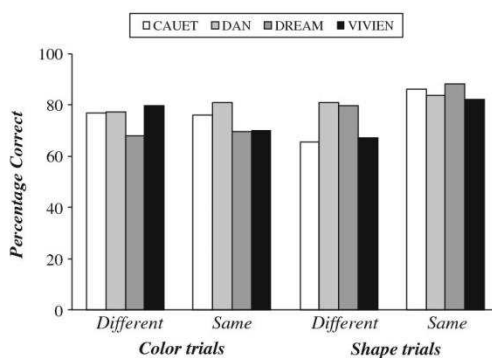


Fig. 3 Percentages of correct responses in Test Phase 1 of Experiment 1, broken down per condition of the stimulus dimension (color vs. shape) by relation (*same*, *different*)

Table 2 Mean percentages correct obtained for each baboon during Test Phase 1 of Experiment 1, as a function of trial type (color or shape) and relational consistency across dimensions (consistent or inconsistent relations)

	Consistent		Inconsistent	
	Color Trials	Shape Trials	Color Trials	Shape Trials
CAUET	96.43	98.81	56.55	52.98
DAN	89.88	94.64	68.45	70.24
DREAM	94.64	96.43	42.86	71.43
VIVIEN	96.43	95.24	53.57	54.17
Mean	94.35	96.28	55.36	62.20
SD	3.09	1.84	10.53	9.99

Reliable performance for each individual, as inferred from Bonferroni-corrected binomial tests, is indicated in bold

the task as a function of the relational properties of the target domain.

Figure 4 shows the average performance obtained in Test Phase 2. All of the baboons performed above chance in both baseline ($M = 78.5\%$) and probe ($M = 76.9\%$) cross-mapped trials, although the sample and the foil comparison had an item in common in the latter trials (all $ps < .0001$). This finding strongly suggests that the reencoding of the source items in Test Phase 1 involved the processing of relational rather than more purely perceptual cues, because the baboons gave priority to the processing of relational cues when the relational and perceptual cues conflicted.

Experiment 2: Matching relations across dimensions

Humans are capable of matching relations across dimensions and can, for example, indicate that two red objects illustrate the relation of sameness (considering color cues), just as do two identical triangles (considering the shape cues). To our knowledge, this ability to match relations across dimensions has never been investigated in animals. In Experiment 2, the baboons received cross-dimensional relational trials and were requested to match stimulus pairs on the basis of relational cues expressed by different dimensions in the sample (e.g., color cue) and comparison (e.g., shape cue) pairs. It was reasoned that correct relational matching responses with this design would provide evidence that the baboons could match relations across dimensions.

Method

Cross-dimensional relational matching was tested in Experiment 2 with the same baboons and apparatus described above. After a period of retraining using the same procedure as during Test Phase 1 of Experiment 1 (range 228–4,928 training trials), each baboon completed ten blocks of 128 randomized trials consisting of 112 baseline trials (56 color and 56 shape trials) identical to the baseline trials of Experiment 1 (see Fig. 1) and 16 probe trials

(8 color sample and 8 shape sample trials). In contrast to the baseline trials, the source pair in the probe trials used unidimensional stimuli. Thus, the stimuli composing the source pair (see Fig. 5) were either two vertical bars with the same or a different color (color sample trials) or two of the same or different white shapes (shape sample trials). Touching the source pair triggered the presentation of the two comparison pairs, which were drawn from the dimension not illustrated in the source pair (see Fig. 5). Thus, the source relation was shown with color cues and the target relation with shape cues in the color sample trials, and vice versa for the shape sample trials. The baboons were rewarded if they touched the comparison pair that instantiated the same relational structure as the source pair.

Results and discussion

A preliminary analysis (one-way analysis of variance) verified whether performance in the probe trials varied on average across the blocks. Because the effect of block was not significant [$F(9, 27) = .85, p > .05$], data were pooled across the ten test blocks for the statistical analyses. Overall, the performance was of 76.6% correct on average in baseline trials (range: 74.7%–81.6%) and 63.4% correct (range: 54.4%–76.2%) during the probe trials. Following the same statistical procedure used in Experiment 1, the average scores achieved by each individual (Fig. 6) were compared to chance level with Bonferroni-corrected two-tailed binomial tests. All subjects demonstrated reliable performance (all $ps < .0001$) in the baseline trials, and three of them (i.e., CAUET, DAN, and VIVIEN) continued to perform well above chance in the probe trials (all $ps < .01$), in which they were required to match relations across the color and shape dimensions.

In Experiment 2, we assumed that the vertical rectangles would signal the need to process color relations, while two white shapes would signal the need to process the shapes cues, because in the design of Experiment 1 the subjects had been trained to do so. However, inspection of Fig. 5 suggests that an alternative strategy was possible in the case of the *same* trials. Consider, for instance, the upper left panel of Fig. 5. In these trials, the baboons might consider the shape of the sample items, and match the sample and comparison pairs according to shape cues, regardless of color variations. Alternatively, they might match these two pairs on color cues in the trial of the upper right panel of Fig. 5. However, this strategy would not be efficient in the case of the *different* trials (see the bottom two panels of Fig. 5). To further the exploration of cross-dimensional matching in baboons, we thus investigated whether the three baboons that were above chance on average in the probe trials (with *same* and *different* trials confounded) also showed above-chance performance when the analysis was restricted to the *different*

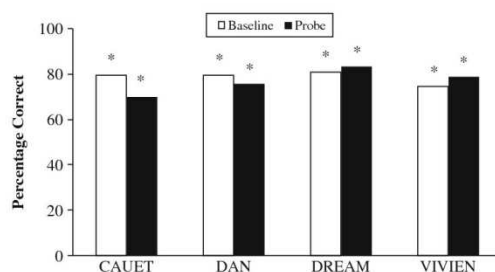




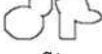





Fig. 4 Percentages of correct responses in the baseline and probe trials of Test Phase 2 of Experiment 1. * $p < .0001$

Fig. 5 Illustration of the trial procedure of Experiment 2 for the color- and shape-sample trials

	Color Sample trial		Shape Sample trial	
<i>Same</i>	 S+	 S-	 S+	 S-
<i>Different</i>	 S+	 S-	 S+	 S-

trials. Above-chance performance in these trials was confirmed for CAUET (66.2 % correct, Bonferroni-corrected binomial test, $p < .0025$), but not for DAN (54 % correct) or VIVIEN (25 % correct). The results therefore indicate that one of the baboons at least could match relations across dimensions.

General discussion

One important property of analogical reasoning in humans is the fact that the dimension to process in the source domain is often determined by the relational properties of the target domain. Analogical reasoning therefore implies flexibility in the encoding of the source domain. The first major contribution of our study has been to demonstrate that a nonhuman primate species can express this flexibility. This finding is clearly demonstrated in Experiment 1, in which DAN could use the information provided by the comparison pair to appropriately consider the relation expressed by the relevant dimension of the sample pairs. It moreover did so in the consistent as well as in the more difficult inconsistent trials, in addition to the random blocks of trials, ruling out the possible effect of proactive interference from the previous trials.

Early comparative studies have already shown that apes (Thompson et al., 1997; Vonk, 2003) and baboons (Fagot & Thompson, 2011; Truppa et al., 2011) can match relations with relations in the unidimensional RMTS task involving pairs of items, but these findings were subject to criticisms by Penn, Holyoak, and Povinelli (2008), who argued that the nonhuman primates might use estimates of the perceptual variability in the source and target domains, rather than relations per se. This hypothesis is clearly ruled out by the

fact that DAN continued to provide *same* responses when the stimulus dimension to process within the source pair indicated a *same* relation but the dimension to reject in that pair indicated a *different* relation. The second major contribution of our study has been to reveal that, in contrast to Penn et al.’s position, baboons may use a more complex cognitive strategy to solve the RMTS task, and continued to match relations even when perceptual variability cues conflicted with the relational judgments.

The last major contribution of this study has been to provide the first evidence that a baboon can match relations across dimensions. We observed that three baboons were successful on average in Experiment 2, and that one of them continued to be successful when the analysis was restricted to the *different* trials, on which the relational strategy was the only one viable. Noticeably, however, the baboon (CAUET) that showed the strongest evidence of cross-dimensional matching in Experiment 2 was not the same baboon (i.e., DAN) who demonstrated the best performance in Experiment 1. This finding is not surprising, considering that the cognitive processes required by these two tasks are somewhat different. Experiment 1 implied that the baboons respond to the task by matching the sample and comparison pairs on the same dimension, while neglecting the interference of the alternative dimension. By contrast, Experiment 2 implied that the subject should make use of the relations expressed by both dimensions and compare and combine the information derived from these two dimensions for correct matching. Regardless of the identity of the most successful baboons in Experiments 1 and 2, our study demonstrates that these two tasks are solvable by baboons, suggesting that these animals have at least the basic abilities to reason about second-order relations and to solve analogy problems.

An abundant literature has indicated that analogical performance is improved in human infants by the acquisition of verbal labels (Rattermann & Gentner, 1998). The immediate theoretical implication of our study is that language learning is not a mandatory prerequisite for the appropriate encoding of analogical problems. We do not want to assert that the baboon is a nonhuman primate species particularly gifted for analogical reasoning. Admittedly, their success in the task could only be obtained after thousands of training trials, and this training was likely the key factor leading to successful RMTS. The main function of word learning might be to

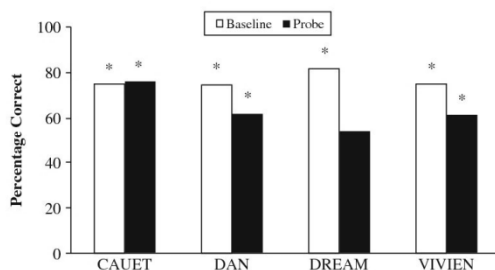


Fig. 6 Percentages of correct responses in the baseline and probe trials of Experiment 2. * $p < .01$

boost analogical reasoning by rapidly orienting the attention of the children toward the relational structure of a problem (Loewenstein & Gentner, 2005). That function was likely accomplished in our study by the extensive training during which the baboons learned to flexibly shift their attention from dimension to dimension and relation to relation.

In spite of the remarkable achievement reported here, an important difference remains between analogical reasoning in humans and animals: The ability to solve analogical reasoning RMTS problems has been demonstrated in animals only in tasks involving dimensions and relations on which they have already been trained (e.g., Fagot & Thompson, 2011; Truppa et al., 2011). This aspect of the comparative literature contrasts sharply with analogical reasoning in humans, which readily extends beyond particular test dimensions or domains of knowledge (e.g., Gentner, 2003). The next challenge for researchers will be to identify the source of that difference between humans and animals. We suspect that its source will be found in the interplay between word (or symbol) learning and attentional processes.

Author note This research was funded by Grant No. ANR-2010-BLANC-1908-01 and an EC EUPRIMNET-II grant, as well as by support from the PACA regional council (Volet Exploratoire, 2008). It was conducted at the Rousset-sur-Arc Primate Center (CNRS-UPS846), France. The authors thank D. Paleressompoulle, J. C. Marin, and all of the staff of the primate center for technical support. Caralyn Kemp is acknowledged for her help in revising an early version of the manuscript. Robert French is acknowledged for stimulating discussions that triggered that research.

References

- Cook, R. G., & Wasserman, E. A. (2007). Learning and transfer of relational matching-to-sample by pigeons. *Psychonomic Bulletin & Review*, *14*, 1107–1114. doi:10.3758/BF03193099
- Fagot, J., & Bonté, E. (2010). Automated testing of cognitive performance in monkeys: Use of a battery of computerized test systems by a troop of semi-free-ranging baboons (*Papio papio*). *Behavior Research Methods*, *42*, 507–516. doi:10.3758/BRM.42.2.507
- Fagot, J., & Paleressompoulle, D. (2009). Automatic testing of cognitive performance in baboons maintained in social groups. *Behavior Research Methods*, *41*, 396–404. doi:10.3758/BRM.41.2.396
- Fagot, J., & Parron, C. (2010). Relational matching in baboons (*Papio papio*) with reduced grouping requirements. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *36*, 184–193. doi:10.1037/a0017169
- Fagot, J., & Thompson, R. K. R. (2011). Generalized relational matching by guinea baboons (*Papio papio*) in two-by-two-item analogy problems. *Psychological Science*, *22*, 1304–1309. doi:10.1177/0956797611422916
- Fagot, J., Wasserman, E. A., & Young, M. E. (2001). Discriminating the relation between relations: The role of entropy in abstract conceptualization by baboons (*Papio papio*) and humans (*Homo sapiens*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *27*, 316–328. doi:10.1037/0097-7403.27.4.316
- Flemming, T. M., Beran, M. J., & Washburn, D. A. (2007). Disconnect in concept learning by rhesus monkeys (*Macaca mulatta*): Judgment of relations and relations-between-relations. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *33*, 55–63. doi:10.1037/0097-7403.33.1.55
- Flemming, T. M., Thompson, R. K. R., 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*, 353–360. doi:10.1037/a0022142
- Gentner, D. (2002). Analogical reasoning, psychology of. In L. Nadel (Ed.), *Encyclopedia of cognitive science*. London, U.K.: Nature Publishing Group.
- Gentner, D. (2003). Why we're so smart. In D. Gentner & S. Goldin-Meadow (Eds.), *Language in mind: Advances in the study of language and thought* (pp. 195–235). Cambridge, MA: MIT Press.
- Gentner, D., Loewenstein, J., & Thompson, L. (2003). Learning and transfer: A general role for analogical encoding. *Journal of Educational Psychology*, *95*, 393. doi:10.1037/0022-0663.95.2.393
- Gentner, D., Simms, N., & Flusberg, S. (2009). Relational language helps children reason analogically. In N. Taatgen & H. van Rijn (Eds.), *Proceedings of the 31st Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 1054–1059). Austin, TX: Cognitive Science Society.
- Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1980). Analogical problem solving. *Cognitive Psychology*, *12*, 306–355. doi:10.1016/0010-0285(80)90013-4
- Gitomer, D. H., Curtis, M. E., Glaser, R., & Lensky, D. B. (1987). Processing differences as a function of item difficulty in verbal analogy performance. *Journal of Educational Psychology*, *79*, 212–219. doi:10.1037/0022-0663.79.3.212
- Haun, D. B. M., & Call, J. (2009). Great apes' capacities to recognize relational similarity. *Cognition*, *110*, 147–159. doi:10.1016/j.cognition.2008.10.012
- Holyoak, K. J., & Thagard, P. (1989). Analogical mapping by constraint satisfaction. *Cognitive Science*, *13*, 295–355. doi:10.1016/0364-0213(89)90016-5
- Holyoak, K. J., & Thagard, P. (1996). *Mental leaps: Analogy in creative thought*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Hribar, A., Haun, D., & Call, J. (2011). Great apes' strategies to map spatial relations. *Animal Cognition*, *14*, 511–523. doi:10.1007/s10071-011-0385-6
- Kennedy, E. H., & Fragaszy, D. M. (2008). Analogical reasoning in a capuchin monkey (*Cebus apella*). *Journal of Comparative Psychology*, *122*, 167–175. doi:10.1037/0735-7036.122.2.167
- Loewenstein, J., & Gentner, D. (2005). Relational language and the development of relational mapping. *Cognitive Psychology*, *50*, 315–353. doi:10.1016/j.cogpsych.2004.09.004
- Oden, D. L., Thompson, R. K. R., & Premack, D. (1988). Spontaneous transfer of matching by infant chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *14*, 140–145. doi:10.1037/0097-7403.14.2.140
- Oden, D. L., Thompson, R. K. R., & Premack, D. (1990). Infant chimpanzees spontaneously perceive both concrete and abstract same/different relations. *Child Development*, *61*, 621–631. doi:10.1111/j.1467-8624.1990.tb02807.x
- Penn, D. C., Holyoak, K. J., & Povinelli, D. J. (2008). Darwin's mistake: Explaining the discontinuity between human and non-human minds. *The Behavioral and Brain Sciences*, *31*, 109–178. doi:10.1017/s0140525x08003543
- Premack, D. (1983). The codes of man and beasts. *The Behavioral and Brain Sciences*, *6*, 148–149. doi:10.1017/S0140525X00015181
- Ramscar, M., & Pain, H. (1996). Can a real distinction be made between cognitive theories of analogy and categorization? In G. W. Cottrell

- (Ed.), *Proceedings of the 18th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 346–351). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Rattermann, M. J., & Gentner, D. (1998). The effect of language on similarity: The use of relational labels improves young children's performance in a mapping task. In K. Holyoak, D. Gentner, & B. Kokinov (Eds.), *Advances in analogy research: Integration of theory and data from the cognitive, computational, and neural sciences* (pp. 274–282). Sophia, Bulgaria: New Bulgarian University.
- Sternberg, R. J. (1977). *Intelligence, information processing, and analogical reasoning: The componential analysis of human abilities*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Thompson, R. K. R., Oden, D. L., & Boysen, S. T. (1997). Language-naïve chimpanzees (*Pan troglodytes*) judge relations between relations in a conceptual matching-to-sample task. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 23, 31–43. doi:10.1037/0097-7403.23.1.31
- Truppa, V., Mortari, E. P., Garofoli, D., Privitera, S., & Visalberghi, E. (2011). Same/different concept learning by capuchin monkeys in matching-to-sample tasks. *PLoS One*, 6, 23809. doi:10.1371/journal.pone.0023809
- Vonk, J. (2003). Gorilla (*Gorilla gorilla gorilla*) and orangutan (*Pongo abelii*) understanding of first-and second-order relations. *Animal Cognition*, 6, 77–86. doi:10.1007/s10071-003-0159-x
- Yan, J., Forbus, K. D., & Gentner, D. (2003). A theory of rerepresentation in analogical matching. In R. Alterman & D. Kirsh (Eds.), *Proceedings of the 25th Annual Meeting of the Cognitive Science Society* (pp. 1265–1270). Mahwah, NJ: Erlbaum.

PARTIE IV

DISCUSSION



©Faustin

Le raisonnement par analogie est une activité cognitive qui permet de juger des similarités entre des relations. Ce type de raisonnement présente un intérêt adaptatif puisqu'il permet de réagir de façon relativement adaptée à des situations nouvelles, en les comparant avec des situations déjà vécues jugées comme similaires. Le raisonnement par analogie a initialement été décrit chez l'homme et l'existence de telles capacités chez les animaux reste controversée dans la littérature.

L'objectif principal de cette thèse était de déterminer les continuités et discontinuités entre l'homme et les primates non humains dans leur capacité à raisonner par analogie. Pour ce faire, nous avons conduit plusieurs études afin de déterminer les capacités d'analogie d'une espèce de singes de l'ancien monde, le babouin.

Dans une première étude, nous avons montré que, comme chez l'homme, le traitement des relations chez le babouin résulte de l'intégration de plusieurs niveaux d'information, relative aux objets ainsi qu'aux relations qu'ils expriment (Maugard, Wasserman, et al., 2013). De plus, nous avons montré que la quantité d'items avec lesquels les babouins sont entraînés détermine la contribution relative de ces différents niveaux d'information dans les stratégies de traitement qu'ils développent. Dans une seconde étude, nous nous sommes attachés à décrire la stratégie employée par les babouins pour résoudre une tâche de type RMTS (Maugard, Marzouki, et al., 2013). Nous avons montré que les processus mis en œuvre pour résoudre cette tâche mobilisaient d'importantes ressources en mémoire de travail, suggérant un traitement parallèle des objets et des relations, et l'utilisation d'un raisonnement par analogie par opposition à un traitement unique de la variabilité perceptive. Dans une troisième étude, nous nous sommes intéressés à deux propriétés du raisonnement par analogie initialement décrites chez l'homme : (1) la capacité à encoder de manière flexible une paire d'objets *source* en fonction des propriétés exprimées par les paires d'objets *cible* et (2) la capacité à appairer des relations exprimées par des dimensions différentes (e.g., appairer une

relation d'identité de couleur avec une relation d'identité de forme). Nous avons montré que les babouins sont capables d'exprimer ces deux capacités, après entraînement (Fagot & Maugard, 2013).

Ces travaux nous apportent donc des éléments pour discuter les continuités et discontinuités entre primates humains et non humains, dans leur capacité à raisonner par analogie.

1. CONTINUITES ENTRE PRIMATES HUMAINS ET NON HUMAINS

Les résultats obtenus dans cette thèse ont montré la capacité du babouin à résoudre les différentes versions de la tâche de RMTS qui lui ont été proposées, en adoptant des stratégies faisant appel au raisonnement par analogie. De telles performances suggèrent que les processus d'analogies de l'homme ont une longue histoire évolutive ancrée dans la phylogénèse des primates non humains. On reconnaîtra cependant que les capacités d'analogies que l'on observe chez le babouin sont d'un niveau de complexité inférieur à ce qui s'observe chez l'homme. Chez l'enfant, en effet, les analogies s'étendent progressivement au cours du développement à des relations de haut niveau (e.g., des relations fonctionnelles ou des relations abstraites) qui requièrent un degré d'abstraction bien plus élevé que la tâche de RMTS. Nous discutons ci-dessous les différents éléments de continuité homme-animal qui se dégagent de cette thèse, ainsi que les facteurs pouvant expliquer cette différence dans la complexité des analogies possibles chez l'homme et le babouin.

1. 1. Continuités entre traitement perceptif et traitement conceptuel ?

Certains auteurs prônent l'existence d'une dissociation claire entre les processus de « haut niveau » impliqués dans la formation des concepts et les processus de « bas niveau » plus directement liés aux afférences perceptives (e.g., Mandler, 2000). Ainsi, selon Mandler, la catégorisation perceptive et la catégorisation conceptuelle mettraient en jeu des processus cognitifs de nature différente. La première impliquerait des processus automatiques qui combinerait les similarités perceptives des objets et généreraient des catégories d'informations, non accessibles à la pensée, qui serviraient à la reconnaissance des objets. La catégorisation conceptuelle, quant à elle, mettrait en jeu des processus de représentation des caractéristiques abstraites ou fonctionnelles des objets sous une forme conceptuelle dont les

contenus seraient accessibles à la pensée, pour effectuer des inférences inductives et résoudre des problèmes.

Cependant, des éléments de la littérature suggèrent que les phénomènes d'abstraction trouvent leurs racines dans des activités perceptives de plus bas niveau, suggérant une continuité et une interaction entre ces différents niveaux de traitement. Tout d'abord, plusieurs études montrent que les caractéristiques perceptives d'un stimulus conditionnent l'accès au concept qu'il sous-tend. Par exemple, dans une expérience mettant en jeu des relations entre les personnages d'une histoire, Gentner et Toupin (1986) ont montré que les enfants avaient du mal à reproduire une scène de l'histoire quand ils devaient le faire avec des personnages très similaires à ceux de l'histoire mais dont les rôles étaient inversés. Ce phénomène a également été mis en évidence chez l'adulte sur des concepts plus abstraits (Ross, 1987, 1989). L'auteur de ces études montre que des adultes ayant appris un principe de probabilités avec un certain type d'objets ont du mal à appliquer ce principe à un nouveau problème mettant en jeu les mêmes objets mais avec des rôles inversés. On peut par ailleurs penser que l'accès au concept fonctionnel (e.g., fonction de nettoyage) véhiculé par un objet (e.g., un balai) peut être facilité par certaines caractéristiques perceptives propres aux objets qui présentent cette fonction (e.g., la présence d'une brosse ou d'une surface spongieuse). Ces éléments montrent que la présence (ou l'absence) de certaines informations perceptives selon le contexte influence l'accès aux concepts.

Par ailleurs, d'autres éléments de la littérature laissent penser que l'architecture conceptuelle d'un individu pourrait également influencer sa perception du monde. Les Himbas de Namibie et les Berinmos de Papouasie-Nouvelle Guinée ont par exemple du mal à distinguer la couleur bleue de la couleur verte qui ne sont pas différenciées dans leurs langues respectives (Davidoff, Davies, & Roberson, 1999 ; Davidoff, Goldstein, Tharp, Wakui, & Fagot, 2012). Dans le domaine de la linguistique, des études montrent, que selon notre langue

maternelle, on peut à l'âge adulte devenir incapable de percevoir certains sons utilisés dans d'autres langues (Tench, 2003 ; Werker & Lalonde, 1988). Ces exemples suggèrent que les catégories d'unités sonores formées par l'apprentissage de notre langue maternelle conditionneraient notre perception.

L'existence d'une interaction entre perception et représentation conceptuelle fait également l'objet de la théorie de la cognition incarnée selon laquelle les traitements conceptuels seraient ancrés dans les traitements perceptifs (Barsalou, 1999). Ainsi, selon les termes de Barsalou (1999), les représentations conceptuelles seraient des « symboles perceptifs » multimodaux (i.e., impliquant plusieurs modalités sensorielles) formés par l'activation de circuits neurosensoriels associés à la perception d'objets. Par exemple, la représentation du concept de « tasse de café » impliquerait la simulation d'informations perceptives relatives à la vue, au toucher, au fait d'attraper ainsi qu'aux réactions internes qui reflètent l'émotion, la soif et les buts du sujet face à une tasse à café. Cette théorie est supportée par des données empiriques qui montrent que les traitements perceptifs influencent les traitements conceptuels suggérant que ces deux types de traitements mettent en jeu un système cognitif commun (van Dantzig, Pecher, Zeelenberg, & Barsalou, 2008). Ainsi, van Dantzig et al. (2008) se sont par exemple intéressés à l'effet d'un changement de modalité perceptive (i.e., vision, audition, toucher) entre deux tâches impliquant respectivement un traitement perceptif et un traitement conceptuel. Dans la première tâche, les sujets devaient localiser un stimulus perceptif (e.g., un flash lumineux ou une vibration) associé à une modalité particulière (e.g., vision ou toucher). Dans la seconde tâche, une phrase leur était proposée (e.g., « la banane est jaune » ou « la banane est lisse ») et ils devaient décider si la propriété (e.g., « couleur jaune » ou « texture lisse ») du concept énoncé dans cette phrase était vraie ou fausse. Les résultats montrent que lorsque la propriété mentionnée dans la phrase (e.g., « couleur jaune ») correspond à la même modalité (e.g. la vision) que le stimulus

(e.g., flash lumineux) présenté dans la première tâche, le temps de réponse des sujets est plus court que quand ces modalités sont différentes (e.g., vision et toucher). D'après ces auteurs, la tâche perceptive initiale aurait donc un effet sur la représentation du concept évoqué dans la phrase, suggérant que les traitements perceptifs et conceptuels mettent en jeu un même système cognitif (van Dantzig et al., 2008).

Tous ces éléments laissent penser que les traitements perceptifs et conceptuels sont imbriqués l'un dans l'autre et s'influencent mutuellement, et que des processus cognitifs communs sont impliqués dans les différents types d'analogies chez l'homme, qu'elles soient uniquement perceptives ou qu'elles impliquent des traitements abstraits de plus haut niveau.

En ce qui concerne les primates non humains, notre travail expérimental a permis de démontrer que les babouins sont au moins capables de raisonner par analogie sur des relations perceptives, comme l'homme peut également le faire. Il s'agit donc d'une première étape décisive vers la démonstration de processus d'analogie communs à l'homme et l'animal, qui dans ce cas semble très ancrée dans une analyse perceptive des dimensions des objets à traiter. Nous ne pouvons en revanche pas conclure quant à l'aptitude des babouins à faire des analogies moins perceptives (e.g., analogies fonctionnelles). A ma connaissance aucune étude n'a encore montré l'existence d'analogies fonctionnelles chez une espèce de singe de l'ancien monde. Cependant, l'Etude III conduite dans le cadre de cette thèse montre que les babouins peuvent appairer des relations exprimées par des dimensions différentes suggérant qu'ils peuvent, avec de l'entraînement, développer leur capacité à s'affranchir de la stricte similarité perceptive exprimée par des relations pour les appairer sur la base de caractéristiques plus abstraites.

1. 2. Flexibilité des processus d'abstraction

Dans la nature, deux objets de l'environnement entretiennent souvent plusieurs relations. Prenons par exemple les items suivants : « abeille » et « ruche ». Ces deux items entretiennent plusieurs relations possibles, comme « dormir dedans... » ou « travaille dedans... ». Les analogies spontanées, que l'homme fait au quotidien, impliquent donc la sélection de la relation la plus pertinente selon le contexte parmi toutes les relations qui peuvent exister entre deux objets. Les processus cognitifs impliqués dans les analogies doivent donc être suffisamment flexibles pour diriger l'attention vers une relation plutôt qu'une autre.

Bonté et al. (2011) ont montré que le babouin possède une flexibilité cognitive qui lui permet de déplacer rapidement son focus attentionnel d'une caractéristique du stimulus à une autre, selon sa pertinence. Cette flexibilité est possible lors du traitement d'attributs physiques (couleur ou forme du stimulus) ou de relations (identité ou différence ; Bonté et al., 2011). Dans cette thèse, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la flexibilité cognitive du babouin dans le traitement des analogies. A l'aide d'une tâche de RMTS mettant en jeu des relations *source* bidimensionnelles, nous avons montré que, comme l'homme, le babouin peut faire preuve d'une certaine flexibilité pour diriger son attention vers la relation pertinente d'un problème analogique. En effet, les résultats de l'Etude III montrent que selon les propriétés des paires *cible* qui lui sont présentées, le babouin est capable de porter attention à l'une ou l'autre des relations exprimées par la paire *source* pour résoudre correctement la tâche d'analogie.

Par ailleurs, cette étude (Etude III) montre que les babouins peuvent appairer des relations d'identité et de différence exprimées par des dimensions distinctes (e.g., appariement d'une relation d'identité de forme avec une relation d'identité de couleur). Comme chez

l'homme, les processus impliqués dans le raisonnement par analogie chez les primates non humains permettent un certain degré d'abstraction en s'affranchissant de la dimension (i.e., forme ou couleur) pour focaliser l'attention sur le concept relationnel, à savoir ici l'identité ou la différence.

Ces éléments suggèrent que les processus cognitifs communs aux primates humains et non humains impliqués dans le raisonnement par analogie possèdent deux propriétés. Premièrement, ils confèreraient à l'individu une certaine flexibilité dans l'encodage des relations lui permettant de sélectionner la relation pertinente selon le contexte. Deuxièmement, ils attribueraient à l'individu une capacité à focaliser son attention sur la structure relationnelle d'un problème indépendamment de la dimension qu'il exprime.

1. 3. Rôle de l'expérience et de l'apprentissage par essai-erreur

Si les processus cognitifs impliqués dans le raisonnement par analogie chez les primates humains et non humains semblent présenter certaines caractéristiques communes, qu'en est-il des facteurs qui influencent leur ontogénèse ? Les travaux conduits au cours de cette thèse montrent que, chez le babouin, l'expérience joue un rôle prépondérant dans l'émergence du raisonnement, et en particulier dans leur capacité à porter attention aux relations entre objets.

L'Etude I montre que, face à des matrices d'objets exprimant des relations, des babouins naïfs ou entraînés avec peu d'items portent attention aux dimensions purement perceptives des stimuli, à savoir les objets. A l'inverse, après un entraînement avec un grand nombre d'items différents, les babouins portent attention à la structure relationnelle des stimuli et diminuent l'attention portée aux objets. Ces résultats suggèrent que la variété d'exemplaires rencontrés joue un rôle considérable dans la capacité des singes à détecter la

structure relationnelle d'une relation. Cette hypothèse est soutenue par d'autres études conduites chez des macaques (Katz et al., 2002) et des capucins (Wright et al., 2003) qui montrent qu'une augmentation du nombre d'items utilisés pour l'entraînement améliore significativement les capacités de transfert des singes dans des tâches de discriminations de relations d'identité et de différence. Ce phénomène pourrait être expliqué par la tendance naturelle d'un système cognitif à rechercher les similarités de l'environnement qui conduirait à porter attention au seul élément commun des différents exemplaires d'une relation, à savoir leur structure relationnelle.

On peut supposer que ce facteur participe au développement des capacités d'analogies chez l'homme. Des résultats empiriques supportent cette hypothèse. Brown et Kane (1988) ont par exemple montré que la présentation successive de plusieurs problèmes à des enfants de 3, 4 et 5 ans augmentait l'attention qu'ils portaient envers les similarités structurelles des problèmes. Par ailleurs, on peut supposer que l'exposition à une variété d'illustrations d'une relation permettrait une meilleure connaissance de cette relation. En ce sens, le rôle de l'expérience rejoint la théorie développée par Goswami et Brown (1989, 1990) selon laquelle la connaissance des relations jouerait un rôle fondamental dans le développement des capacités d'analogies chez l'enfant. L'effet de l'expérience sur le déplacement attentionnel de l'objet vers la relation pourrait également expliquer la « bascule relationnelle » décrite par Gentner (1988) correspondant au fait que les enfants, au cours de leur développement, portent de moins en moins attention aux objets et de plus en plus attention aux structures relationnelles de l'environnement.

Par ailleurs, le dispositif utilisé dans le cadre de cette thèse permet de contrôler l'expérience individuelle de chaque babouin avec les tâches proposées, et en particulier l'entraînement suivi ainsi que le type d'apprentissage mis en œuvre. Nos protocoles utilisent les techniques de conditionnement opérant et impliquent des apprentissages associatifs par

essai-erreur mettant en jeu un nombre considérable d'essais d'entraînement, notamment pour les tâches incluant du raisonnement par analogie (Etudes II et III). L'Etude II met en jeu un appariement relationnel basé sur la forme des objets pour lequel les singes avaient déjà suivi un entraînement allant de 15 400 à 40 600 essais selon les sujets dans l'étude de Fagot et Thompson (2011). Quant à l'Etude III, l'entraînement dans la tâche d'appariement relationnel bidimensionnel a nécessité de 38 400 à 71 690 essais selon les sujets. Ces éléments montrent qu'un simple apprentissage par essai-erreur étalé sur des milliers d'essais a permis au babouin de développer des stratégies cognitives complexes, faisant intervenir du raisonnement par analogie. C'est donc au fil de milliers d'essais, que les babouins, guidés par le conditionnement opérant, portèrent attention à des dimensions de plus en plus structurales des stimuli. On peut émettre l'hypothèse que cet apprentissage associatif par essai-erreur soit également à l'œuvre chez l'homme lors de ses multiples interactions avec l'environnement et participe au développement de ses compétences cognitives. Cependant, alors que l'expérience d'un babouin en captivité dans une tâche d'analogie informatisée peut être contrôlée, il n'en est pas de même chez l'homme et la vérification empirique de cette hypothèse semble difficile. On sait néanmoins que certains apprentissages complexes nécessitent beaucoup d'entraînement et que l'on a souvent tendance à sous-estimer le nombre d'essais nécessaires à l'émergence de certaines compétences. En témoigne une récente étude sur l'apprentissage de la marche qui montre que cet apprentissage nécessite en moyenne 2 368 pas et 17 chutes par heure chez l'enfant entre l'âge de 12 et de 19 mois (Adolph et al., 2012).

2. VARIABILITE INTERINDIVIDUELLE ET ROLE DES FONCTIONS EXECUTIVES

La capacité à résoudre des analogies perceptives émerge chez le jeune enfant dès l'âge de 2 ans (Smith, 1984). Elle s'étend ensuite progressivement à des relations de plus en plus complexes et abstraites et finit par décroître chez la personne âgée (Viskontas et al., 2004). Chez le babouin, les performances en appariement relationnel évoluent également avec l'âge comme le montre la figure 35 (ci-après) rapportant des données publiées dans Fagot et Thompson (2011). Plus précisément, l'analyse de l'évolution des performances en fonction de l'âge révèle une corrélation négative entre ces deux variables, indiquant une baisse des capacités d'analogie avec l'âge (Minier et al., sous presse, voir Annexe 1).

Cette variabilité interindividuelle ne peut pas être expliquée par l'expérience des sujets avec la tâche puisqu'à nombres d'essais presque équivalents, deux sujets peuvent avoir des performances très différentes en appariement relationnel (e.g. à environ 16 500 essais, ATM : 49.3 % de réponses correctes et BAR : 84.7 % de réponses correctes ; cf. Figure 35). On peut cependant émettre l'hypothèse que cette variabilité soit le reflet de profils cognitifs individuels différents qui seraient en partie déterminés par l'âge.

Sujet	Sexe	Age	Nombre d'essais	% correct
DRE	F	1.6	17 900	81.3*
CAU	M	1.9	15 400	81.7*
CLO	M	2.1	32 100	81*
BAR	M	2.7	16 900	80*
BOB	M	3.4	17 900	84.7*
ART	M	3.4	22 200	76.6
ARI	F	3.4	40 600	65.6
ANG	F	3.8	30 200	61.7
VIO	F	4.2	37 600	61.7
VIV	M	4.4	24 100	72
VAN	F	4.7	23 900	53.3
URA	F	5.2	18 100	51
ROM	F	8.9	9 300	49.7
ATM	F	11	16 500	49.3
MON	F	12	5 500	51.3
MIC	F	13.1	10 500	51
KAL	F	13.5	4 800	50.3
BRI	F	23.8	13 000	49.7
		Moyenne	19 806	57.0

Figure 35. Données issues de l'étude de Fagot et Thompson (2011) mentionnant le pourcentage de réponses correctes sur 300 essais. Les astérisques indiquent un niveau de performance supérieur au critère de 80% d'essais réussi fixé dans cette étude.

On sait que les fonctions cognitives chez les primates non humains, et en particulier l'efficacité de leur contrôle exécutif, évoluent avec l'âge (Bonté et al., sous presse ; Moore, Killiany, Herndon, Rosene, & Moss, 2006 ; Picq, 2007 ; Weed, Bryant, & Perry, 2008). Plus précisément, une étude conduite chez le babouin décrit une maturation des fonctions exécutives jusqu'à l'âge de 6-8 ans puis une diminution progressive de leur efficacité (Bonté et al., 2011). Pour tester l'hypothèse d'un lien entre performances en analogie et efficacité du contrôle exécutif, nous avons conduit une étude en collaboration avec Laure Minier, Agnès Blaye, Yannick Glady et Jean-Pierre Thibaut (Minier et al., sous presse). Dans ce cadre, nous avons étudié le rapport entre les performances en RMTS (données issues de Fagot &

Thompson, 2011) et les profils individuels des réponses pour 16 individus dans des tâches de flexibilité cognitive (données issues de Bonté et al., 2011 ; cf. Figure 36.A) et d'inhibition (données issues de Fagot, Bonté, & Hopkins, 2013, cf. Figure 37.A). La flexibilité cognitive des babouins a été étudiée par Bonté et al. (2011) à l'aide d'une tâche informatisée présentée dans la figure 36.A dans laquelle les babouins devaient adapter leurs réponses à des changements successifs de consignes. Les capacités d'inhibition des babouins ont été estimées à l'aide d'une tâche informatisée de recherche visuelle présentée dans la figure 37. A. dans laquelle ils devaient sélectionner une cible parmi des distracteurs (Fagot et al., 2013). L'analyse de ces données montre que l'efficacité du contrôle exécutif (i.e., la flexibilité cognitive et l'inhibition) est d'une part négativement corrélée à l'âge des sujets, et d'autre part positivement corrélée aux performances en appariement relationnel, comme le rapportent les figures 36.B et 37.B.

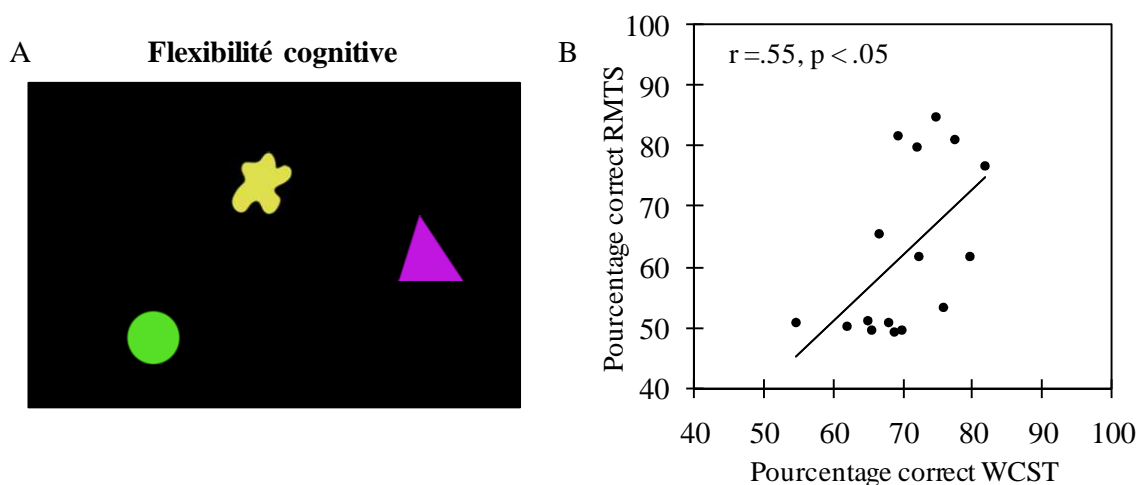


Figure 36. Tâche de Wisconsin Card Sorting Test (adaptation du WCST ; Berg, 1948) et corrélation avec les performances d'appariement relationnel. Dans la tâche de WCST (Figure 36.A), les affichages comportent 3 objets et le babouin doit sélectionner la dimension « forme cercle » quelle que soit la couleur. Lorsqu'il a atteint le critère de réussite, la règle change et il doit désormais choisir les stimuli de « couleur jaune ». Cette procédure se poursuit, avec la règle de choix « forme triangle », puis avec la règle « couleur violette ». La flexibilité cognitive est mesurée par les pourcentages de réponses correctes pour les 25 essais suivant chaque changement de règle (voir Bonté et al., 2011). La figure 36.B représente la corrélation et la régression linéaire entre flexibilité cognitive et performance en RMTS.

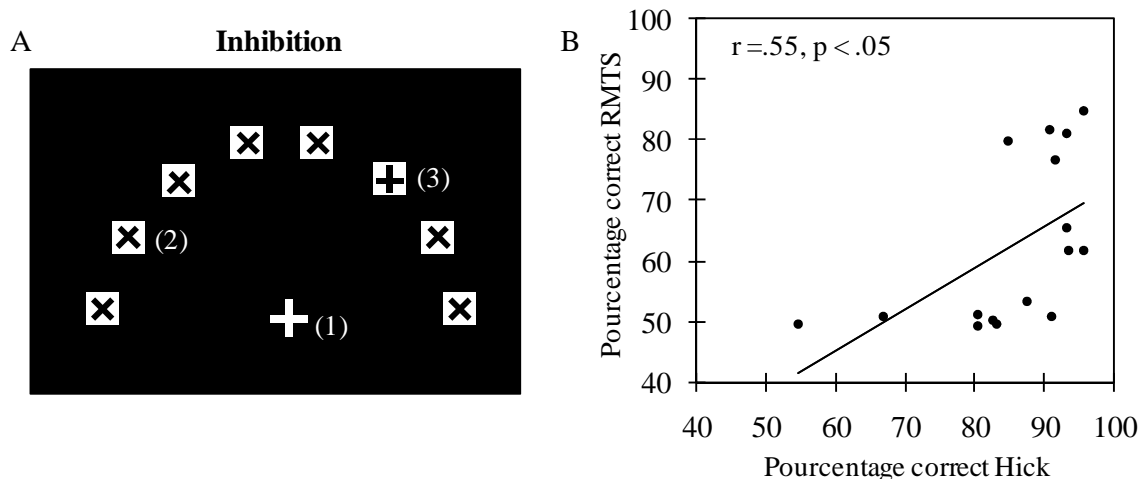


Figure 37. Tâche de Hick (adaptation de la tâche de Hick, 1952) et corrélation avec les performances d'appariement relationnel. L'inhibition a été testée par la tâche de Hick (figure 37.A, voir Fagot et al., 2013). Le babouin touche la croix de fixation (1) puis s'affichent plusieurs carrés blancs (2) marqués d'un «x». Un carré devient alors la cible (3) lorsqu'un signe « + » s'inscrit en son centre à la place du signe «x». Le babouin doit alors relâcher la croix de fixation pour toucher la cible. L'inhibition est mesurée par le pourcentage de réponses où l'animal parvient à sélectionner correctement la cible (voir Fagot et al., 2013). La figure 37.B représente la corrélation et la régression linéaire entre capacité d'inhibition et performance en RMTS.

Ces résultats suggèrent que chez le primate non humain, la variabilité interindividuelle liée à l'âge dans la capacité à raisonner par analogie est en partie déterminée par l'efficacité du contrôle exécutif. Des études corrélationnelles conduites chez l'homme vont dans le même sens, montrant que les fonctions exécutives d'inhibition, de flexibilité cognitive et de mise à jour en mémoire de travail sont positivement corrélées aux performances dans des tâches d'analogie (Chuderska & Chuderski, 2009 ; Thibaut, French, Mussault, Gérard, & Glady, 2011). Ces données chez le primate non humain et chez l'homme soutiennent la théorie proposée par Richland et al. (2006), selon laquelle le développement des fonctions exécutives jouerait un rôle important dans l'émergence des capacités d'analogie chez l'enfant humain. Par ailleurs, ces éléments suggèrent que les fonctions exécutives interviennent dans les processus cognitifs communs à l'homme et aux primates non humains impliqués dans le

raisonnement par analogie ; (1) dans leur composante inhibitrice, pour ignorer les éléments non pertinents d'un problème, (2) dans la quantité de traitements parallèles qu'elles permettent en mémoire de travail, et enfin (3) dans leur composante flexible permettant une alternance du focus attentionnel face aux différents éléments d'un problème.

Par ailleurs, chez le babouin, on peut également penser que l'âge auquel un individu a commencé à interagir avec le dispositif influence ses performances dans la tâche d'appariement relationnel et génère une autre variabilité au sein du groupe. Pour tester cette hypothèse, nous avons comparé les performances des 10 sujets les plus jeunes dans l'étude de Fagot et Thompson (2011) avec leurs performances deux ans et demi après dans le cadre de l'Etude II présentée dans cette thèse (Maugard, Marzouki et al., 2013). Ces données sont rapportées figure 38.

Sujet	Janvier 2010		Août 2012	
	Âge	% correct	Âge	% correct
DRE	1.6	81.3	4.1	95.8
CAU	1.9	81.7	4.4	85.0
CLO	2.1	81	4.6	81.9
BAR	2.7	80	5.2	87.1
BOB	3.4	65.6	5.9	86.6
ART	3.4	76.6	5.9	84.0
ARI	3.4	84.7	5.9	89.4
ANG	3.8	61.7	6.3	77.4
VIO	4.2	61.7	6.7	79.0
VIV	4.4	72	6.9	83.3

Figure 38. Comparaison des performances dans la tâche d'appariement relationnel entre janvier 2010 (données issues de Fagot & Thompson, 2011) et août 2012 (données issues de Maugard, Marzouki et al., 2013).

Cette analyse montre que les performances de ces 10 sujets se sont améliorées entre les deux études (t -test, $t(9) = -4.9$, $p < .001$). Ces résultats peuvent être expliqués par le fait

que, pendant cette période de deux ans et demi, ces 10 sujets ont été entraînés dans des tâches d'appariement relationnel dans le cadre d'autres études (e.g., Flemming, Thompson, & Fagot, 2013). En revanche, on peut remarquer que ces 10 babouins atteignent de bien meilleures performances que les individus de cette classe d'âge testés dans l'étude de Fagot et Thompson (2011), dont la moyenne des performances entre 4.1 et 6.9 ans était de 59.5 %. On peut émettre l'hypothèse que ces 10 sujets, ayant été exposés précocement au dispositif, ont développé des fonctions exécutives particulièrement efficaces par rapport à leurs aînés. En effet, lors de leurs interactions quotidiennes avec les dispositifs, ces animaux ont rencontré une variété de tâches informatisées qui ont pu améliorer l'efficacité de leur contrôle exécutif ; comme par exemple leur capacité à s'adapter de manière flexible à de nouvelles tâches, leur capacité à retenir des informations à court terme ou encore à ignorer les éléments non pertinents d'un problème pour focaliser leur attention sur les contenus pertinents. Cette hypothèse suggère qu'il pourrait exister une période sensible chez le jeune babouin, au cours de laquelle l'efficacité des fonctions exécutives pourrait se développer si l'environnement est stimulant. Cette période semble se terminer vers 4 ou 5 ans. Le nombre et la variété des interactions d'un individu avec son environnement pendant cette période sensible pourraient être déterminants dans l'établissement du profil exécutif de cet individu à long terme. Dans ce sens, une étude longitudinale récente suggère que l'efficacité des fonctions exécutives chez des enfants humains à 4 ans prédit leurs compétences futures en analogie à l'âge de 15 ans (Richland & Burchinal, 2013).

3. DISCONTINUITES ENTRE PRIMATES HUMAINS ET NON HUMAINS

Les travaux conduits dans le cadre de cette thèse suggèrent certaines continuités entre l'homme et les primates non humains dans leur capacité à raisonner par analogie. On peut également s'intéresser aux éventuelles discontinuités entre ces espèces. Dans cette perspective, l'étude de la littérature chez les primates non humains suggère certaines discontinuités avec l'homme.

3. 1. Capacités de généralisation

La première discontinuité potentielle concerne le pouvoir de généralisation (c'est-à-dire la capacité à appliquer spontanément une réponse apprise face à un stimulus nouveau). Les études portant sur le raisonnement par analogie ou sur l'apprentissage de concepts abstraits chez les primates non humains, y compris celles présentées dans le cadre de cette thèse, utilisent dans les phases d'entraînement et de test des stimuli perceptivement proches, bien que différents (D'Amato & Van Sant, 1988 ; Fagot & Parron, 2010 ; Maugard, Wasserman, et al., 2013 ; Wasserman, Young, et al., 2001). De plus, comme les résultats négatifs sont rarement publiés, on peut penser que le pouvoir de généralisation des singes se limite à des dimensions ou des relations sur lesquelles ils ont été préalablement entraînés. Par exemple un babouin qui aurait appris à appairer des relations d'identité et de différence exprimées par des formes géométriques, présenterait des capacités de transfert limitées à un matériel très proche de celui utilisé durant l'entraînement (i.e., à savoir des formes géométriques). Les résultats de l'Etude III suggèrent cependant que le babouin pourrait, dans une certaine mesure, et avec un entraînement conséquent, généraliser ses réponses d'appariement relationnel à des relations exprimées par de nouvelles dimensions (Fagot &

Maugard, 2013). Ces capacités de généralisation restent toutefois bien en deçà des phénomènes de généralisation qui interviennent chez l'homme (Penn et al., 2008).

3. 2. Raisonnement par analogie sur des relations fonctionnelles et abstraites

La littérature suggère une seconde discontinuité potentielle entre l'homme et les primates non humains dans leur capacité à raisonner par analogie sur des relations de haut niveau (e.g., relations fonctionnelles et relations abstraites). En effet, les études s'intéressant aux capacités d'analogie des primates non humains démontrent essentiellement leur aptitude à raisonner sur des relations perceptives, à l'exception de l'étude de Gillan et al. (1981) conduite sur un chimpanzé entraîné au langage capable de résoudre une tâche d'analogie de type $A : B :: C : D$ mettant en jeu des relations fonctionnelles. Chez l'homme, l'émergence au cours du développement de capacités à raisonner par analogie sur des relations perceptives (Smith, 1984) puis des relations fonctionnelles (Thibaut et al., 2010a) et abstraites (Gentner, 2002) est clairement démontrée. Ce manque de résultats concernant les analogies fonctionnelles chez les singes peut provenir (1) du fait que ce type d'analogies n'ait pas vraiment été testé chez ces espèces, les études se limitant à des protocoles qui n'utilisent que des relations perceptives, ou (2) d'une incapacité à effectuer ce type d'inférence chez ces espèces.

On peut émettre l'hypothèse que ces discontinuités potentielles entre l'homme et les primates non humains s'expliquent par des différences dans leur capacité à focaliser leur attention sur les dimensions structurelles des problèmes. En effet, le fait de porter attention à la structure relationnelle d'un problème potentialiserait les capacités de généralisation d'un individu. En revanche, un individu qui concentrerait son attention sur les caractéristiques perceptives propres à un problème aurait certainement plus de difficulté à généraliser une réponse face à un nouveau problème structurellement proche. Par ailleurs, on peut penser que

l'apprentissage de la pertinence des dimensions structurelles engagerait plus facilement un individu dans des processus de comparaison sur des relations qui l'entourent, favorisant ainsi l'apprentissage de relations exprimées par des dimensions variées.

3. 3. Une attention différente aux objets visuels

Certaines études suggèrent que l'homme et les primates non humains perçoivent et traitent les objets visuels de différentes manières. Chez l'homme, des expériences montrent que lorsque l'on présente à un sujet un stimulus fait d'une grande lettre (e.g., S) composée de petites lettres identiques (e.g., H), il identifie plus rapidement la grande lettre (i.e., la structure globale) que les petites (i.e., la structure locale ; Navon, 1977). De plus, il peut ignorer les éléments locaux (e.g., H) quand il doit identifier la structure globale (e.g., S), mais il est incapable d'ignorer la structure globale quand il cherche à identifier les éléments locaux. Ces résultats, répliqués de nombreuses fois (Kimchi, 1988 ; Paquet & Merikle, 1984, 1988) ont conduit Navon (1977, 2003) à développer la théorie de la précedence du traitement global selon laquelle la perception visuelle chez l'homme est un processus séquentiel dans lequel la structure globale d'un stimulus est perçu avant les détails locaux.

Chez les primates non humains, plusieurs études montrent qu'à l'inverse, ils discriminent plus rapidement et plus efficacement les éléments locaux que la structure globale d'un stimulus (babouin : Deruelle & Fagot, 1998 ; Fagot & Deruelle, 1997 ; macaque : Hopkins & Washburn, 2002 ; Parron & Fagot, 2007). La priorité donnée au traitement des éléments globaux ou locaux pourrait influencer l'attention qu'un individu porte d'emblée à la structure relationnelle d'un nouveau problème. Ainsi, on peut envisager que, chez l'homme, la précedence de la structure globale dirige l'attention vers la structure relationnelle des problèmes alors que, chez le singe, la précedence des éléments locaux attire l'attention vers

les caractéristiques locales des objets propres aux stimuli, guidant les processus de mise en correspondance sur des éléments de surface peu généralisables.

3. 4. Différents types de généralisation

Par ailleurs, la littérature évoque l'implication de processus de généralisation différents intervenant dans les apprentissages chez l'homme et chez les primates non humains. Il existerait chez l'homme deux types de processus permettant de généraliser des réponses apprises à de nouveaux stimuli (Shiffrin & Schneider, 1977 ; Sloman, 1996). La réponse à un nouveau stimulus pourrait dépendre des similarités de surface que ce stimulus partage avec la représentation de stimuli déjà stockés en mémoire, plus précisément du chevauchement de leurs caractéristiques perceptives (Mackintosh, 1975 ; Nosofsky, 1984 ; Rescorla & Wagner, 1972). Un autre type de généralisation a été décrit chez l'homme qui serait basé sur des règles explicites sous-tendues par des structures logiques elles-mêmes caractérisées par des contenus et des variables (Allan, 1993 ; Allen & Brooks, 1991). Des études empiriques suggèrent que ces deux systèmes sont simultanément à l'œuvre chez l'homme et que le contexte favorise l'un ou l'autre des processus (Kemler Nelson, 1984 ; Shanks & Darby, 1998 ; Smith & Shapiro, 1989). En revanche, chez l'animal la majorité des travaux suggèrent que les apprentissages seraient surtout régis par des processus de généralisation basés sur les similarités perceptives (Penn et al., 2008). Cependant, certaines compétences cognitives décrites dans diverses espèces animales laissent penser qu'ils pourraient également posséder une certaine capacité à utiliser des règles. Cela pourrait par exemple expliquer leur capacité à faire des inférences transitives, c'est-à-dire à inférer que si $A < B$ et $B < C$, alors $A < C$ (primates : Gillan, 1981 ; poisson : Grosenick, Clement, & Femald, 2007 ; oiseau : Lazareva et al., 2004 ; Lazareva & Wasserman, 2006) ou encore à raisonner par analogie (Fagot & Maugard, 2013 ; Fagot & Thompson, 2011 ; Gillan et al., 1981 ; Truppa et al., 2011). On pourrait alors

imaginer que les deux types de généralisations décrites chez l'homme représentent les extrémités d'un même continuum et qu'à partir d'apprentissages associatifs basés sur des similarités perceptives, les animaux développent une certaine capacité à utiliser des règles non explicites face à des problèmes qu'ils connaissent bien. Néanmoins, dans le cas des analogies chez l'homme, l'association de règles explicites à des événements lui confèrerait un outil cognitif particulier pour aller au-delà des associations générées par les éléments de surface lui permettant de focaliser son attention sur les éléments pertinents des relations, à savoir leur structure relationnelle. A l'inverse, les primates non humains, dépourvus de moyens d'explicitation, produiraient dans la majorité des cas des réponses qui seraient essentiellement basées sur des prédictions statistiques dérivées de leurs expériences concrètes. On peut penser que cela limiterait leur aptitude à généraliser leurs réponses à des stimuli et des configurations relativement proches de celles utilisées pour leur entraînement.

3. 5. Rôle du langage chez l'homme

Enfin, la maîtrise du langage chez l'homme pourrait expliquer son incomparable capacité de généralisation ainsi que son aptitude à raisonner sur des relations de haut niveau. Certains auteurs ont proposé que, au cours du développement, l'apprentissage d'un langage relationnel, c'est-à-dire l'utilisation de mots pour désigner des relations (e.g., le mot « identique » pour la relation d'identité), aiderait l'enfant à considérer les relations comme des unités en dirigeant son attention vers la structure relationnelle des problèmes (Christie & Gentner, 2007, sous presse). Le rôle du langage relationnel dans les analogies semble par ailleurs confirmé par le fait que l'unique démonstration d'analogie sur des relations fonctionnelles chez un primate non humain provient d'un chimpanzé ayant préalablement appris un langage symbolique (Gillan et al., 1981). Selon Thompson (Thompson et al., 1997), l'utilisation de mots ou de symboles pour labelliser les relations permettrait de simplifier les

tâches d'analogie en réduisant la complexité des traitements qu'elles impliquent : le fait de labelliser les relations transformerait les tâches d'appariement relationnel (i.e., qui impliquent l'établissement d'une relation de second ordre) en tâches d'appariement simple (i.e., correspondant à l'appariement des labels relationnels). Chez les primates non humains, la limitation des capacités d'analogie corrélée à l'absence de langage laisse penser que les analogies fonctionnelles et abstraites engendrent des coûts cognitifs plus élevés que les analogies perceptives. En effet, on peut imaginer que la représentation en mémoire de travail d'une relation complexe (i.e., fonctionnelle ou abstraite) implique le traitement parallèle de plusieurs types d'informations ; (1) des informations perceptives (liées aux caractéristiques des objets), des informations sémantiques (liées aux rôles respectifs des objets) et des informations relationnelles (liées à la relation entre ces objets). Dans ce cas, le fait de posséder des mots auxquels sont associés des objets ou des relations permettrait à un système cognitif de regrouper différents types d'informations sous un même label, diminuant ainsi la charge cognitive liée à la représentation des relations en mémoire de travail.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Il existerait une continuité entre l'homme et les primates non humains (e.g., grands singes et singes de l'ancien monde) dans leur capacité à raisonner par analogie sur des relations perceptives. Cette continuité suggère la mise en œuvre de processus cognitifs similaires chez ces différentes espèces qui pourraient être hérités d'un ancêtre commun. En revanche, certains éléments de la littérature suggèrent également l'existence de discontinuités entre l'homme et les primates non humains, notamment dans leur potentiel de généralisation ainsi que dans leur capacité à raisonner par analogie sur des relations de haut niveau (i.e., relations fonctionnelles, relations abstraites). Certaines caractéristiques cognitives propres à l'homme pourraient expliquer ces discontinuités potentielles, comme par exemple la préférence du traitement global des stimuli visuels, ou encore la capacité à effectuer des apprentissages associatifs basés sur des règles explicites, ou enfin la maîtrise du langage et en particulier du langage relationnel.

Pour étudier l'importance respective de ces facteurs dans le développement des capacités d'analogie chez les primates, on pourrait envisager de conduire une série d'expériences à l'aide du dispositif développé à Rousset sur le groupe de babouins avec lequel j'ai travaillé dans le cadre de ma thèse. On pourrait tout d'abord tester les babouins dans une tâche d'analogie informatisée mettant en jeu, cette fois-ci, des relations fonctionnelles qu'ils seraient susceptibles de connaître. Pour cela, on pourrait par exemple tester leur capacité à appairer des relations de parenté entre les individus de leur groupe social à l'aide de photographies de leurs congénères (e.g., la relation « mère A / enfant A » avec la relation « mère B / enfant B »). S'ils échouent, on pourrait envisager de leur apprendre une forme de langage grâce au dispositif, en leur permettant de construire un réseau d'associations entre des symboles et des catégories d'objets. On pourrait alors tester l'influence de cet outil cognitif

dans leur capacité à faire des analogies fonctionnelles en les testant de nouveau dans une tâche mettant en jeu des relations fonctionnelles entre des symboles qu'ils ont appris. On pourrait également étudier l'influence de la richesse de l'environnement dans lequel a grandi un singe sur ces capacités d'analogie. A cette fin, on pourrait par exemple envisager d'enrichir l'environnement de ce groupe de singes de multiples objets qui auraient des textures, des formes et des couleurs variées pour tester l'impact de cette exposition sur leurs capacités d'analogies et plus généralement sur leurs capacités de généralisation.

Ces perspectives permettraient d'aller plus loin dans l'évaluation des continuités et discontinuités entre l'homme et l'animal, et plus particulièrement les primates non humains, concernant les processus cognitifs qui sous-tendent le raisonnement par analogie.

REFERENCES

- Adolph, K. E., Cole, W. G., Komati, M., Garciaguirre, J. S., Badaly, D., Lingeman, J. M., . . . Sotsky, R. B. (2012). How do you learn to walk? Thousands of steps and dozens of falls per day. *Psychological Science, 23*(11), 1387-1394.
- Allan, L. G. (1993). Human contingency judgments: Rule based or associative? *Psychological Bulletin, 114*(3), 435-448.
- Allen, S. W., & Brooks, L. R. (1991). Specializing the operation of an explicit rule. *Journal of Experimental Psychology: General, 120*(1), 3-19.
- Ashby, F. G., & Gott, R. E. (1988). Decision rules in the perception and categorization of multidimensional stimuli. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 14*(1), 33-53.
- Aterberry, M. E., & Bornstein, M. H. (2001). Three-month-old infants' categorization of animals and vehicles based on static and dynamic attributes. *Journal of Experimental Child Psychology, 80*(4), 333-346.
- Balaban, M. T., & Waxman, S. R. (1997). Do words facilitate object categorization in 9-month-old infants? *Journal of Experimental Child Psychology, 64*(1), 3-26.
- Barr, R. A., & Caplan, L. J. (1987). Category representations and their implications for category structure. *Memory & Cognition, 15*(5), 397-418.
- Barsalou, L. W. (1985). Ideals, central tendency, and frequency of instantiation as determinants of graded structure in categories. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 11*(4), 629-654.
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences, 22*(4), 577-609.
- Barsalou, L. W., & Sewell, D. R. (1984). Constructing representations of categories from different points of view *Emory Cognition Project Technical Report* (Vol. 2): Emory University.
- Berg, E. A. (1948). A simple objective technique for measuring flexibility in thinking. *Journal of General Psychology, 39*, 15-22.
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A Developmental Perspective on Executive Function. *Child Development, 81*(6), 1641-1660.
- Bhatt, R. S., & Wright, A. A. (1992). Concept learning by monkeys with video picture images and a touch screen. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior, 57*(2), 219-225.

- Blaye, A., Jacques, S., Bonthoux, F., & Cannard, C. (2003). *Switching between thematic and taxonomic relations in preschoolers: Is there more than cognitive flexibility?* Paper presented at the XIth European Conference on Developmental Psychology, Milan, Italie.
- Blaye, A., Paour, J. L., & Perret, P. (2002). *Categorical flexibility and levels of representation in children: A developmental perspective.* Paper presented at the British Psychological Society, Developmental Section Conference, Brighton, Grande-Bretagne.
- Bonté, E., Flemming, T., & Fagot, J. (2011). Executive control of perceptual features and abstract relations by baboons (*Papio papio*). *Behavioural Brain Research*, 222(1), 176-182.
- Bonté, E., Kemp, C., & Fagot, J. (sous presse). Age Effects on Transfer Index Performance and Executive Control in Baboons (*Papio papio*). *Frontiers in Psychology*.
- Bonthoux, F., Berger, C., & Blaye, A. (2004). *Naissance et développement des concepts chez l'enfant: Categoriser pour comprendre.* Paris: Dunod.
- Booth, A. E., & Waxman, S. (2002). Object names and object functions serve as cues to categories for infants. *Developmental Psychology*, 38(6), 948-957.
- Bovet, D., & Vauclair, J. (1998). Functional categorization of objects and of their pictures in baboons (*Papio anubis*). *Learning and Motivation*, 29(3), 309-322.
- Bovet, D., & Vauclair, J. (2001). Judgment of conceptual identity in monkeys. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(3), 470-475.
- Boysen, S. T., Berntson, G. G., Shreyer, T. A., & Quigley, K. S. (1993). Processing of ordinality and transitivity by chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology*, 107(2), 208-215.
- Brown, A. L., & Kane, M. J. (1988). Preschool children can learn to transfer: Learning to learn and learning from example. *Cognitive Psychology*, 20(4), 493-523.
- Brown, A. L., Kane, M. J., & Echols, C. H. (1986). Young children's mental models determine analogical transfer across problems with a common goal structure. *Cognitive Development*, 1(2), 103-121.
- Bruner, J. S., Goodnow, J. J., & Austin, G. A. (1956). *A study of thinking.* New York.
- Bullock, M., Gelman, R., & Baillargeon, R. (1982). The development of causal reasoning. In J. W. Friedman (Ed.), *The developmental psychology of time* (pp. 209-254). New York: Academic Press.

- Cayol, D., Bastien-Toniazzo, M., & Blaye, A. (1997). Résolution de problème par analogie par des enfants de grande section de maternelle. *L'Année Psychologique*, 97(3), 409-432.
- Chen, Z., Sanchez, R. P., & Campbell, T. (1997). From beyond to within their grasp: The rudiments of analogical problem solving in 10- and 13-month-olds. *Developmental Psychology*, 33(5), 790-801.
- Chi, M. T. H., Feltovich, P. J., & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5(2), 121-152.
- Christie, S., & Gentner, D. (2007). Relational similarity in identity relation: The role of language. In S. Vosniadou & D. Kayser (Eds.), *Proceedings of the Second European Cognitive Science Conference* (pp. 601–666). London: Taylor & Francis.
- Christie, S., & Gentner, D. (sous presse). Language Helps Children Succeed on a Classic Analogy Task. *Cognitive Science*.
- Chuderska, A., & Chuderski, A. (2009). *Executive Control in Analogical Reasoning: Beyond Interference Resolution*. Paper presented at the 31st Annual Conference of the Cognitive Science Society, Amsterdam.
- Ciochon, R. L., & Fleagle, J. G. (1987). *Primate evolution and human origins*. New York: Aldine de Gruyter.
- Clark, A., & Thornton, C. (1997). Trading spaces: Computation, representation, and the limits of uninformed learning. *Behavioral and Brain Sciences*, 20(01), 57-66.
- Cohen, B., & Murphy, G. L. (1984). Models of concepts. *Cognitive Science*, 8(1), 27-58.
- Cragg, L., & Nation, K. (2008). Go or no-go? Developmental improvements in the efficiency of response inhibition in mid-childhood. *Developmental Science*, 11(6), 819-827.
- Crisafi, M. A., & Brown, A. L. (1986). Analogical transfer of very young children: Combining two separately learned solutions to reach a goal. *Child Development*, 57(4), 953-968.
- D'Amato, M. R., & Colombo, M. (1985). Auditory matching-to-sample in monkeys (*Cebus apella*). *Animal Learning & Behavior*, 13(4), 375-382.
- D'Amato, M. R., & Colombo, M. (1988). Representation of serial order in monkeys (*Cebus apella*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 14(2), 131-139.

- D'Amato, M. R., Salmon, D. P., & Colombo, M. (1985). Extent and limits of the matching concept in monkeys (*Cebus apella*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *11*(1), 35-51.
- D'Amato, M. R., & Van Sant, P. (1988). The person concept in monkeys (*Cebus apella*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *14*(1), 43-55.
- Davidoff, J., Davies, I., & Roberson, D. (1999). Colour categories in a stone-age tribe. [10.1038/18335]. *Nature*, *398*(6724), 203-204.
- Davidoff, J., Goldstein, J., Tharp, I., Wakui, E., & Fagot, J. (2012). Perceptual and categorical judgements of colour similarity. *Journal of Cognitive Psychology*, *24*(7), 871-892.
- Delaporte, G.-F. (2012). *Metaphysique d'Aristote / Commentaire de Thomas d'Aquin*. . Condé-sur-Noireau, France: L'Harmattan.
- Delius, J., & Nowak, B. (1982). Visual symmetry recognition by pigeons. *Psychological Research*, *44*(3), 199-212.
- Dépy, D., Fagot, J., & Vauclair, J. (1997). Categorisation of three-dimensional stimuli by humans and baboons: Search for prototype effects. *Behavioural Processes*, *39*(3), 299-306.
- Dépy, D., Fagot, J., & Vauclair, J. (1999). Processing of above/below categorical spatial relations by baboons (*Papio papio*). *Behavioural Processes*, *48*(1-2), 1-9.
- Deruelle, C., & Fagot, J. (1998). Visual search for global/local stimulus features in humans and baboons. *Psychonomic Bulletin & Review*, *5*(3), 476-481.
- Diesendruck, G. (2003). Categories for names or names for categories? The interplay between domain-specific conceptual structure and language. *Language and Cognitive Processes*, *18*(5-6), 759-787.
- Elliott, S. W., & Anderson, J. R. (1995). Effect of memory decay on predictions from changing categories. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *21*(4), 815-836.
- Fagot, J., & Bonté, E. (2010). Automated testing of cognitive performance in monkeys: Use of a battery of computerized test systems by a troop of semi-free-ranging baboons (*Papio papio*). *Behavior Research Methods*, *42*(2), 507-516.
- Fagot, J., Bonté, E., & Hopkins, W. D. (2013). Age-dependant behavioral strategies in a visual search task in baboons (*Papio papio*) and their relation to inhibitory control. *Journal of Comparative Psychology*, *127*(2), 194-201.

- Fagot, J., & De Lillo, C. (2011). A comparative study of working memory: Immediate serial spatial recall in baboons (*Papio papio*) and humans. *Neuropsychologia*, 49(14), 3870-3880.
- Fagot, J., & Deruelle, C. (1997). Processing of global and local visual information and hemispheric specialization in humans (*Homo sapiens*) and baboons (*Papio papio*). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(2), 429-442.
- Fagot, J., & Maugard, A. (2013). Analogical reasoning in baboons (*Papio papio*): Flexible reencoding of the source relation depending on the target relation. *Learning & Behavior*, 41(3), 229-237.
- Fagot, J., & Paleressompouille, D. (2009). Automatic testing of cognitive performance in baboons maintained in social groups. *Behavior Research Methods*, 41(2), 396-404.
- 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.
- Fagot, J., & Thompson, R. K. R. (2011). Generalized relational matching by guinea baboons (*Papio papio*) in two-by-two-item analogy problems. *Psychological Science*, 22(10), 1304-1309.
- Fagot, J., Wasserman, E. A., & Young, M. (2004). Catégorisation d'objets visuels et concepts relationnels chez l'animal. In J. Vauclair & M. Kreutzer (Eds.), *L'éthologie cognitive* (pp. 272). Gap: Editions Ophrys.
- Fagot, J., Wasserman, E. A., & Young, M. E. (2001). Discriminating the relation between relations: The role of entropy in abstract conceptualization by baboons (*Papio papio*) and humans (*Homo sapiens*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 27(4), 316-328.
- Falkenhainer, B., Forbus, K. D., & Gentner, D. (1989). The structure-mapping engine: Algorithm and examples. *Artificial intelligence*, 41(1), 1-63.
- Flemming, T., Thompson, R. R., & Fagot, J. (2013). Baboons, like humans, solve analogy by categorical abstraction of relations. *Animal cognition*, 16(3), 519-524.
- Flemming, T. M., Beran, M. J., Thompson, R. K. R., 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*). *Journal of Comparative Psychology*, 122(2), 176-185.
- Flemming, T. M., Beran, M. J., & Washburn, D. A. (2007). Disconnect in concept learning by rhesus monkeys (*Macaca mulatta*): Judgment of relations and relations-between-

- relations. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 33(1), 55-63.
- Flemming, T. M., & Kennedy, E. H. (2011). Chimpanzee (*Pan troglodytes*) relational matching: Playing by their own (analogical) rules. *Journal of Comparative Psychology*, 125(2), 207-215.
- Forbus, K. D., Gentner, D., & Law, K. (1995). MAC/FAC: A model of similarity-based retrieval. *Cognitive Science*, 19(2), 141-205.
- Gardner, R. A., & Gardner, B. T. (1984). A vocabulary test for chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology*, 98(4), 381-404.
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: A review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134(1), 31-60.
- Gentner, D. (1983). Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7(2), 155-170.
- Gentner, D. (1988). Metaphor as structure mapping: The relational shift. *Child Development*, 59(1), 47-59.
- Gentner, D. (2002). Analogy in Scientific Discovery: The Case of Johannes Kepler. In L. Magnani & N. J. Nersessian (Eds.), *Model-Based Reasoning: Science, Technology, Values*. (pp. 21-39). New York: Plenum Publishing Co.
- Gentner, D., & Markman, A. B. (1997). Structure mapping in analogy and similarity. *American Psychologist*, 52(1), 45-56.
- Gentner, D., & Medina, J. (1997). Comparison and the development of cognition and language. *Cognitive Studies: Bulletin of the Japanese Cognitive Science Society*, 4, 112-149.
- Gentner, D., & Rattermann, M. J. (1991). Language and the career of similarity. In S. A. G. J. P. Byrnes (Ed.), *Perspectives on language and thought: Interrelations in development* (pp. 225-277). New York, NY, US: Cambridge University Press.
- Gentner, D., & Toupin, C. (1986). Systematicity and surface similarity in the development of analogy. *Cognitive Science*, 10(3), 277-300.
- Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1980). Analogical problem solving. *Cognitive Psychology*, 12(3), 306-355.
- Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*, 15(1), 1-38.

- Gillan, D. J. (1981). Reasoning in the chimpanzee: II. Transitive inference. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 7(2), 150-164.
- Gillan, D. J., Premack, D., & Woodruff, G. (1981). Reasoning in the chimpanzee.1. Analogical reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 7(1), 1-17.
- Goswami, U. (1989). Relational complexity and the development of analogical reasoning. *Cognitive Development*, 4(3), 251-268.
- Goswami, U. (1992). *Analogical reasoning in children*. Hillsdale, NJ, England: Erlbaum.
- Goswami, U., & Brown, A. L. (1989). Melting chocolate and melting snowmen: Analogical reasoning and causal relations. *Cognition*, 35(1), 69-95.
- Goswami, U., & Brown, A. L. (1990). Higher-order structure and relational reasoning: Contrasting analogical and thematic relations. *Cognition*, 36(3), 207-226.
- Graham, S. A., Kilbreath, C. S., & Welder, A. N. (2004). Thirteen-Month-Olds Rely on Shared Labels and Shape Similarity for Inductive Inferences. *Child Development*, 75(2), 409-427.
- Grosenick, L., Clement, T. S., & Femald, R. D. (2007). Fish can infer social rank by observation alone. *Nature*, 445(7126), 429-432.
- Halford, G. (1993). *Children's understanding: The development of mental models*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Halford, G. S., & Andrews, G. (2004). The development of deductive reasoning: How important is complexity? *Thinking & Reasoning*, 10(2), 123-145.
- Halford, G. S., Wilson, W. H., Guo, J., Gayler, R. W., Wiles, J., & Stewart, J. E. M. (1994). Connectionist implications for processing capacity limitations in analogies. In K. J. Holyoak & J. A. Barnden (Eds.), *Analogical connections: Advances in connectionist and neural computation theory* (Vol. 2, pp. 363-415). Westport, CT: Ablex Publishing.
- Halford, G. S., Wilson, W. H., & Phillips, S. (1998). Processing capacity defined by relational complexity: Implications for comparative, developmental, and cognitive psychology. *Behavioral and Brain Sciences*, 21(6), 803-865.
- Haun, D. B. M., & Call, J. (2009). Great apes' capacities to recognize relational similarity. *Cognition*, 110(2), 147-159.
- Herrnstein, R. J. (1990). Levels of stimulus control: A functional approach. *Cognition*, 37(1-2), 133-166.

- Hick, W. E. (1952). On the rate of gain of information. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology and Aging*, 4(1), 11-26.
- Hofstadter, D. R. (2001). Analogy as the core of cognition. In D. Gentner, K. J. Holyoak & B. N. Kokinov (Eds.), *The analogical mind: Perspectives from cognitive science*. (pp. 499-538). Cambridge, MA: MIT Press.
- Holyoak, K. J. (1985). The pragmatics of analogical transfer. *The psychology of learning and motivation*, 19, 59-87.
- Holyoak, K. J., Junn, E. N., & Billman, D. O. (1984). Development of analogical problem-solving skill. *Child Development*, 55(6), 2042-2055.
- Holyoak, K. J., & Thagard, P. (1989). Analogical mapping by constraint satisfaction. *Cognitive Science*, 13(3), 295-355.
- Holyoak, K. J., & Thagard, P. (1997). The analogical mind. *American Psychologist*, 52(1), 35-44.
- Homa, D. (1984). On the nature of categories. *Psychology of learning and motivation*, 18, 49-94.
- Hopkins, W. D., & Washburn, D. A. (2002). Matching visual stimuli on the basis of global and local features by chimpanzees (*Pan troglodytes*) and rhesus monkeys (*Macaca mulatta*). *Animal cognition*, 5(1), 27-31.
- Hribar, A., Haun, D., & Call, J. (2011). Great apes' strategies to map spatial relations. *Animal cognition*, 14(4), 511-523.
- Hull, C. L. (1920). Quantitative Aspects of Evolution of Concepts. *Psychological Monographs: General and Applied*, 28(1, n°123 entier).
- Humphrey, N. K. (1974). Species and individuals in the perceptual world of monkeys. *Perception*, 3(1), 105-114.
- James, W. (1890). *The principles of psychology* (Vol. 1). New York: Holt.
- Jitsumori, M. (1994). Discrimination of artificial polymorphous categories by rhesus monkeys (*Macaca mulatta*). *The Quarterly Journal of Experimental Psychology B: Comparative and Physiological Psychology*, 47B(4), 371-386.
- Jones, S. S., & Smith, L. B. (1998). How children name objects with shoes. *Cognitive Development*, 13(3), 323-334.

- Katz, J. S., Wright, A. A., & Bachevalier, J. (2002). Mechanisms of same-different abstract-concept learning by rhesus monkeys (*Macaca mulatta*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 28(4), 358-368.
- Katz, J. S., Wright, A. A., & Bodily, K. D. (2007). Issues in the comparative cognition of abstract-concept learning. *Comparative Cognition & Behavior Reviews*, 2, 79-92.
- Kemler Nelson, D. G. (1984). The effect of intention on what concepts are acquired. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 23(6), 734-759.
- Kennedy, E. H., & Fragaszy, D. M. (2008). Analogical reasoning in a capuchin monkey (*Cebus apella*). *Journal of Comparative Psychology*, 122(2), 167-175.
- Kimchi, R. (1988). Selective attention to global and local levels in the comparison of hierarchical patterns. *Perception & Psychophysics*, 43(2), 189-198.
- Kokinov, B., & French, R. M. (2002). Computational models of analogy-making. In L. Nadel (Ed.), *Encyclopedia of cognitive science* (pp. 113-118). London: Macmillan.
- Kotovskiy, L., & Gentner, D. (1996). Comparison and categorization in the development of relational similarity. *Child Development*, 67(6), 2797-2822.
- Kroger, J. K., Holyoak, K. J., & Hummel, J. E. (2004). Varieties of sameness: the impact of relational complexity on perceptual comparisons. *Cognitive Science*, 28(3), 335-358.
- Landau, B., Smith, L. B., & Jones, S. S. (1988). The importance of shape in early lexical learning. *Cognitive Development*, 3(3), 299-321.
- Lazareva, O. F., Smirnova, A. A., Bagozkaja, M. S., Zorina, Z. A., Rayevskiy, V. V., & Wasserman, E. A. (2004). Transitive responding in hooded crows requires linearly ordered stimuli. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 82(1), 1-19.
- Lazareva, O. F., & Wasserman, E. A. (2006). Effect of stimulus orderability and reinforcement history on transitive responding in pigeons. *Behavioural Processes*, 72(2), 161-172.
- Lea, S. (1984). In what sense do pigeons learn concepts? In H. L. Roitblat, T. G. Bever & H. S. Terrace (Eds.), *Animal cognition* (pp. 263-276). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Lea, S., & Ryan, C. (1983). Feature analysis of pigeons' acquisition of concept discrimination between letters. In M. L. Commons, R. J. Herrnstein & A. R. Wagner (Eds.), *Quantitative analyses of behavior* (Vol. 4, pp. 239-253). Cambridge, MA: Ballinger.
- Loewenstein, J., & Gentner, D. (2005). Relational language and the development of relational mapping. *Cognitive Psychology*, 50(4), 315-353.

- Lunzer, E. A. (1965). Problems of formal reasoning in test situations. In P. H. Mussen (Ed.), *European research in cognitive development. Monographs of the Society for Research in Child Development* (Vol. 30, pp. 19-46).
- Machery, E. (2004). Catégorisation et attribution de propriétés. *Les Cahiers Philosophiques de Strasbourg*, 17, 119-147.
- Mackintosh, N. J. (1975). A theory of attention: Variations in the associability of stimuli with reinforcement. *Psychological Review*, 82(4), 276-298.
- Madole, K. L., & Cohen, L. B. (1995). The role of object parts in infants' attention to form-function correlations. *Developmental Psychology*, 31(4), 637-648.
- Maintenant, C., & Blaye, A. (2008). Développement de la flexibilité catégorielle de 3 à 8 ans: Rôle des aspects conceptuels. *L'Année Psychologique*, 108(4), 659-698.
- Mandler, J. M. (2000). Perceptual and conceptual processes in infancy. *Journal of Cognition and Development*, 1(1), 3-36.
- Mandler, J. M., & Bauer, P. J. (1988). The cradle of categorization: Is the basic level basic? *Cognitive Development*, 3(3), 247-264.
- Mandler, J. M., & McDonough, L. (1996). Drinking and driving don't mix: inductive generalization in infancy. *Cognition*, 59(3), 307-335.
- Markman, A. B., & Gentner, D. (1993). Structural alignment during similarity comparisons. *Cognitive Psychology*, 25, 431-431.
- Markman, E. M. (1989). *Categorization and naming in children: Problems of induction*. Cambridge, MA, US: The MIT Press.
- Markman, E. M., & Wachtel, G. F. (1988). Children's use of mutual exclusivity to constrain the meaning of words. *Cognitive Psychology*, 20(2), 121-157.
- Martin-Malivel, J., & Fagot, J. (2001). Cross-modal integration and conceptual categorization in baboons. *Behavioural brain research*, 122(2), 209-213.
- Matsuzawa, T. (1990). Spontaneous sorting in human and chimpanzee. In S. T. P. K. R. Gibson (Ed.), *"Language" and intelligence in monkeys and apes: Comparative developmental perspectives* (pp. 451-468). New York, NY, US: Cambridge University Press.
- Maugard, A., Marzouki, Y., & Fagot, J. (2013). Contribution of working memory processes to relational matching-to-sample performance in baboons (*Papio papio*). *Journal of Comparative Psychology*, 127(4), 370-379.

- Maugard, A., Wasserman, E., Castro, L., & Fagot, J. (2013). Effects of training condition on the contribution of specific items to relational processing in baboons (*Papio papio*). *Animal cognition*, 1-14.
- Medin, D. L. (1989). Concepts and conceptual structure. *American Psychologist*, 44(12), 1469-1481.
- Medin, D. L., Lynch, E. B., Coley, J. D., & Atran, S. (1997). Categorization and reasoning among tree experts: Do all roads lead to Rome? *Cognitive Psychology*, 32(1), 49-96.
- Medin, D. L., & Ortony, A. (1989). Psychological essentialism. In S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning* (pp. 179-195). New York, US: Cambridge University Press.
- Medin, D. L., & Schaffer, M. M. (1978). Context theory of classification learning. *Psychological Review*, 85(3), 207-238.
- Medin, D. L., & Shoben, E. J. (1988). Context and structure in conceptual combination. *Cognitive Psychology*, 20(2), 158-190.
- Medin, D. L., & Smith, E. E. (1981). Strategies and classification learning. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 7(4), 241-253.
- Medin, D. L., Wattenmaker, W. D., & Hampson, S. E. (1987). Family resemblance, conceptual cohesiveness, and category construction. *Cognitive Psychology*, 19(2), 242-279.
- Mervis, C. B., & Rosch, E. (1981). Categorization of Natural Objects. *Annual Review of Psychology*, 32(1), 89-115.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81-97.
- Minier, L., Blaye, A., Maugard, A., Fagot, J., Glady, Y., & Thibaut, J. P. (sous presse). Rôle du contrôle exécutif dans le raisonnement par analogie chez l'enfant et le primate non humain. *Psychologie Française*.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex "Frontal Lobe" Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100.
- Moore, T. L., Killiany, R. J., Herndon, J. G., Rosene, D. L., & Moss, M. B. (2006). Executive system dysfunction occurs as early as middle-age in the rhesus monkey. *Neurobiology of Aging*, 27(10), 1484-1493.

- Morrison, R. G., Holyoak, K. J., & Truong, B. (2001). Working memory modularity in analogical reasoning. *Proceedings of the TwentyThird Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 663–668). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Morrison, R. G., Krawczyk, D. C., Holyoak, K. J., Hummel, J. E., Chow, T. W., Miller, B. L., & Knowlton, B. J. (2004). A Neurocomputational Model of Analogical Reasoning and its Breakdown in Frontotemporal Lobar Degeneration. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16*(2), 260-271.
- Mutafchieva, M., & Kokinov, B. (2007). *Can Language be Replaced? Physical Representations of Relations Instead of Language Labels in Relational Mapping: Do They Help Young Children*. Paper presented at the 29th Annual Conference of the Cognitive Science Society, Nashville, Tennessee.
- Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive Psychology*, *9*(3), 353-383.
- Navon, D. (2003). What does a compound letter tell the psychologist's mind? *Acta Psychologica*, *114*(3), 273-309.
- Nazzi, T., & Gopnik, A. (2001). Linguistic and cognitive abilities in infancy: when does language become a tool for categorization? *Cognition*, *80*(3), 11-20.
- Nelson, K. (1983). The derivation of concepts and categories from event representations. In E. K. Scholnick (Ed.), *New trends in conceptual representation: Challenges to Piaget's theory?* (pp. 129-149). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Nelson, K. (1988). Where do taxonomic categories come from? *Human Development*, *31*(1), 3-10.
- Nelson, K., & Gruendel, J. (1986). *Event knowledge: Structure and function in development*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Nissen, H. W., Blum, J. S., & Blum, R. A. (1948). Analysis of matching behavior in chimpanzee. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, *41*(1), 62-74.
- Nosofsky, R. M. (1984). Choice, similarity, and the context theory of classification. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *10*(1), 104-114.
- Nosofsky, R. M. (1986). Attention, similarity, and the identification–categorization relationship. *Journal of Experimental Psychology: General*, *115*(1), 39-57.
- Nosofsky, R. M. (1987). Attention and learning processes in the identification and categorization of integral stimuli. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *13*(1), 87-108.

- Nosofsky, R. M. (1988). Similarity, frequency, and category representations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *14*(1), 54-65.
- Nosofsky, R. M., Palmeri, T. J., & McKinley, S. C. (1994). Rule-plus-exception model of classification learning. *Psychological Review*, *101*(1), 53-79.
- Oden, D. L., Thompson, R. K., & Premack, D. (1990). Infant chimpanzees spontaneously perceive both concrete and abstract same/different relations. *Child Development*, *61*(3), 621-631.
- Oden, D. L., Thompson, R. K. R., & Premack, D. (1988). Spontaneous transfer of matching by infant chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Journal of experimental psychology. Animal behavior processes*, *14*(2), 140-145.
- Oden, D. L., Thompson, R. K. R., & 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, US: The MIT Press.
- Overman Jr, W. H., & Doty, R. W. (1980). Prolonged visual memory in macaques and man. *Neuroscience*, *5*(11), 1825-1831.
- Paquet, L., & Merikle, P. M. (1984). Global precedence: The effect of exposure duration. *Canadian Journal of Psychology*, *38*(1), 45-53.
- Paquet, L., & Merikle, P. M. (1988). Global precedence in attended and nonattended objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *14*(1), 89-100.
- Parron, C., & Fagot, J. (2007). Comparison of grouping abilities in humans (*Homo sapiens*) and baboons (*Papio papio*) with the Ebbinghaus illusion. *Journal of Comparative Psychology*, *121*(4), 405-411.
- Patzelt, A., Zinner, D., Fickenscher, G., Diedhiou, S., Camara, B., Stahl, D., & Fischer, J. (2011). Group Composition of Guinea Baboons (*Papio papio*) at a Water Place Suggests a Fluid Social Organization. *International journal of primatology*, *32*(3), 652-668.
- Penn, D. C., Holyoak, K. J., & Povinelli, D. J. (2008). Darwin's mistake: Explaining the discontinuity between human and nonhuman minds. *Behavioral and Brain Sciences*, *31*(2), 109-178.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1975). *The origin of the idea of chance in children. (Trans L. Leake et al)*. Oxford, England: W. W. Norton.

- Picq, J.-L. (2007). Aging affects executive functions and memory in mouse lemur primates. *Experimental Gerontology*, 42(3), 223-232.
- Premack, D. (1976). *Intelligence in ape and man*. Oxford, England: Erlbaum.
- Premack, D. (1983a). Animal Cognition. *Annual Review of Psychology*, 34(1), 351-362.
- Premack, D. (1983b). The codes of man and beasts. *Behavioral and Brain Sciences*, 6(1), 125-167.
- Quinn, P. C., & Eimas, P. D. (1996). Perceptual cues that permit categorical differentiation of animal species by infants. *Journal of Experimental Child Psychology*, 63(1), 189-211.
- Quinn, P. C., Eimas, P. D., & Rosenkrantz, S. L. (1993). Evidence for representations of perceptually similar natural categories by 3-month-old and 4-month-old infants. *Perception*, 22(4), 463-475.
- Quinn, P. C., & Johnson, M. H. (2000). Global-before-basic object categorization in connectionist networks and 2-month-old infants. *Infancy*, 1(1), 31-46.
- Rattermann, M. J., & Gentner, D. (1998). The effect of language on similarity: The use of relational labels improves young children's performance in a mapping task. In K. Holyoak, D. Gentner & B. Kokinov (Eds.), *Advances in analogy research: Integration of theory and data from the cognitive, computational, and neural sciences* (pp. 274-282). Sophia: New Bulgarian University.
- Reed, S. K., & Friedman, M. P. (1973). Perceptual vs conceptual categorization. *Memory & Cognition*, 1(2), 157-163.
- Rein, J. R., & Markman, A. B. (2010). Assessing the concreteness of relational representation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(6), 1452-1465.
- Rescorla, R. A., & Wagner, A. R. (1972). A theory of Pavlovian conditioning: Variations in the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement. In A. H. Black & W. F. Prokasy (Eds.), *Classical conditioning II: Current theory and research* (pp. 64-99). New York: Appleton-Century-Crofts.
- Richland, L. E., & Burchinal, M. R. (2013). Early executive function predicts reasoning development. *Psychological Science*, 24(1), 87-92.
- Richland, L. E., Morrison, R. G., & Holyoak, K. J. (2006). Children's development of analogical reasoning: Insights from scene analogy problems. *Journal of Experimental Child Psychology*, 94(3), 249-273.

- Ripoll, T. (1992). La recherche sur le raisonnement par analogie: objectifs, difficultés et solutions. *L'Année Psychologique*, 92(2), 263-288.
- Ripoll, T., & Coulon, D. (2001). Le raisonnement par analogie: Une analyse descriptive et critique des modèles du mapping. *L'Année Psychologique*, 101(2), 289-323.
- Roberts, W. A., & Mazmanian, D. S. (1988). Concept learning at different levels of abstraction by pigeons, monkeys, and people. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 14(3), 247-260.
- Rosch, E. (1973). Natural categories. *Cognitive Psychology*, 4(3), 328-350.
- Rosch, E. (1975). Cognitive representations of semantic categories. *Journal of Experimental Psychology: General*, 104(3), 192-233.
- Rosch, E. (1978). Principles of categorization. In E. Rosch & B. B. Loyd (Eds.), *Cognition and categorization* (pp. 27-48). Hillsdale NJ: Erlbaum.
- Rosch, E., & Mervis, C. B. (1975). Family resemblances: Studies in the internal structure of categories. *Cognitive Psychology*, 7(4), 573-605.
- Rosch, E., Mervis, C. B., Gray, W. D., Johnson, D. M., & Boyes-Braem, P. (1976). Basic objects in natural categories. *Cognitive Psychology*, 8(3), 382-439.
- Rosch, E., Simpson, C., & Miller, R. S. (1976). Structural bases of typicality effects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2(4), 491-502.
- Ross, B. H. (1987). This is like that: The use of earlier problems and the separation of similarity effects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13(4), 629-639.
- 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.
- Ross, B. H. (1996). Category representations and the effects of interacting with instances. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22(5), 1249-1265.
- Sailor, K. M., & Shoben, E. J. (1996). The role of categorical information in processing relational attributes. *Memory & Cognition*, 24(6), 756-765.
- Samuelson, L. K., & Smith, L. B. (2000). Children's attention to rigid and deformable shape in naming and non-naming tasks. *Child Development*, 71(6), 1555-1570.

- Savage-Rumbaugh, E. S., Rumbaugh, D. M., Smith, S. T., & Lawson, J. (1980). Reference: The linguistic essential. *Science*, 210(4472), 922-925.
- Schank, R. C. (1999). *Dynamic memory revisited*. New York, NY, US: Cambridge University Press.
- Schank, R. C., & Abelson, R. P. (1977). *Scripts, plans, goals and understanding: An inquiry into human knowledge structures*. Oxford, England: Erlbaum.
- Schrier, A. M., Angarella, R., & Povar, M. L. (1984). Studies of concept formation by stumptailed monkeys: Concepts humans, monkeys, and letter A. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 10(4), 564-584.
- Schrier, A. M., & Brady, P. M. (1987). Categorization of natural stimuli by monkeys (*Macaca mulatta*): Effects of stimulus set size and modification of exemplars. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 13(2), 136-143.
- Shanks, D. R., & Darby, R. J. (1998). Feature- and rule-based generalization in human associative learning. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 24(4), 405-415.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. Urbana, IL: University of Illinois Press.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological Review*, 84(2), 127-190.
- Sloman, S. A. (1996). The empirical case for two systems of reasoning. *Psychological Bulletin*, 119(1), 3-22.
- Smith, J. D., & Shapiro, J. H. (1989). The occurrence of holistic categorization. *Journal of Memory and Language*, 28(4), 386-399.
- Smith, L. B. (1984). Young children's understanding of attributes and dimensions: A comparison of conceptual and linguistic measures. *Child Development*, 55(2), 363-380.
- Smith, L. B., Jones, S. S., & Landau, B. (1992). Count nouns, adjectives, and perceptual properties in children's novel word interpretations. *Developmental Psychology*, 28(2), 273-286.
- Spinozzi, G., Lubrano, G., & Truppa, V. (2004). Categorization of Above and Below Spatial Relations by Tufted Capuchin Monkeys (*Cebus apella*). *Journal of Comparative Psychology*, 118(4), 403-412.

- Sternberg, R. J. (1977). *Intelligence, information processing, and analogical reasoning: The componential analysis of human abilities*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Tench. (2003). Non-native speakers misperceptions of English vowels and consonants: Evidence from Korean adults in UK. *International Review of Applied Linguistics in Language Teaching*, 41(2), 145.
- Thagard, P., Holyoak, K. J., Nelson, G., & Gochfeld, D. (1990). Analog retrieval by constraint satisfaction. *Artificial intelligence*, 46(3), 259-310.
- Thibaut, J.-P., French, R., & Vezneva, M. (2010a). Cognitive load and semantic analogies: Searching semantic space. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17(4), 569-574.
- Thibaut, J.-P., French, R., & Vezneva, M. (2010b). The development of analogy making in children: Cognitive load and executive functions. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106(1), 1-19.
- Thibaut, J. P., French, R. M., Mussault, S., Gérard, Y., & Glady, Y. (2011). *In the Eyes of the Beholder: What Eye-Tracking Reveals About Analogy-Making Strategies in Children and Adults*. Paper presented at the Thirty-third Annual Meeting of the Cognitive Science Society, Austin, Tx.
- Thomas, R. K., & Crosby, T. N. (1977). Absolute versus relative class conceptual behavior in squirrel monkeys (*Saimiri sciureus*). *Animal Learning & Behavior*, 5(3), 265-271.
- Thomas, R. K., & Ingram, D. K. (1979). Conceptual volume judgments by squirrel monkeys. *The American Journal of Psychology*, 92(1), 33-43.
- Thompson, R. K. R. (1995). Natural and relational concepts in animals. In H. L. Roitblat & J. A. Meyer (Eds.), *Comparative approaches to cognitive science* (pp. 175-224). Cambridge, MA, US: The MIT Press.
- Thompson, R. K. R., Oden, D., Hyle, M., Hoy, E., Rapuano, M., & Safro, J. (2000). *Group habituation/dishabituation by capuchin monkeys to objects and relations*. Paper presented at the 41st Annual Meeting of the Psychonomic Society, New Orleans, LA.
- Thompson, R. K. R., & Oden, D. L. (1995). A profound disparity revisited: Perception and judgment of abstract identity relations by chimpanzees, human infants, and monkeys. *Behavioural Processes*, 35(1-3), 149-161.
- Thompson, R. K. R., & 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. R., 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.

- Truppa, V., Mortari, E. P., Garofoli, D., Privitera, S., & Visalberghi, E. (2011). Same/Different concept learning by capuchin monkeys in matching-to-sample tasks. *Plos One*, 6(8).
- Tyrrell, D. J., Stauffer, L. B., & Snowman, L. G. (1991). Perception of abstract identity/difference relationships by infants. *Infant Behavior & Development*, 14(1), 125-129.
- Uttal, D., Schreiber, J. C., & DeLoache, J. S. (1995). Waiting to use a symbol: The effects of delay on children's use of models. *Child Development*, 66(6), 1875-1889.
- van Dantzig, S., Pecher, D., Zeelenberg, R., & Barsalou, L. (2008). Perceptual Processing Affects Conceptual Processing. *Cognitive Science*, 32(3), 579-590.
- Vauclair, J., & Fagot, J. (1996). Categorization of alphanumeric characters by Guinea baboons: Within- and between-class stimulus discrimination. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition*, 15(5), 449-462.
- Viskontas, I. V., Morrison, R. G., Holyoak, K. J., Hummel, J. E., & Knowlton, B. J. (2004). Relational Integration, Inhibition, and Analogical Reasoning in Older Adults. *Psychology and Aging*, 19(4), 581-591.
- Vonk, J. (2003). Gorilla (*Gorilla gorilla gorilla*) and orangutan (*Pongo abelii*) understanding of first-and second-order relations. *Animal cognition*, 6(2), 77-86.
- Waltz, J. A., Lau, A., Grewal, S. K., & Holyoak, K. J. (2000). The role of working memory in analogical mapping. *Memory & Cognition*, 28(7), 1205-1212.
- Wasserman, E. A., Fagot, J., & Young, M. E. (2001). Same-different conceptualization by baboons (*Papio papio*): The role of entropy. *Journal of Comparative Psychology*, 115(1), 42-52.
- Wasserman, E. A., Kiedinger, R. E., & Bhatt, R. S. (1988). Conceptual behavior in pigeons: Categories, subcategories, and pseudocategories. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 14(3), 235-246.
- Wasserman, E. A., Young, M. E., & Fagot, J. (2001). Effects of number of items on the baboon's discrimination of same from different visual displays. *Animal cognition*, 4(3-4), 163-170.
- Waxman, S. R., & Braun, I. (2005). Consistent (but not variable) names as invitations to form object categories: New evidence from 12-month-old infants. *Cognition*, 95(3), B59-B68.
- Weed, M. R., Bryant, R., & Perry, S. (2008). Cognitive development in macaques: Attentional set-shifting in juvenile and adult rhesus monkeys. *Neuroscience*, 157(1), 22-28.

- Werker, J. F., & Lalonde, C. E. (1988). Cross-language speech perception: Initial capabilities and developmental change. *Developmental Psychology*, 24(5), 672-683.
- Westermann, G., & Mareschal, D. (2004). From parts to wholes: Mechanisms of development in infant visual object processing. *Infancy*, 5(2), 131-151.
- Wright, A. A., Rivera, J. J., Katz, J. S., & Bachevalier, J. (2003). Abstract-concept learning and list-memory processing by capuchin and rhesus monkeys. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 29(3), 184-198.
- Wright, A. A., Santiago, H. C., & Sands, S. F. (1984). Monkey memory: *Same/different* concept learning, serial probe acquisition, and probe delay effects. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 10(4), 513-529.
- Yoshikubo, S. i. (1985). Species discrimination and concept formation by rhesus monkeys (*Macaca mulatta*). *Primates*, 26(3), 285-299.
- Young, M. E., & Wasserman, E. A. (1997). Entropy detection by pigeons: Response to mixed visual displays after same-different discrimination training. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 23(2), 157-170.
- Zayan, R., & Vauclair, J. (1998). Categories as paradigms for comparative cognition. *Behavioural Processes*, 42(2-3), 87-99.
- Zentall, T. R., Wasserman, E. A., Lazareva, O. F., Thompson, R. K. R., & Rattermann, M. J. (2008). Concept learning in animals. *Comparative Cognition & Behavior Reviews*, 3, 13-45.
- Zuberbühler, K., Cheney, D. L., & Seyfarth, R. M. (1999). Conceptual semantics in a nonhuman primate. *Journal of Comparative Psychology*, 113(1), 33-42.

ANNEXES

Annexe 1

« Rôle du contrôle exécutif dans le raisonnement par analogie chez l'enfant et le primate non humain »

Minier et al., sous presse

Cet article décrit le rôle du contrôle exécutif dans le développement des analogies chez l'enfant. Ce travail s'inscrit également dans une perspective comparative en abordant l'implication potentielle des fonctions exécutives dans une tâche de RMTS chez le primate non humain.



Disponible en ligne sur www.sciencedirect.com

SciVerse ScienceDirect

et également disponible sur www.em-consulte.com



Article original

Rôle du contrôle exécutif dans le raisonnement par analogie chez l'enfant et le primate non humain

Role of executive control in children's and non human primates' analogical reasoning

L. Minier^{a,*}, A. Blaye^a, A. Maugard^{a,b}, J. Fagot^{a,b},
Y. Glady^c, J.-P. Thibaut^c

^a CNRS UMR 7290, pôle 3C, laboratoire de psychologie cognitive, université Aix-Marseille, bâtiment 9, case D, 3, place Victor-Hugo, 13331 Marseille cedex 3, France

^b Brain and language research institute, bâtiment B, case D, 3, place Victor-Hugo, 13331 Marseille cedex, France

^c UMR 5022, pôle AAFE, laboratoire d'étude de l'apprentissage et du développement, université de Bourgogne, esplanade Erasme, BP 26513, 21065 Dijon cedex, France

INFORMATIONS

Historique de l'article :

Reçu le 26 mai 2012

Accepté le 25 août 2013

Disponible sur Internet le xxx

Mots clés :

Représentations

Inhibition

Mise à jour en mémoire de travail

Flexibilité

Singe

RÉSUMÉ

Le raisonnement par analogie (RA) est une capacité cruciale de la pensée humaine. Plusieurs théories ont été proposées pour comprendre son émergence chez l'enfant, évoquant successivement le développement des compétences logiques puis la connaissance nécessaire des relations mises en jeu. Dans cette revue, nous proposons un point de vue alternatif suggérant que les capacités de RA dépendent de l'efficacité du contrôle exécutif. Dans une perspective comparative, nous présentons un ensemble de données récentes qui étayent le rôle de l'inhibition, de la flexibilité et de la mise à jour en mémoire de travail dans le RA chez l'enfant et chez le primate non humain. Les travaux chez l'enfant suggèrent que les connaissances, à travers la qualité des représentations, et les capacités de contrôle doivent être considérées en interaction pour rendre compte des processus en jeu dans l'analogie.

© 2013 Société française de psychologie. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : minier.laure@gmail.com (L. Minier).

A B S T R A C T

Keywords:

Representations
Inhibition
Working memory updating
Flexibility
Monkey

Analogical reasoning (AR) is a cornerstone of human cognition. Two main theories have historically been proposed to account for the ontogeny of AR. They propose that analogical skills are constrained by children's logical skills or limited knowledge of the relations to be considered. We adopt an alternative perspective in this review paper suggesting that AR abilities depend on the efficiency of executive control. We present convergent data collected in children and monkeys highlighting the role of three main executive functions: inhibitory control, cognitive flexibility and working memory updating. The analysis of children's reasoning suggests that the contribution of relational knowledge and executive control to analogical reasoning cannot be considered independently.

© 2013 Société française de psychologie. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Raisonnement par analogie consiste à transférer une structure relationnelle extraite d'une situation connue, appelée source, vers une situation nouvelle, appelée cible (Gentner, 1983 ; Gentner, Holyoak, & Kokinov, 2001). Nous faisons fréquemment appel à ce type de raisonnement lorsque nous éprouvons l'intuition soudaine et spontanée que la situation rencontrée ressemble à une expérience antérieure. Si cette mise en parallèle s'initie souvent, et plus facilement, par des ressemblances de surface entre les deux situations, le raisonnement par analogie (RA) permet d'aller au-delà des divergences perceptives et d'extraire une structure relationnelle commune à ces deux situations (Dunbar & Blanchett, 2001). Aussi, en permettant le transfert de connaissances dans un contexte nouveau, le RA s'avère critique pour de nombreux apprentissages, la résolution de problèmes et l'interprétation de situations.

Plusieurs tâches ont été proposées afin d'étudier le développement du RA. Celles-ci diffèrent des analogies quotidiennes dans la mesure où les participants ne sont pas libres d'évoquer une situation source mais celle-ci leur est imposée. Néanmoins, ces tâches constituent un outil pertinent pour étudier précisément les paramètres impliqués dans le raisonnement (nature des relations, complexité, etc.). On retrouve ainsi les analogies proportionnelles évaluées par des tâches de type A:B::C:D dans lesquelles il s'agit de trouver le terme D qui s'associe au terme C selon la même relation que celle existant entre les termes A et B (ex. Goswami & Brown, 1989, 1990 ; Thibaut, French, & Vezneva, 2010a, 2010b) ou encore les tâches d'appariement relationnel requérant la sélection de la paire ou triade d'objets entretenant les mêmes relations qu'une paire/triade source. Il existe également des tâches de résolution de problèmes dans lesquelles les participants doivent utiliser la solution d'un problème connu dans une situation nouvelle (ex. Cayol, Bastien-Toniazzo, & Blaye, 1997 ; Chen, Sanchez, & Campbell, 1997 ; Crisafi & Brown, 1986) ou encore les tâches d'analogie entre scènes visuelles qui consistent à trouver des correspondances entre les éléments de scènes imagées (ex. Markman & Gentner, 1993 ; Richland, Morrison, & Holyoak, 2006).

Historiquement, trois positions théoriques principales peuvent être distinguées concernant le développement du raisonnement par analogie. La première est celle de Piaget (ex. Inhelder & Piaget, 1955) qui situait l'émergence du RA au stade des opérations formelles (11–12 ans) et l'attribuait au développement général des compétences logiques. En effet, le RA conduisant à « mettre en relation des relations » semble fondé sur les opérations de deuxième ordre caractéristiques de ce stade. À cette théorie, se sont opposées celles de Goswami (Goswami & Brown, 1989, 1990) et de Gentner (1988). Ces deux auteurs s'accordent pour reconnaître le rôle critique de la connaissance des relations dans le succès du RA et considèrent que les jeunes enfants sont capables d'un tel raisonnement bien avant le niveau opératoire formel, dès lors que les relations impliquées leur sont familières. Ces deux thèses s'opposent en revanche sur leur vision du développement du RA. Selon la théorie de la « primauté relationnelle » (*relational primacy*) de Goswami, l'insuffisance des connaissances relationnelles serait le seul frein à la mise en œuvre d'un RA chez le jeune enfant. Pour Gentner, le développement donne lieu à une « bascule relationnelle » (*relational shift*) avant laquelle les jeunes enfants seraient seulement capables de raisonner sur des similitudes locales entre attributs d'objets. De ce fait, ils ne parviendraient pas

à l'alignement structural permettant la mise en correspondance des structures relationnelles source et cible. Cette bascule relationnelle ne se produirait pas nécessairement aux mêmes âges selon les domaines de relations impliqués, puisqu'elle résulterait du développement des connaissances dans ces domaines, développement dépendant des expériences de l'enfant.

Si les études de Goswami et Brown (Goswami & Brown, 1989, 1990) ont fortement marqué l'étude du développement du RA, il reste que leur interprétation est sujette à caution. Ces travaux suggéraient par exemple que les enfants de 4 ans sont capables de sélectionner un item analogique même quand celui-ci est mis en concurrence avec d'autres items associés au terme C (cf. Fig. 1). Pourtant, lorsque les expérimentateurs demandaient de choisir un item associé au terme C sans présentation préalable de la paire A:B, l'item analogue était également majoritairement choisi (bien que significatif, l'écart entre tâche d'analogie et tâche contrôle sans présentation de la paire source était de moins de 10%, cf. Thibaut, French, & Vezneva, 2010b). Ainsi, cette configuration particulière d'évaluation n'atteste pas totalement de la compétence des enfants à effectuer un véritable RA, c'est-à-dire à tenir compte de la relation source. En effet, il semble plus probable que les autres items proposés présentaient une force d'association moindre avec C que celle de la réponse analogique, permettant ainsi la sélection de la réponse attendue.

Dans la suite de cet article, nous présentons des travaux conduits chez l'enfant montrant qu'au-delà du développement des connaissances relationnelles, l'efficacité croissante du contrôle exécutif peut expliquer le développement du RA. Ce point de vue est étayé à la fois par des données corrélationnelles et par des résultats montrant que les performances analogiques des enfants d'un âge donné diffèrent en fonction du coût exécutif imposé par la tâche. Toutefois, connaissances et contrôle ne sont pas à considérer comme deux facteurs indépendants, ces données montrent qu'il existe un lien étroit entre la qualité des représentations des relations dont disposent les enfants et l'efficacité du contrôle exercé lors du RA. Enfin, nous accompagnons cet exposé développemental d'études effectuées sur un groupe de primates non humains. L'approche comparative s'inscrit dans la perspective d'une continuité phylogénétique entre les systèmes cognitifs des primates non humains et de l'humain (Parker & McKinney, 1999; Maestripieri, 2005). Elle suppose que certains processus qui sous-tendent le RA puissent être communs à l'ensemble des primates. À cet égard, les primates non humains constituent des modèles d'étude intéressants car, bien que dépourvus de langage et donc d'outils d'organisation sémantique des connaissances, ils font preuve d'un contrôle exécutif efficace pour traiter certains stimulus et s'avèrent capables de résoudre des tâches d'analogies perceptives. Nous présentons des données récentes obtenues chez les babouins et établissant des corrélations entre leur niveau de contrôle exécutif et leurs performances en analogie. Dans cette perspective comparative, nous porterons une attention particulière aux tâches d'analogie à 4 termes (A:B::C:D et appariement relationnel), celles-ci étant accessibles aux enfants comme aux primates non humains.

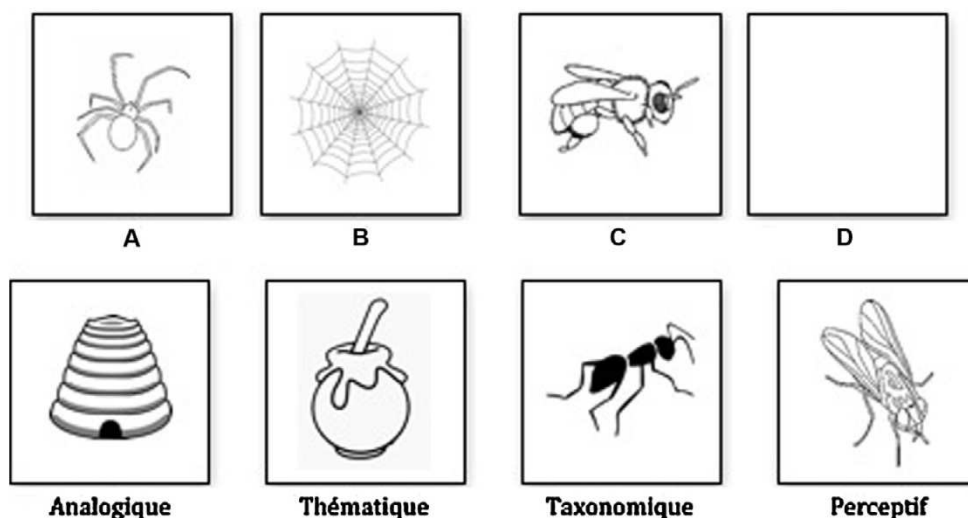


Fig. 1. Illustration d'un essai utilisé par Goswami et Brown (1990).

1. Le coût exécutif du RA

On considère que le contrôle exécutif permet le guidage des conduites vers les buts visés dès lors que l'on sort des activités routinières, largement automatisées. Ce contrôle permet notamment de répondre de façon adaptée aux changements de situation (Chevalier, 2010 ; Chevalier & Blaye, 2006 ; Cragg & Chevalier, 2012 ; Harlow, 1868 ; Norman & Shallice, 1986 ; Miyake, Friedman, Emerson, Witz, & Howerter, 2000). On considère avec Baddeley (Baddeley & Hitch, 1974) que ce contrôle s'exerce en mémoire de travail. Les liens entre mémoire de travail et RA ont déjà fait l'objet d'investigation. Halford, Wilson, et Philips (1998, 2010) envisagent que les progrès du RA durant l'enfance pourraient être, au moins partiellement, attribués au développement des capacités de la mémoire de travail. Ce développement se traduit notamment par la possibilité de traiter des relations impliquant de plus en plus d'éléments en parallèle. Pour tester cette hypothèse, Richland et al. (2006) ont manipulé la complexité des relations en jeu dans une tâche d'analogie entre scènes visuelles. Les participants âgés de 3–4, 6–8 et 13–14 ans devaient trouver dans une scène cible (ex. un garçon qui court après une fille) l'élément jouant le même rôle que celui pointé dans une scène source (ex. un chat qui court après une souris dans un jardin). Les scènes visuelles présentées comprenaient 2 ou 3 éléments par relation (un chat poursuivant une souris vs un chien poursuivant un chat qui poursuit une souris). Les résultats montrent un effet délétère de la complexité des relations qui tend à diminuer avec l'âge des participants. Un tel effet a également été pointé chez des populations dont les capacités de mémoire de travail sont diminuées, notamment des personnes âgées (Viskontas, Morrison, Holyoak, Hummel, & Knowlton, 2004) et des patients cérébrolésés (Morrison et al., 2004). Néanmoins, cette interaction entre l'âge et la complexité des relations en termes de capacités de mémoire de travail nécessiterait d'être précisée en considérant le rôle des fonctions de contrôle spécifiques.

Parmi les différentes fonctions de contrôle partiellement indépendantes, on distingue principalement (Miyake et al., 2000) :

- l'« inhibition » qui permet d'ignorer une information ou de bloquer une réponse prépondérante mais non pertinente pour privilégier l'issue pertinente ;
- la « flexibilité » qui réfère au fait de pouvoir alterner de focus attentionnel, de perspective ou de réponse ;
- et la « mise à jour en mémoire de travail » qui permet de rafraîchir et/ou réviser les représentations maintenues en mémoire de travail.

L'analyse des processus en jeu dans une tâche telle que l'analogie à quatre termes (i.e. A:B::C:D ou appariement relationnel) suggère que ces différentes fonctions pourraient être directement impliquées. Le participant doit encoder les termes de l'analogie pour construire une représentation de la paire source (AB) en mémoire de travail et la maintenir durant le processus d'appariement afin de rechercher, en mémoire ou dans un ensemble de solutions proposées, la cible correspondante. Durant cette recherche, le participant doit ignorer les relations non pertinentes présentes dans l'ensemble de solutions (distracteurs) ou qui lui viendraient spontanément à l'esprit, afin de retenir le couple CD exprimant la même relation que les termes A et B.

Il semble donc que des processus d'inhibition et de résistance à l'interférence d'informations distractrices doivent ici intervenir. De plus, lors de la recherche de la solution parmi un ensemble d'options, le participant pourrait ne pas trouver d'item correspondant à la représentation qu'il s'est construit de la relation source. Dans ce cas, il doit réviser sa représentation et effectuer une nouvelle recherche. Ainsi, des capacités de flexibilité cognitive sont susceptibles d'être requises. Enfin, pour produire un appariement relationnel correct, sans céder aux sources d'interférence, il est nécessaire de maintenir le but même de la tâche d'analogie en mémoire de travail. Celui-ci doit conduire au maintien de la représentation de la relation source à un niveau d'activation suffisant pour s'en servir de critère de sélection de la réponse.

Cette analyse permet de reconsidérer l'interprétation du progrès développemental en RA proposée par Gentner (1988). La centration des jeunes enfants sur des appariements locaux entre attributs d'objets plutôt que sur des appariements de structures relationnelles (pour des synthèses, voir

Gentner, 2003 ; Gentner & Rattermann, 1991) pourrait traduire un contrôle inhibiteur encore peu efficace. En effet, percevoir la similarité des relations entre les situations source et cible implique d'ignorer tout ce qui a trait aux objets eux-mêmes pour ne conserver que ce qui les unit (les relations). Or, les appariements entre attributs reposent souvent sur des similitudes perceptives plus saillantes pour les jeunes enfants que des appariements relationnels nécessitant un traitement plus approfondi. Ainsi, la bascule relationnelle identifiée par Gentner comme permettant l'entrée dans le RA pourrait être le marqueur d'un développement des capacités d'inhibition.

Le rôle de l'inhibition a été directement testé dans l'étude de Richland et al. (2006). Un élément de la scène visuelle cible jouait le rôle de distracteur (un chat allongé près des enfants qui jouent) parce qu'il était perceptivement similaire à l'un des éléments de la scène source (le chat qui court). Lorsqu'ils réalisaient la tâche sans distracteur perceptif, les performances des enfants de tous âges étaient supérieures au hasard, démontrant ainsi leur capacité à traiter de manière correcte l'identité relationnelle des stimuli. En présence d'un distracteur, les performances des plus jeunes (3–4 et 6–7 ans) déclinaient fortement alors que les plus âgés (13–14 ans) semblaient insensibles à ce distracteur. Une telle interaction illustre comment des progrès en inhibition, par ailleurs bien établis sur cette tranche d'âge (Best & Miller, 2010 ; Cragg & Nation, 2008 ; Garon, Bryson, & Smith, 2008), peuvent rendre compte de l'amélioration des performances en analogie avec l'âge. Thibaut et ses collaborateurs ont récemment précisé le rôle du coût inhibiteur lié à la présence d'options de réponses distractrices dans une tâche de type A:B::C:D (impliquant des relations perceptives, Thibaut et al., 2010a ou sémantiques, Thibaut et al., 2010b ; Thibaut, French, Vezneva, Gérard, & Glady, 2011). Ces études ont établi que les performances en analogie diminuaient avec l'augmentation du nombre de distracteurs, autrement dit avec la quantité d'informations non pertinentes à ignorer. Par ailleurs, les performances des enfants étaient plus faibles lorsque les distracteurs étaient sémantiquement reliés au terme C plutôt que perceptivement similaires à celui-ci. On peut envisager que la communauté de nature entre relations à privilégier et relations à inhiber produise cet effet délétère sur la performance parce qu'elle accentue l'interférence et donc le coût de l'inhibition à mettre en œuvre. Enfin, leur hypothèse sur le rôle de l'inhibition est corroborée par une corrélation positive entre performances à un test d'inhibition (Stroop Jour-Nuit, Gerstadt, Hong, & Diamond, 1994) et performances en analogie chez les enfants de 4 et 5 ans.

La représentation et le maintien du but de la tâche d'analogie pourraient être également des éléments critiques du RA. Des travaux récents sur le développement des fonctions exécutives (Blaye & Chevalier, 2011 ; Marcovitch, Boseovski, & Knapp, 2007 ; Towse, Lewis, & Knowles, 2007) suggèrent que la représentation du but de la tâche puis sa gestion en cours de résolution constituent des aspects déterminants de l'efficacité du contrôle exécutif. Or, quelle représentation du but se construisent les enfants dans une tâche de RA ? Comprennent-ils l'importance d'une extraction de la relation source afin de s'en servir de critère de sélection de la réponse ? Si cette compréhension existe – le but étant souvent explicitement formulé dans les consignes – dans quelle mesure parviennent-ils à contrôler la mise en œuvre de leur raisonnement conformément à ce but ? Une étude récente de Thibaut et French (soumis)¹, voir aussi Thibaut, French, Mussault, Gérard, et Glady (2011) apporte des éléments de réponse à ces questions. Les auteurs ont enregistré les mouvements oculaires des enfants, adolescents et adultes testés sur une tâche de type A:B::C:D. La stratégie de résolution des adolescents et des adultes consiste à extraire la relation source (ils passent du temps à observer A:B) avant de chercher à l'instancier en situation cible (cf. Fig. 2). Au début de la tâche, les enfants (5 et 8 ans) passent moins de temps à analyser la paire A:B et plus de temps à fixer le terme C et l'ensemble des solutions proposées (la réponse analogique, un distracteur sémantiquement lié à C et deux images non reliées à C). Par ailleurs, les essais réussis par les enfants sont ceux qui, en moyenne, ont donné lieu à une analyse plus longue de la paire A:B au début de l'essai et à un plus grand nombre d'allers-retours entre le distracteur sémantiquement lié à C et la solution analogique, suggérant une comparaison plus approfondie des deux termes. Il semble donc qu'il y ait un développement de la compréhension du but de la tâche et/ou de la gestion de ce but sous la forme d'une séquentialisation pertinente des prises d'informations sur les différents éléments du problème. Le rôle de la gestion des buts dans le RA

¹ Thibaut, J.P., & French, B. (soumis) The temporal dynamics of analogy-making in adults and children.

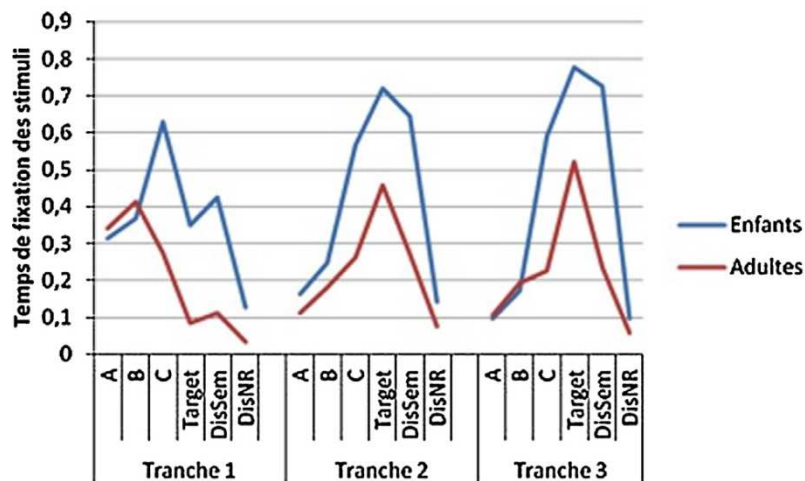


Fig. 2. Temps de fixation des différents types de stimuli en fonction de l'âge, de la partie de l'essai. Un essai est décomposé en 3 tranches correspondant au début, au milieu et à la fin de l'essai. Les stimuli sont A, B, C, Target (réponse analogique), DisSem (le distracteur sémantique lié à C présent dans l'ensemble des solutions proposées) et DisNR (deux distracteurs non reliés à C présents dans l'ensemble des solutions). Le temps représenté correspond au temps moyen passé à analyser ces deux stimuli). On voit qu'au début de l'essai (tranche 1), les adultes analysent A et B et négligent tous les autres stimuli. Dans les tranches suivantes, ils convergent rapidement sur la solution Target. Les enfants, par contre, au début de l'essai (tranche 1), regardent plus C que les autres stimuli mais passent aussi du temps sur A et B, la réponse Target et le distracteur sémantique. Leur attention est donc moins ciblée. D'autres analyses confirment le rôle attracteur de C pendant une partie importante du temps de résolution.

est d'ailleurs étayé par l'étude de Chuderska et Chuderski (2009) corrélant l'efficacité de différentes fonctions exécutives avec les performances en analogie chez des adultes. La capacité de gestion des buts était évaluée par la tâche de Duncan, Emslie, Williams, Johnson, & Freer (1996) dans laquelle les participants doivent placer un objet à gauche ou à droite de l'écran en fonction d'un symbole qui indique que le côté cible est identique ou bien opposé au côté cible de l'essai précédent. Pour catégoriser correctement un objet lors d'un essai, les participants doivent donc maintenir en mémoire le côté cible (but) de l'essai précédent et actualiser ce but en fonction du symbole donné sur l'essai en cours. Les performances des participants sur cette tâche ainsi que celles obtenues sur une tâche d'inhibition s'avèrent les meilleurs prédicteurs des performances analogiques. Aussi, selon les auteurs, deux aspects exécutifs interviendraient dans la représentation et la manipulation des relations dans une tâche d'analogie : un aspect exécutif proactif de gestion et d'application du but du RA et un aspect réactif d'inhibition des associations non pertinentes pour le but.

2. Interaction entre représentation de la relation et contrôle exécutif chez l'enfant

Les travaux évoqués ci-dessus permettent de distinguer deux approches : l'une mettant l'accent sur les représentations, liées à la connaissance des relations en jeu, l'autre portant sur le rôle de différentes composantes du contrôle exécutif. Les études les plus récentes tendent à montrer que c'est l'interaction entre ces deux aspects qui sous-tend le RA, tout particulièrement chez les enfants où le contrôle n'est pas pleinement efficace et où les connaissances ne sont que partiellement construites. Cette interaction se manifeste doublement : d'une part à travers le rôle des aspects exécutifs dans l'élaboration de la représentation de la source, et d'autre part, à travers la modulation du contrôle requis pour la résolution selon la qualité de la représentation de la source et de la cible. En effet, « le contrôle ne s'exerce pas à vide : on ne contrôle bien que ce que l'on conceptualise clairement » (Maintenant & Blaye, 2008, p. 689) : le transfert analogique sera d'autant mieux effectué que les structures relationnelles sont clairement représentées.

2.1. L'exercice du contrôle exécutif dans l'élaboration de la représentation de la relation source

Si l'importance de la connaissance des relations a été soulignée dans les travaux antérieurs, celles-ci ne sont toutefois pas suffisantes lorsque le traitement de la source n'amorce pas d'emblée la

représentation d'une relation particulière. Dans ce cas, une élaboration contrôlée de la représentation devient nécessaire. Sur un plan exécutif, la difficulté à construire cette représentation dépend en particulier du nombre d'éléments non pertinents devant être ignorés. Hoyer, Rebok, et Sved (1979) ont établi que ce nombre accroît le coût de résistance à l'interférence de ces informations. Viskontas et al. (2004) ont obtenu un effet similaire avec des participants âgés à qui l'on demandait de vérifier si des paires présentées deux à deux étaient analogues sur un certain nombre de dimensions. Cet effet d'interférence, particulièrement marqué chez les personnes âgées, peut aussi s'observer chez des adultes jeunes dès lors que les dimensions pertinentes sur lesquelles doit s'opérer la vérification de l'analogie ne sont indiquées qu'après l'encodage de la première paire (Cho, Holyoak, & Cannon, 2007). Dans cette condition en effet, les participants n'ont pas la possibilité d'ignorer les dimensions non pertinentes avant l'encodage et l'effet d'interférence créé par ces dimensions est délétère. Chez les enfants, Thibaut et al. (2010a) ont ajouté du « bruit perceptif », i.e. des textures aléatoires, aux stimuli dans une tâche d'analogie de type A:B::C:D. Cet élément non pertinent rendait l'extraction de la relation qui donnait sens à l'analogie, plus difficile. Les résultats ont montré un effet d'interaction entre la présence du bruit et l'âge des enfants : les enfants les plus jeunes (6 et 8 ans) ont vu leur performance davantage affectée par cet effet de texture, les plus âgés (14 ans) semblant rapidement isoler les seules dimensions pertinentes pour l'analogie. Ensemble, ces études révèlent l'importance des processus inhibiteurs lors de la formation d'une représentation de la relation source.

Outre la fonction d'inhibition, la flexibilité est parfois requise lors de la construction d'une représentation pertinente de la structure relationnelle source. En effet, le traitement de la tâche ne se fait pas toujours de manière sérielle mais plutôt par des allers-retours entre traitement des situations source et cible (Ripoll, 1992). Si la première représentation de la relation source envisagée peut être tout à fait adaptée, elle nécessite parfois d'être ajustée, voire complètement révisée. Par exemple, dans une analogie A:B::C:D, l'analyse de la paire A:B peut révéler rapidement une relation saillante qui n'est pas utilisable pour construire une relation entre C et D. Dans ce cas, il est probable que la construction de l'analogie nécessitera un va-et-vient entre la paire A:B et la paire « C:? » qui permettra de donner un sens global à la situation proposée. Si la paire A:B est constituée des termes « chien » et « chiot », la première relation qui vient à l'esprit sera souvent « enfant de ». Cependant, si le terme C est horloge et les solutions proposées sont « montre » (D) ; « ballon » (E) ; « train » (F), alors la première relation extraite entre A et B semble difficilement utilisable. On est obligé de trouver une autre relation entre A et B qui permette d'intégrer « horloge ». Ce pourrait être la relation « plus grand que » qui permet de construire une analogie où C et D sont « horloge » et « montre » (voir French, 2008, pour une discussion). Gladly, French, et Thibaut (soumis)² ont directement testé cette idée de révision ou de re-représentation sur des enfants de 5–6 ans avec des analogies de type A:B::C:D. Dans cette expérience, les enfants voyaient d'abord la paire A:B seule et devaient verbaliser la relation unissant les deux termes, puis voyaient C et l'ensemble des solutions. Les auteurs ont comparé deux conditions. Dans la première (appelée « restructuration »), la même paire A:B pouvait figurer deux relations : une relation sémantique (par exemple les termes « chemise » et « valise » liés par la relation « aller dans ») et une relation d'identité de couleur (A et B étaient rouges). L'identité de couleur était saillante mais n'était pas pertinente pour interpréter l'analogie car aucun stimulus de l'ensemble des solutions proposées ne possédait la même couleur que C. Dans la seconde condition (« contrôle »), les paires A:B étaient conçues pour n'exprimer qu'une seule relation, sémantique dans ce cas (i.e. la relation « aller dans » pour « chemise » et « valise »). Les résultats ont montré que les performances dans la condition restructuration étaient inférieures à celles de la condition contrôle. Dans la condition restructuration, la plupart des participants interprétaient la paire A:B en termes de la relation « même couleur ». On peut alors interpréter la différence entre les deux conditions comme reflétant un coût de flexibilité cognitive. En effet, dans la condition restructuration, sélectionner la réponse correcte nécessitait de réviser la première représentation de la paire A:B pour envisager une nouvelle relation applicable dans l'ensemble de solutions.

Il est intéressant de noter que chez les jeunes enfants, cette difficulté de révision des représentations se manifeste également lors de la résolution d'analogies successives. Minier et Blaye (2012a) ont

² Gladly, Y. French, R.M., & Thibaut, J.P. (soumis) Helping children overcome strategic deficits in the A:B::C:? task: A contribution to understanding analogical reasoning development.

proposé à des enfants de 4 et 5 ans des analogies de type A:B::C:D portant sur des relations « même forme » ou « même couleur ». Les performances analogiques des enfants étaient moins bonnes lorsque la relation à transférer analogiquement différait de celle pertinente à l'essai précédent. Ces résultats soulignent la difficulté des enfants à se décentrer d'une relation précédemment pertinente pour en envisager une nouvelle et pointent la nécessité d'un contrôle flexible pour la résolution des analogies.

2.2. Effet de la représentation de la relation source sur le contrôle exécutif de la résolution de l'analogie

Contrairement à ce que laissent supposer les thèses développées par Gentner et Goswami, la connaissance des relations ne doit pas être considérée en tout ou rien mais doit s'évaluer en termes gradués reflétant la force des représentations (Morton & Munakata, 2002 ; Munakata & Yerys, 2001). Une telle proposition offre un cadre interprétatif permettant de rendre compte de robustes phénomènes de dissociations entre connaissances et actions observées dans la littérature développementale (ex. Cepeda & Munakata, 2007 ; Yerys & Munakata, 2006). Une représentation peut voir sa force varier en fonction des contextes, de l'expertise ou du développement. Lorsqu'il s'agit de relations entre objets, les représentations d'objets peuvent être plus ou moins fortement associées en fonction de l'expérience. Ainsi, deux représentations fortement associées auront tendance à être automatiquement co-activées alors que deux représentations faiblement associées exigeront plus de contrôle pour être manipulées comme une structure relationnelle source (ex. chien-niche vs chien-arbre). De plus, la représentation d'une relation peut permettre une bonne performance dans une situation-problème peu ou pas conflictuelle mais peut s'avérer insuffisante si la situation implique de dépasser un conflit entre plusieurs représentations (Cepeda & Munakata, 2007). L'influence de cette hiérarchie des forces d'associations des représentations dans le contrôle d'un raisonnement a été établie dans le domaine de la catégorisation. Par exemple, Scheuner, Bonthoux, Cannard, et Blaye (2004) ont montré que la tendance des jeunes enfants à privilégier un mode de catégorisation thématique était modulée par la force d'association entre objets. Ainsi, dans une tâche d'appariement d'images en choix forcé, les associés taxonomiques pouvaient se trouver plus facilement sélectionnés que les associés thématiques si la force d'association des premiers dépassait celle des seconds. On peut envisager que lors du RA, la force relative des relations pertinentes et distractrices crée un conflit d'autant plus difficile à dépasser que le rapport de forces est au bénéfice des relations distractrices.

Une autre façon d'évaluer la gradation en termes de coût de contrôle, selon la force de la représentation de la situation source est celle adoptée dans l'étude de Thibaut et al. (2010b). Ces auteurs testent l'effet de la force d'association (faible, élevée) des termes de la source sur la recherche contrôlée de son analogue en faisant varier le nombre de distracteurs de l'ensemble de solutions (1 ou 3) sur les performances analogiques d'enfants de 4 et 5 ans. Leurs résultats révèlent l'effet du nombre de distracteur(s), uniquement lorsque les relations pertinentes sont faibles. Autrement dit, une force élevée de la représentation des relations pertinentes permet d'exercer un contrôle plus efficace lors de la recherche de la solution et donc d'ignorer plus facilement les distracteurs, quel que soit leur nombre.

Un élément important dans l'augmentation de la force des représentations pertinentes est sans doute le degré d'explicitation de celles-ci. Gentner et ses collaborateurs ont montré que les enfants ont de meilleures performances de transfert analogique lorsqu'ils sont entraînés à étiqueter verbalement la relation source (ex. Kotovsky & Gentner, 1996 ; Loewenstein & Gentner, 2005 ; Rattermann & Gentner, 1998a, b). Selon ces auteurs, un label commun invite à une comparaison plus profonde des stimulus qui portent le même label, et donc, à aller au-delà des similitudes de surface existantes entre les items (Christie & Gentner, 2010 ; Gentner & Namy, 1999 ; Kotovsky & Gentner, 1996). Il s'agit bien là d'une interprétation suggérant qu'une explicitation verbale de la représentation de la situation source favorise une amélioration du contrôle sur la résolution de l'analogie. En effet, l'explicitation de la relation source peut contribuer à son maintien en mémoire de travail et ainsi la rendre plus facilement accessible tout au long du traitement.

Son, Smith, Goldstone, & Leslie (2012) envisagent une interprétation complémentaire de l'explicitation verbale les conduisant à graduer différents niveaux d'explicitation. Selon ces auteurs, la signification des mots active des schémas de structures relationnelles construits par l'expérience qui permettent aux enfants d'effectuer des liens entre situations source et cible. Dès lors, pour que l'étiquette verbale soit bénéfique au raisonnement, elle doit activer des schémas d'un niveau

d'abstraction optimal (*optimal vagueness hypothesis*). Autrement dit, le schéma activé doit en dire assez sur la structure relationnelle pour pouvoir guider une inférence mais sans trop de spécificités pour qu'il puisse être appliqué à une situation nouvelle. Des enfants de 4–5 ans testés sur le transfert analogique de relations telle que la symétrie (deux objets identiques entourent un troisième objet) obtiennent de meilleures performances quand ils utilisent un label évoquant un schéma (« Partage ») plutôt qu'un non-mot (« Koli ») ou un mot iconique (une série de syllabes congruentes avec la structure relationnelle testée, « Ko-Li-Ko »). D'après les auteurs, le mot iconique est trop abstrait pour que les enfants lui donnent du sens et l'utilisent efficacement, d'où l'idée d'une étiquette d'une imprécision optimale.

Ces différents travaux ont montré que l'explicitation de la relation pertinente par un label relationnel augmentait les performances analogiques. Cependant, s'ils suggèrent que ce bénéfice pourrait résulter d'une amélioration du contrôle exercé sur la résolution de l'analogie, ils ne le testent pas directement. Des études récentes ont montré que l'explicitation verbale, comme symbolique (l'image d'un pinceau pour étiqueter la relation « même couleur » ou d'un crayon pour la relation « même forme », Minier & Blaye, 2012a) de la relation pertinente modérait le coût exécutif du raisonnement chez des enfants de 4–5 ans. Cette étude montre qu'une explicitation de la relation source permet de mieux résister à l'interférence créée par l'introduction d'un distracteur dans l'ensemble de solutions. De plus, le bénéfice de l'utilisation d'un symbole imagé, montre que ce n'est pas la verbalisation, en tant que telle, qui est importante mais bien l'explicitation de la nature de la relation. Ainsi, dans un contexte de ressources exécutives limitées, l'augmentation de l'efficacité du contrôle – meilleure résistance aux distracteurs – lors d'une meilleure explicitation de la représentation de la relation source, conforte l'hypothèse d'une étroite interaction entre représentation et contrôle dans le RA.

Enfin, comme pour la relation source, l'élaboration de la représentation de la cible engendre aussi un coût de contrôle. Minier et Blaye (2012b) ont mesuré le RA d'enfants de 4 et 5 ans en contrastant deux contextes d'évaluation parmi les plus souvent utilisés : une épreuve A:B::C:D et une épreuve d'appariement relationnel. Contrairement à l'épreuve A:B::C:D, l'appariement relationnel implique de choisir entre des paires déjà constituées. Ainsi, elle devrait entraîner un coût exécutif plus faible que celui de l'épreuve A:B::C:D car elle supprime la nécessité de construire une représentation mentale des potentielles relations cibles. Cet aspect est d'autant plus important que cette représentation doit être engagée dans un processus de comparaison avec la paire source. Comme attendu, les enfants ont obtenu de meilleures performances en tâche d'appariement relationnel confirmant ainsi l'étagement exécutif que constituent les paires déjà formées pour le transfert analogique.

Les travaux présentés ci-dessus ont montré le rôle du contrôle exécutif dans le RA chez l'enfant. Ils ont également souligné l'importance des représentations – et du langage comme support à l'élaboration de ces représentations – dans la mise en œuvre d'un contrôle efficient. Ainsi, les rôles respectifs du langage et de la qualité des processus de contrôle sont difficilement dissociables chez l'humain. L'étude des primates non humains permet de corroborer le rôle du contrôle exécutif dans le RA et d'étudier son implication en dehors du langage.

3. Études chez le primate non humain

Par leur proximité phylogénétique avec l'homme, les primates non humains ont constitué depuis plus de trente ans des modèles d'étude potentiellement intéressants pour comprendre le raisonnement par analogie chez l'enfant. Des travaux récents démontrent que malgré l'absence de langage, le primate non humain est capable de raisonner par analogie sur des relations perceptives et, de surcroît, soulignent que cette compétence est corrélée avec l'efficacité de leurs fonctions exécutives. Nous détaillons, dans un premier temps, certains aspects du contrôle exécutif des primates non humains, et notamment concernant les fonctions supposées jouer un rôle dans le RA chez l'homme. Dans un second temps, nous détaillons les différentes compétences d'analogie mises en évidence chez les primates non humains. Nous finissons par une présentation d'un jeu de corrélations entre efficacité des fonctions exécutives et capacités de RA chez un groupe de babouins.

3.1. Fonctions exécutives chez le primate non humain

Les primates non humains possèdent un contrôle exécutif efficace (Lauwereyns et al., 2000 ; Washburn, 1994) dont le siège est situé, comme chez l'homme, dans le cortex préfrontal (Sakagami et al., 2001 ; Roberts & Wallis, 2000). L'étude des fonctions exécutives chez les primates non humains montre qu'ils disposent de la plupart des fonctions a priori nécessaires au raisonnement par analogie.

Chez l'homme, la taille de l'empan de la mémoire à court terme serait déterminante dans les capacités de raisonnement (Kane & Engle, 2002). Dans un travail récent, Fagot et De Lillo (2011) ont mesuré la capacité de stockage en mémoire à court terme chez le babouin en utilisant le test des blocs de Corsi (Corsi, 1972). L'expérimentateur affichait de trois à six formes identiques sur l'écran d'ordinateur, et le babouin devait par la suite sélectionner ces formes en répliquant leur ordre d'apparition dans la séquence d'affichage. Les babouins ont réussi à reproduire des séquences composées de quatre à cinq items. Puisque l'encodage de deux relations peut impliquer le stockage de quatre items, ces animaux semblent donc disposer de suffisamment de ressources en mémoire à court terme pour pouvoir encoder les relations du domaine source et du domaine cible, et donc potentiellement pour résoudre des problèmes d'analogie.

Toutefois, être capable de mémoriser un nombre important d'items en mémoire ne suffit pas pour résoudre la tâche d'appariement relationnel. Comme nous l'avons vu chez l'enfant, le maintien de la relation source en mémoire pour guider le traitement de la paire cible est critique. Rey, Perruchet, et Fagot (2012) ont récemment démontré que les babouins peuvent maintenir un but en mémoire de travail alors qu'ils traitent d'autres items. Cette étude s'est déroulée en deux temps. Dans une première phase, des paires de stimuli étaient présentées à l'écran et le babouin devait toucher les éléments de chaque paire dans un ordre précis. Les paires mémorisées correspondaient donc à des séquences ordonnées que l'on peut noter A1-A2, B1-B2... N1-N2 pour les paires A à N, respectivement. La seconde phase consistait à présenter simultanément le premier élément de deux paires distinctes (par exemple les éléments A1 et B1), puis les compléments de chaque paire associés à des distracteurs (par exemple A2, B2 et C2).

L'analyse montre qu'un nombre important de séquences produites avait une structure emboîtée de type A1-B1-B2-A2, et donc que les babouins peuvent activement maintenir en mémoire le complément A2 de la paire A1-A2, alors qu'ils traitaient la paire B1-B2. Le babouin fait donc ici preuve d'une compétence de mise à jour du but en mémoire de travail.

Deux autres fonctions ont été identifiées comme pouvant jouer un rôle dans le RA chez l'enfant : il s'agit de la flexibilité cognitive et de l'inhibition. La flexibilité cognitive du babouin a été récemment testée grâce à une adaptation de la tâche de Wisconsin Card Sorting Test (WCST, Berg, 1948 ; Bonté, Flemming, et Fagot, 2011, cf. Fig. 3A). Dans cette tâche, les animaux devaient dans un premier temps apprendre à sélectionner des stimuli caractérisés par une valeur de dimension particulière (par exemple la couleur verte, expérience 1). Après avoir appris la dimension associée à la récompense, le programme informatique changeait brusquement la règle de discrimination, par exemple en demandant de sélectionner les items en forme de triangle. Ce travail a montré une adaptation rapide aux changements soudains de la règle de discrimination. Une autre étude a également confirmé de très bonnes capacités d'inhibition chez le babouin dans une tâche de recherche visuelle (Fagot, Bonté, & Hopkins, 2011, expérience 1). Dans cette tâche informatisée, le babouin devait sélectionner une cible parmi un nombre variable de distracteurs (cf. Fig. 3B). La bonne performance des singes dans cette tâche (voir ci-dessous) montre leur capacité à inhiber leurs réponses aux distracteurs lors de la sélection de la cible.

En résumé, le babouin fait preuve d'une flexibilité cognitive et d'un contrôle inhibiteur lui permettant de traiter en parallèle plusieurs objets en maintenant activement un but en mémoire de travail. Si ces capacités semblent nécessaires à l'émergence des processus d'analogie, qu'en est-il de la performance des babouins dans des tâches impliquant ce type de raisonnement ?

3.2. Raisonnement par analogie chez le primate non humain

La première étude sur le raisonnement par analogie chez le primate non humain a été menée chez Sarah, une femelle chimpanzé qui avait au préalable appris la signification de symboles en plastique

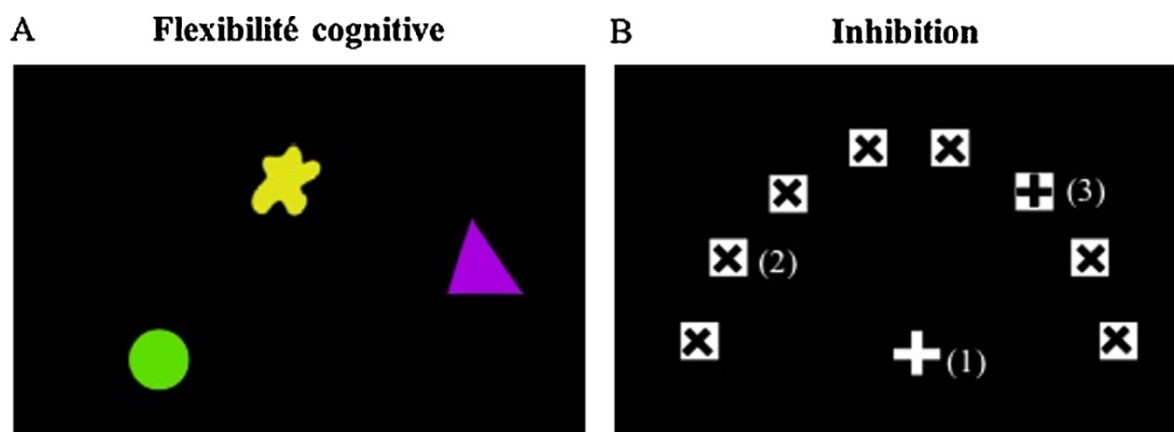


Fig. 3. Tâches de flexibilité cognitive (WCST) et d'inhibition (Hick). A. Dans la tâche de flexibilité cognitive (WCST), les affichages comportent trois stimuli différents et le babouin doit sélectionner la forme cercle quelle que soit sa couleur. Lorsqu'il a atteint le critère de réussite, la règle change et il doit désormais choisir les stimuli de couleur jaune. Cette procédure se poursuit en changeant régulièrement le stimulus associé à la récompense. La flexibilité cognitive est mesurée par les pourcentages de réponses correctes pour les 25 essais suivant chaque changement de règle (voir Bonté et al., 2011). L'inhibition (B) a été testée par la tâche de Hick (voir également Fagot et al., 2011). Dans cette tâche, le babouin touche la croix de fixation ⁽¹⁾ puis s'affichent plusieurs carrés blancs ⁽²⁾ marqués d'un signe « X ». Un carré devient alors la cible ⁽³⁾ lorsqu'un signe « + » s'inscrit en son centre. Le babouin doit alors relâcher la croix de fixation pour toucher la cible. L'inhibition est mesurée par le pourcentage de réponses où l'animal parvient à sélectionner correctement la cible (voir Fagot et al., 2011).

(Gillan, Premack, & Woodruff, 1981). La tâche proposée était de type A:B::C:D. Dans la pratique, les auteurs présentaient à Sarah trois formes géométriques sur un plateau. Deux de ces formes correspondaient à la paire source A:B, la troisième forme à « C ». Dans cette étude, Sarah s'est montrée capable de choisir dans un lot de formes celle qui complétait la paire cible, de telle manière que les paires sources et cibles entretiennent simultanément les mêmes relations de taille, de couleur et de texture. Selon Premack (1983), l'excellente performance de Sarah dans cette tâche s'expliquerait par son entraînement préalable au « langage ». Cette hypothèse a toutefois été remise en cause par une série de travaux montrant que des singes n'ayant pas suivi d'entraînement préalable au « langage » étaient capables de résoudre certaines tâches d'analogie.

Ainsi, Thompson, Oden, et Boysen (1997) ont démontré que des chimpanzés qui ont seulement appris à utiliser deux symboles pour labelliser les relations d'identité et de différence pouvaient résoudre une tâche d'appariement relationnel à un même niveau de performance que Sarah. Selon ces auteurs, ces deux symboles auraient permis de labelliser les relations à appairer. Ces travaux suggèrent que le rôle du langage dans le raisonnement par analogie soit de conférer au raisonneur des moyens de symbolisation des relations. Cette théorie est en accord avec l'hypothèse émise chez l'homme sur l'importance de la connaissance préalable des relations à traiter (Gentner, 1988 ; Goswami & Brown, 1989).

Cependant, de récents travaux suggèrent que la connaissance des relations ne soit pas nécessairement liée à la possession de symboles pour labelliser ces relations, au moins pour des relations simples. En effet, des équipes ont récemment mis en évidence chez le singe l'émergence de processus cognitifs leur permettant de comparer des relations d'identité et de différence sans acquisition préalable de labels pour décrire ces relations (Fagot & Thompson, 2011 ; Flemming, Thompson, & Fagot, 2013 ; Maugard, Marzouki, & Fagot, 2013 ; Truppa, Piano Mortari, Garofoli, Privitera, & Visalberghi, 2011). Fagot et Thompson (2011) ont ainsi montré que des babouins pouvaient appairer des paires de formes en considérant les relations d'identité ou de différence que ces paires représentent. Dans un protocole d'appariement relationnel, une paire de formes géométriques source était présentée, par exemple deux carrés pour une relation d'identité. Après une phase d'exploration de la paire source, deux paires cibles au choix apparaissaient, par exemple deux ronds (relation d'identité) ou une croix et un carré (relation de différence). Les babouins devaient choisir la paire cible qui représentait la même relation que la paire source, ici les deux ronds, en négligeant le fait que la paire à éviter partageait un attribut (un carré) avec la paire source (cf. Fig. 4A.). Parmi les sujets testés, 6 ont réussi à atteindre des performances supérieures à 80 % dans cette tâche démontrant une aptitude à traiter prioritairement les

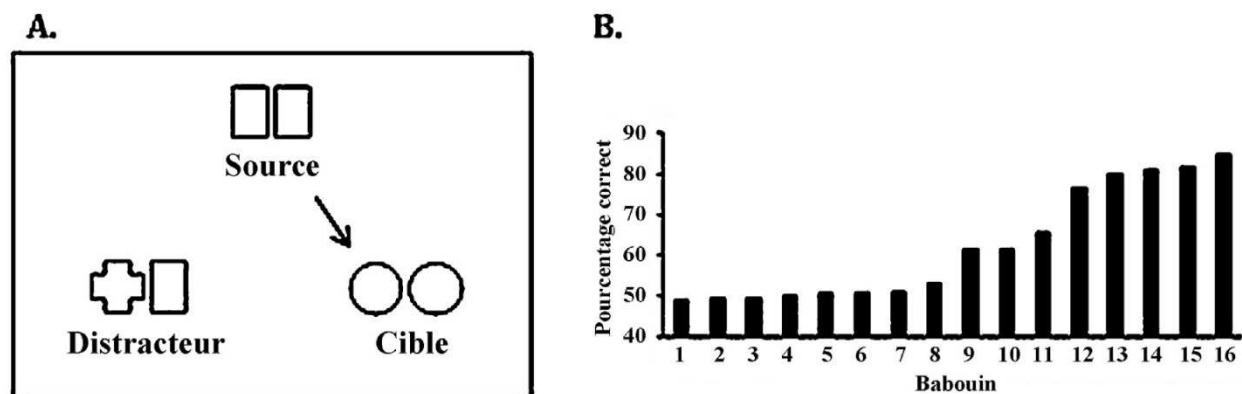


Fig. 4. A. Tâche d'appariement relationnel. Représentation de la tâche d'appariement relationnel proposée par Fagot et Thompson (2011). La paire à éviter pour la réponse partage un attribut (ici un rectangle) avec la paire source. La paire à choisir présente la même relation (ici une relation d'identité) avec la paire source. B. Variabilité interindividuelle dans la tâche d'appariement relationnel. Scores obtenus par 16 babouins dans la tâche de RMTS par Fagot et Thompson (2011). On notera que 6 d'entre eux atteignent un taux de réussite de 80% correct, ce qui révèle des compétences d'analogie.

informations relationnelles au détriment des informations liées aux attributs. Cependant, les résultats de l'ensemble du groupe présentent de fortes variabilités interindividuelles, comme en témoigne la Fig. 4B qui montre les performances de 16 sujets testés. Cette variabilité a été retrouvée dans d'autres études. Une étude menée sur le singe capucin (Truppa et al., 2011) montre qu'un seul singe sur les cinq testés s'est avéré capable de résoudre un problème d'appariement relationnel impliquant des paires de stimuli identiques ou différents. Cette variabilité interindividuelle se retrouve chez des babouins testés sur une version complexifiée de la tâche d'appariement relationnel (Fagot & Maugard, 2013). Dans cette expérience, les babouins devaient garder en mémoire la paire source dans la mesure où elle figurait deux relations (par exemple, identité de formes et différence de couleurs) et que l'une d'elles seulement trouvait son analogue dans l'ensemble des solutions (cf. concept de re-représentation décrit chez l'enfant). Après un entraînement de plusieurs milliers d'essais, seuls quelques babouins se sont montrés capables de résoudre cette tâche complexe. Nous verrons ci-dessous que la variabilité observée dans la tâche d'appariement relationnel est fortement liée à l'âge et pourrait s'expliquer par la variabilité interindividuelle dans l'efficacité du contrôle exécutif.

3.3. Corrélations entre fonctions exécutives et raisonnement par analogie

Les travaux conduits par l'équipe de Joël Fagot à la plateforme Cognition Comparée du Laboratoire de psychologie cognitive à Marseille ont permis de mesurer à la fois le contrôle exécutif et les performances dans une tâche d'appariement relationnel d'un groupe de 16 babouins âgés de 3,7 à 15,3 ans.

L'analyse des corrélations entre ces différentes variables montre tout d'abord que l'efficacité du contrôle exécutif (i.e. la flexibilité cognitive et l'inhibition) est négativement corrélée à l'âge des sujets (i.e. tâche de flexibilité cognitive : $r = -0,74$, $p < 0,05$; tâche d'inhibition : $r = -0,80$, $p < 0,05$). Ces résultats sont concordants avec l'ensemble des travaux conduits chez les primates humains et non humains montrant que l'efficacité du contrôle exécutif varie en fonction de l'âge (humains : Zelazo, Craik, & Booth, 2004 ; primates non humains : Moore, Killiany, Herndon, Rosene, & Moss, 2006 ; Picq, 2007 ; Weed, Bryant, & Perry, 2008). De plus, ils s'accordent avec les études conduites chez le babouin qui décrivent une maturation des fonctions exécutives jusqu'à 6–8 ans puis une diminution progressive de leur efficacité (Bonté et al., 2011).

L'analyse des performances d'appariement relationnel en fonction de l'âge révèle également une corrélation négative entre ces deux variables ($r = -0,80$, $p < 0,05$), en concordance avec les résultats issus de la littérature humaine montrant une diminution des capacités de RA chez les personnes âgées (Viskontas et al., 2004).

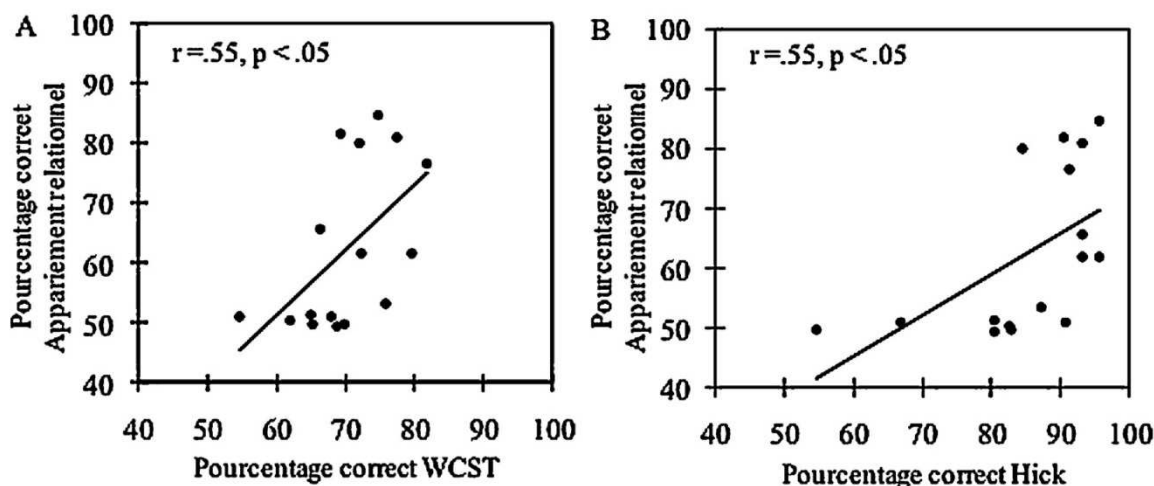


Fig. 5. Corrélations des performances d'appariement relationnel avec les tâches de WCST et Hick. Corrélation de Pearson et régression linéaire entre les performances en appariement relationnel et notre mesure de flexibilité cognitive (A). Corrélation de Pearson et régression linéaire obtenue chez le babouin entre les performances en appariement relationnel et nos mesures d'inhibition (B).

Ces premières analyses montrent que le contrôle exécutif et les capacités d'appariement relationnel des babouins sont tous deux corrélés négativement à l'âge, nous conduisant à formuler l'hypothèse que l'efficacité du contrôle exécutif et les capacités RA soient liés.

L'analyse des corrélations entre les performances sur la tâche d'appariement relationnel (Fagot & Thompson, 2011) avec celles obtenues sur les tâches de flexibilité cognitive (Bonté et al., 2011, expérience 1) et d'inhibition (Fagot et al., 2011, expérience 1) révèle que ces variables sont positivement corrélées ($r = 0,55, p < 0,05$, pour l'inhibition ; $r = 0,55, p < 0,05$, pour la flexibilité, cf. Fig. 5A et B).

Ainsi, dans l'échantillon de population testé, les individus les plus jeunes présenteraient un contrôle exécutif efficace ainsi que de bonnes performances en appariement relationnel. À l'inverse, les individus les plus âgés disposeraient d'un contrôle exécutif moins efficace et auraient plus de difficulté à résoudre la tâche d'appariement relationnel.

Pour conclure, l'évolution des capacités de RA chez le singe au cours de la vie pourrait être expliquée par les variations dans l'efficacité du contrôle exécutif avec l'âge.

4. Conclusions sur le rôle des fonctions exécutives dans le raisonnement par analogie

Le rôle du contrôle exécutif dans le raisonnement est un sujet d'investigation en plein essor (ex. Handley, Capon, Beveridge, Dennis, & Evans, 2004 ; Moutier, 1997 ; Moutier, Plagne-Cayeux, Melot, & Houdé, 2006 ; Steegen & De Neys, 2012). Jusqu'alors, les travaux sur le RA ont majoritairement attribué son émergence au développement des connaissances relationnelles. Les études présentées ici sont les premières à mettre en évidence l'importance du contrôle exécutif dans ce type de raisonnement.

Chez l'homme, les travaux conduits dans ce domaine reposent le plus souvent sur une approche expérimentale consistant à graduer le coût exécutif de la tâche d'analogie et à en observer les effets sur le raisonnement exprimé. Les résultats montrent que les performances ne dépendent pas seulement des connaissances relationnelles mais aussi du contexte de mise en œuvre de l'analogie. Ainsi, un enfant ayant une certaine représentation de la relation peut réussir une tâche impliquant un faible coût exécutif mais échouer sur une autre qui exige plus de contrôle. De rares études corrélationnelles (Thibaut, French, Vezneva, Gérard, & Gladly, 2011 ; Chuderska & Chuderski, 2009) ont permis de préciser l'implication spécifique de chacune des fonctions de contrôle, elles montrent que les fonctions d'inhibition, de flexibilité et de mise à jour en mémoire de travail sont toutes positivement corrélées aux performances analogiques. Plus récemment, l'étude longitudinale de Richland et Burchinal (2013) suggère même que l'efficacité des fonctions exécutives chez des enfants à 4 ans prédit la qualité de leur RA à 15 ans.

Les données corrélationnelles obtenues lors de l'étude du primate non humain corroborent les observations chez l'humain en montrant qu'un raisonnement de type analogique est possible chez cette espèce dépourvue de langage mais capable d'exercer un contrôle efficient sur un matériel semblable à celui proposé en tâche d'analogie. Bien que ne disposant probablement pas d'outils d'explicitation aussi efficace que le langage, les primates non humains développent néanmoins une certaine connaissance de la tâche et des relations testées (i.e. identité et différence) à travers le grand nombre d'essais qu'ils ont réalisés (en moyenne 24 000 essais pour atteindre un critère de réussite de 80 % de bonnes réponses dans l'étude de [Fagot & Thompson, 2011](#)). Il est probable que les singes apprennent à ignorer les attributs perceptifs pour se focaliser sur les relations grâce à ce long entraînement par essais-erreurs. En effet, si un singe commence par traiter les attributs perceptifs et à appairer les items sur ce critère, il n'obtient pas de récompense. Au fur et à mesure des essais et des renforcements, il apprend donc à négliger les attributs perceptifs et à déplacer son focus attentionnel jusqu'à traiter les caractéristiques relationnelles pour être enfin renforcé positivement. Par ailleurs, c'est en rencontrant divers exemples d'une même relation que les participants peuvent extraire les caractéristiques communes à l'ensemble de ces situations, à savoir la relation. Au fil des expériences, le « raisonneur » (primate humain ou non humain) peut extraire un noyau relationnel qu'il devient capable de reconnaître dans une nouvelle situation, en dépit des différences avec les situations rencontrées auparavant (cf. notion d'alignement progressif, [Kotovsky & Gentner, 1996](#)). L'approche originale adoptée ici a eu pour objet de spécifier les processus cognitifs qui sous-tendent l'appariement relationnel au cœur du RA. Les travaux réalisés chez les primates non humains et humains convergent sur l'intervention des trois principales fonctions de contrôle : inhibition, flexibilité cognitive et mise à jour des informations en mémoire de travail.

Chez l'humain, l'explicitation des représentations de la structure relationnelle source favorise un meilleur contrôle lors de la résolution de l'analogie. En retour, un contrôle efficient est requis pour conduire à une focalisation sur les seules informations pertinentes dans la situation source. Des va-et-vient entre la situation source et le contexte cible peuvent ainsi être nécessaires pour un ajustement flexible des représentations. Ainsi, les approches en termes de connaissances et de contrôle ne doivent pas être opposées, mais au contraire articulées dans l'objectif d'une meilleure compréhension des processus sous-jacents au RA. Un modèle computationnel élaboré par [Morrison, Dumas, et Richland \(2011\)](#) a d'ailleurs montré que l'augmentation des capacités d'inhibition était le meilleur prédicteur des différences développementales en RA, alors qu'une modification dans le système de représentation était ce qui expliquait le mieux les différences entre enfants du même âge, issus de cultures différentes.

Bien que les travaux empiriques restent encore rares, la psychologie développementale et l'approche comparative du RA disposent maintenant de la boîte à outils conceptuelle et méthodologique permettant d'étudier plus avant le rôle du développement des capacités de contrôle dans le développement même des compétences à raisonner par analogie. À ce titre, la prise en considération des connaissances, non plus dans une perspective dichotomique – présence/absence – mais comme correspondant à des représentations graduées, apparaît comme prometteuse.

Déclaration d'intérêts

Les auteurs n'ont pas transmis de déclaration de conflits d'intérêts.

Remerciements

Les travaux des co-auteurs présentés dans ce manuscrit ont été réalisés pour une large part grâce au soutien de l'Agence nationale pour la recherche au projet ANAFONEX (ANR-10-BLAN-1908-01).

Références

- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. *The psychology of learning and motivation*, 8, 47–89.
- Berg, E. A. (1948). A simple objective test for measuring flexibility in thinking. *Journal of General Psychology*, 39, 15–22.
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A developmental perspective on executive function. *Child Development*, 81(6), 1641–1660.
- Blaye, A., & Chevalier, N. (2011). The role of goal representation in preschoolers' flexibility and inhibition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 469–483.

- Bonté, E., Flemming, T., & Fagot, J. (2011). Executive control of perceptual features and abstract relations by baboons (*Papio papio*). *Behavioural Brain Research*, 222, 176–182.
- Cayol, D., Bastien-Toniazzo, M., & Blaye, A. (1997). Résolution de problème par analogie par des enfants de grande section de maternelle. *L'année psychologique*, 97(3), 409–432.
- Cepeda, M. L., & Munakata, Y. (2007). Why do children perseverate when they seem to know better: Graded working memory, or directed inhibition? *Psychonomic Bulletin and Review*, 14(6), 1058–1065.
- Chen, Z., Sanchez, R. P., & Campbell, T. (1997). From beyond to within their grasp: The rudiments of analogical problem solving in 10- and 13-month-olds. *Developmental Psychology*, 33(5), 790.
- Chevalier, N. (2010). Les fonctions exécutives chez l'enfant : concepts et développement [Executive functions in child: Concepts and development]. *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne*, 51(3), 149–163.
- Chevalier, N., & Blaye, A. (2006). Le développement de la flexibilité cognitive chez l'enfant préscolaire : enjeux théoriques. *L'année psychologique*, 106, 569–656.
- Cho, S., Holyoak, K. J., & Cannon, T. D. (2007). Analogical reasoning in working memory: Resources shared among relational integration, interference resolution, and maintenance. *Memory & Cognition*, 35(6), 1445–1455.
- Christie, S., & Gentner, D. (2010). Where hypotheses come from: Learning new relations by structural alignment. *Journal of Cognition and Development*, 11(3), 356–373.
- Chuderska, A., & Chuderski, A. (2009). *Executive control in analogical reasoning: Beyond interference resolution* Proceedings of the 31st Annual Conference of the Cognitive Science Society. Amsterdam: Cognitive Science Society.
- Corsi, P. M. (1972). Human memory and the medial temporal region of the brain. *Dissertation Abstracts International*, 34(02), 891B (University microfilms No. AA105-77717).
- Cragg, L., & Chevalier, N. (2012). The processes underlying flexibility in childhood. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(2), 209–232.
- Cragg, L., & Nation, K. (2008). Go or no-go? Developmental improvements in the efficiency of response inhibition in mid-childhood. *Developmental Science*, 11, 819–827.
- Crisafi, M. A., & Brown, A. L. (1986). Analogical transfer in very young children: Combining two separately learned solutions to reach a goal. *Child Development*, 57, 953–968.
- Dunbar, K., & Blanchett, I. (2001). The in vivo/in vitro approach to cognition: The case of analogy. *Trends in Cognitive Science*, 5, 334–339.
- Duncan, J., Emslie, H., Williams, P., Johnson, R., & Freer, C. (1996). Intelligence and the frontal lobe: The organization of goal-directed behavior. *Cognitive Psychology*, 30, 257–303.
- Fagot, J., Bonté, E., & Hopkins, W. D. (2011). Age-dependent behavioral strategies in a visual search task in baboons (*Papio papio*) and their relation to inhibitory control. *Journal of Comparative Psychology*.
- Fagot, J., & De Lillo, C. (2011). A comparative study of working memory: Immediate serial spatial recall in baboons (*Papio papio*) and humans. *Neuropsychologia*, 49, 3870–3880.
- Fagot, J., & Maugard, A. (2013). Analogical reasoning in baboons (*Papio papio*): Flexible reencoding of the source relation depending on the target relation. *Learning & Behavior*, 1–9. <http://dx.doi.org/10.3758/s13420-012-0101-7>
- Fagot, J., & Thompson, R. K. R. (2011). Generalized relational matching by guinea baboons (*Papio papio*) in two-by-two-item analogy problems. *Psychological Science*, 22, 1304–1309.
- Flemming, T., Thompson, R. R., & Fagot, J. (2013). Baboons, like humans, solve analogy by categorical abstraction of relations. *Animal Cognition*, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1007/s10071-013-0596-0>
- French, B. (2008). Relational priming is to analogy-making as one-ball juggling is to seven-ball juggling. *Behavioral and Brain Sciences*, 31, 386–387.
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: A review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134, 31–60.
- Gentner, D. (1983). Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7(2), 155–170.
- Gentner, D. (1988). Metaphor as structure mapping: The relational shift. *Child Development*, 47–59.
- Gentner, D. (2003). Why we're so smart. In D. Gentner, & S. Goldin-Meadow (Eds.), *Language in mind: Advances in the study of language and thought*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gentner, D., Holyoak, K. J., & Kokinov, B. N. (2001). *The analogical mind: Perspectives from cognitive science*. Cambridge, MA: Bradford.
- Gentner, D., & Namy, L. L. (1999). Comparison in the development of categories. *Cognitive Development*, 14(4), 487–513.
- Gentner, D., & Rattermann, M. J. (1991). Language and the career of similarity. In S. A. Gelman, & J. P. Brynes (Eds.), *Perspectives on language and thought: Interrelations in development* (pp. 225–277).
- Gerstadt, C. L., Hong, Y. J., & Diamond, A. (1994). The relationship between cognition and action: Performance of children 3–7 years old on a stroop-like day-night test. *Cognition*, 53, 129–153.
- Gillan, D. J., Premack, D., & Woodruff, G. (1981). Reasoning in the chimpanzee: I. Analogical reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 7, 1–17.
- Goswami, U., & Brown, A. L. (1989). Melting chocolate and melting snowmen: Analogical reasoning and causal relations. *Cognition*, 35(1), 69–95.
- Goswami, U., & Brown, A. L. (1990). Higher-order structure and relational reasoning: Contrasting analogical and thematic relations. *Cognition*, 36(3), 207–226.
- Halford, G. S., Wilson, W. H., & Phillips, S. (1998). Processing capacity defined by relational complexity: Implications for comparative, developmental, and cognitive psychology. *Behavioral and Brain Sciences*, 21(06), 803–831.
- Halford, G. S., Wilson, W. H., & Phillips, S. (2010). Relational knowledge: The foundation of higher cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(11), 497–505.
- Handley, S. J., Capon, A. A., Beveridge, M. M., Dennis, I. I., & Evans, J. T. (2004). Working memory, inhibitory control and the development of children's reasoning. *Thinking & Reasoning*, 10(2), 175–195.
- Harlow, J. M. (1868). Recovery after Severe Injury to the Head. Bulletin of the Massachusetts Medical Society. (Reprinted), *History of Psychiatry*, 414, 274–281.

- Hoyer, W., Rebok, G., & Sved, S. (1979). Effects of varying irrelevant information on adult age differences in problem solving. *Journal of Gerontology, 34*, 553–560.
- Inhelder, & Piaget. (1955). *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2002). The role of prefrontal cortex in working memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence: An individual-differences perspective. *Psychonomic Bulletin & Review, 9*(4), 637–671.
- Kotovsky, L., & Gentner, D. (1996). Comparison and categorization in the development of relational similarity. *Child Development, 67*(6), 2797–2822.
- Lauwereyns, J., Koizumi, M., Sakagami, M., Hikosaka, O., Kobayashi, S., & Tsutsui, K. (2000). Interference from irrelevant features on visual discrimination by macaques (*Macaca fuscata*): A behavioral analogue of the human Stroop effect. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 26*, 352–357.
- Loewenstein, J., & Gentner, D. (2005). Relational language and the development of relational mapping. *Cognitive Psychology, 50*(4), 315–353.
- Maestriperieri, D. (2005). *Primate psychology*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Maintenant, C., & Blaye, A. (2008). Développement de la flexibilité catégorielle de 3 à 8 ans : rôle des aspects conceptuels. *L'Année Psychologique, 108*, 659–698.
- Marcovitch, S., Boseovski, J. J., & Knapp, R. J. (2007). Use it or lose it: Examining preschoolers' difficulty in maintaining and executing a goal. *Developmental Science, 10*, 559–564.
- Markman, A. B., & Gentner, D. (1993). Structural alignment during similarity comparisons. *Cognitive Psychology, 25*(04).
- Maugard, A., Marzouki, Y., & Fagot, J. (2013). Contribution of Working Memory Processes to Relational Matching-to-Sample Performance in Baboons (*Papio papio*). (in press). *Journal of Comparative Psychology*.
- Minier, L., & Blaye, A. (2012a). *Analogical reasoning in preschoolers: Can an explicit representation enhance executive control?* Poster presented to the Development of Executive Functions workshop, Utrecht, Netherlands (April 18–19).
- Minier, L., & Blaye, A. (2012b). *Analogical reasoning in preschoolers: A matter of both relational knowledge and executive control* Poster presented to the International Conference on Thinking, London, England (July 4–6).
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., & Howerter, A. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis. (*C. Psychology Ed.*) *Cognitive Psychology, 41*(1), 49–100.
- Moore, T. L., Killiany, R. J., Herndon, J. G., Rosene, D. L., & Moss, M. B. (2006). Executive system dysfunction occurs as early as middle-age in the rhesus monkey. *Neurobiol Aging, 27*(10), 1484–1493.
- Morrison, R. G., Doumas, L. A. A., & Richland, L. E. (2011). A computational account of children's analogical reasoning: Balancing inhibitory control in working memory and relational representation. *Developmental Science, 14*(3), 516–529.
- Morrison, R. G., Krawczyk, D., Holyoak, K. J., Hummel, J. E., Chow, T., Miller, B., et al. (2004). A neurocomputational model of analogical reasoning and its breakdown in frontotemporal dementia. *Journal of Cognitive Neuroscience, 16*, 260–271.
- Morton, J. B., & Munakata, Y. (2002). Active vs. latent representations: A neural network model of perseveration, dissociation, and decalage. *Developmental Psychobiology, 40*, 255–265.
- Moutier, S. (1997). Biais de raisonnement déductif et inhibition chez l'enfant d'âge scolaire. *Archives De Psychologie, 65*(255), 279–292.
- Moutier, S., Plagne-Cayeux, S., Melot, A., & Houdé, O. (2006). Syllogistic reasoning and belief-bias inhibition in school children: Evidence from a negative priming paradigm. *Developmental Science, 9*(2), 166–172.
- Munakata, Y., & Yerys, B. E. (2001). All together now: When dissociations between knowledge and action disappear. *Psychological Science, 12*, 335–337.
- Norman, W., & Shallice, T. (1986). Attention to action. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz, & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and self regulation: Advances in research and theory* (vol. 4) (pp. 1–18). New York: Plenum.
- Parker, S. T., & McKinney, M. L. (1999). *Origins of intelligence: The evolution of cognitive development in monkeys, apes, and humans*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.
- Picq, J. L. (2007). Aging affects executive functions and memory in mouse lemur primates. *Experimental Gerontology, 42*(3), 223–232.
- Premack, D. (1983). The codes of man and beast. *Behavioral and Brain Sciences, 6*, 125–137.
- Rattermann, M. J., & Gentner, D. (1998a). More evidence for a relational shift in the development of analogy: Children's performance on a causal-mapping task. *Cognitive Development, 13*(4), 453–478.
- Rattermann, M. J., & Gentner, D. (1998b). The effect of language on similarity: The use of relational labels improves young children's performance in a mapping task. *Advances in analogy research: Integration of theory and data from the cognitive, computational, and neural sciences, 274–282*.
- Rey, A., Perruchet, P., & Fagot, J. (2012). Centre-embedded structures are a by-product of associative learning and working memory constraints: Evidence from baboons (*Papio papio*). *Cognition, 123*, 180–184.
- Richland, L. E., & Burchinal, M. R. (2013). Early executive function predicts reasoning development. *Psychological Science, 24*(1), 87–92.
- Richland, L. E., Morrison, R. G., & Holyoak, K. J. (2006). Children's development of analogical reasoning: Insights from scene analogy problems. *Journal of Experimental Child Psychology, 94*(3), 249–273.
- Ripoll, T. (1992). La recherche sur le raisonnement par analogie : objectifs, difficultés et solutions. *L'année psychologique, 92*(2), 263–288.
- Roberts, A. C., & Wallis, J. D. (2000). Inhibitory control and affective processing in the prefrontal cortex: Neuropsychological studies in the common marmoset. *Cerebral Cortex, 10*, 252–262.
- Sakagami, M., Tsutsui, K., Lauwereyns, J., Koizumi, M., Kobayashi, S., & Hikosaka, O. (2001). A code for behavioral inhibition on the basis of color, but not motion, in ventrolateral prefrontal cortex of macaque monkey. *The Journal of Neuroscience, 21*, 4801–4808.
- Scheuner, N., Bonthoux, F. X. O., Cannard, C., & Blaye, A. X. S. (2004). The role of associative strength and conceptual relations in matching tasks in 4- and 6-year-old children. *International Journal of Psychology, 39*(4), 290–304.
- Son, J., Smith, L., Goldstone, R., & Leslie, M. (2012). The importance of being interpreted: Grounded Words and children's relational reasoning. *Frontiers in Psychology, 3*(4), 1–12.

- Steegeen, S., & De Neys, W. (2012). Belief inhibition in children's reasoning: Memory-based evidence. *Journal of Experimental Child Psychology*, 112, 231–242.
- Thibaut, J. P., French, R., & Vezneva, M. (2010a). The development of analogy making in children: Cognitive load executive functions. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106(1), 1–19.
- Thibaut, J. P., French, R., & Vezneva, M. (2010b). Cognitive load and semantic analogies: Searching semantic space. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17(4), 569–574.
- Thibaut, J. P., French, R., Mussault, S., Gérard, Y., & Glady, Y. (2011). *In the eyes of the beholder: What eye-tracking reveals about analogy-making strategies in children and adults* Proceedings of the thirty-third Annual Meeting of the Cognitive Science Society, (pp. 1–6).
- Thibaut, J. P., French, R., Vezneva, M., Gérard, Y., & Glady, Y. (2011). Semantic analogies by young children: Testing the role of inhibition. In B. Kokinov, A. Karmiloff-Smith, & N. J. Nersessian (Eds.), *European Perspectives on Cognitive Science*. New Bulgarian University Press.
- Thompson, R. K. R., Oden, D. L., & Boysen, S. T. (1997). Language-naïve chimpanzees (Pan troglodytes) judge relations between relations in a conceptual matching-to-sample task. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 23, 31–43.
- Towse, J. N., Lewis, C., & Knowles, M. (2007). When knowledge is not enough: The phenomenon of goal neglect in preschool children. *Journal Of Experimental Child Psychology*, 96(4), 320–332.
- Truppa, V., Piano Mortari, E., Garofoli, D., Privitera, S., & Visalberghi, E. (2011). Same/different concept learning by capuchin monkeys in matching-to-sample tasks. *PLoS ONE*, 6(8), e23809.
- Viskontas, I. V., Morrison, R. G., Holyoak, K. J., Hummel, J. E., & Knowlton, B. J. (2004). Relational integration, inhibition, and analogical reasoning in older adults. *Psychology and Aging*, 19(4), 581–591. <http://dx.doi.org/10.1037/0882-7974.19.4.581>
- Washburn, D. A. (1994). Stroop-like effects for monkeys and humans: Processing speed or strength of association? *Psychological Science*, 5(6), 375–379.
- Weed, M. R., Bryant, R., & Perry, S. (2008). Cognitive development in macaques: Attentional set-shifting in juvenile and adult rhesus monkeys. *Neuroscience*, 157, 22–28.
- Yerys, B. E., & Munakata, Y. (2006). When labels hurt but novelty helps: Children's perseveration and flexibility in a card-sorting task. *Child Development*, 77, 1589–1607.
- Zelazo, P. D., Craik, F. I. M., & Booth, L. (2004). Executive function across the life span. *Acta Psychologica*, 115, 167–183.

Annexe 2

« Patterns of Hemispheric Specialization for a
Communicative Gesture in Different Primate Species »

Meunier, et al., 2013

Cet article s'intéresse à l'évolution de la latéralité manuelle au sein de l'ordre des primates. Il compare les résultats de 4 études conduites chez différentes espèces de primates, y compris l'homme, qui mesurent leur latéralité manuelle pour des tâches manipulation et de communication gestuelle.

Hélène Meunier¹
 Jacqueline Fagard²
 Anaïs Maugard³
 Margarita Briseño⁴
 Jonas Fizet¹
 Charlotte Canteloup¹
 Charlotte Defolie¹
 Jacques Vauclair⁵

¹Primate Centre of Strasbourg
 University, Fort Foch, 67207
 Niederhausbergen, France
 E-mail: meunier.h@gmail.com

²Laboratoire Psychologie de la Perception
 Université Paris Descartes, CNRS UMR
 8158, 45 rue des Sts Pères, 75006 Paris
 France

³Laboratory of Cognitive Psychology, Aix-
 Marseille University, 3 Place Victor Hugo,
 13331, Marseille Cedex 1, France

⁴Instituto de Biología Universidad
 Nacional Autónoma de México, Mexico
 City, Mexico

⁵Centre for Research on the Psychology of
 Cognition, Language and Emotion, Aix-
 Marseille University, 29 avenue Robert
 Schuman, 13621 Aix-en-Provence Cedex
 1, France

Patterns of Hemispheric Specialization for a Communicative Gesture in Different Primate Species

ABSTRACT: We review four studies investigating hand preferences for grasping versus pointing to objects at several spatial positions in human infants and three species of nonhuman primates using the same experimental setup. We expected that human infants and nonhuman primates present a comparable difference in their pattern of laterality according to tasks. We tested 6 capuchins, 6 macaques, 12 baboons, and 10 human infants. Those studies are the first of their kind to examine both human infants and nonhuman primate species with the same communicative task. Our results show remarkable convergence in the distribution of hand biases of human infants, baboons and macaques on the two kinds of tasks and an interesting divergence between capuchins' and other species' hand preferences in the pointing task. They support the hypothesis that left-lateralized language may be derived from a gestural communication system that was present in the common ancestor of macaques, baboons and humans. © 2013 Wiley Periodicals, Inc. *Dev Psychobiol* 55: 662–671, 2013.

Keywords: communicative gestures; handedness; hemispheric specialization; human infants; language origins; olive baboons; grasping; pointing; Tonkean macaques; tufted capuchins

INTRODUCTION

Our language is one of the most obvious expressions of hemispheric specialization and has often been linked to the fact that 90% of humans are right-handed for many actions (Annett, 1985). Nevertheless, the possible relationship between the emergence of these two asymmetries opened many discussions and is still largely debated (Corballis, 2003, 2009). Are we predominantly right-handed because of our left-hemisphere specialization for language? Is our left-hemisphere specialized for language because we are right-

handed? Or did manual and language lateralization evolve independently?

In nonhuman primates, hemispheric specialization for manual actions is less evident than for humans. Left-handers and right-handers are generally equally represented in their population regarding simple reaching tasks, whereas biases at the population-level can appear in more complex tasks such as for bimanual coordinated tasks (Hopkins, 1995, see also Chapelain & Hogervorst, 2009 for a review) and even more consistently regarding communicative gestures (chimpanzees: Hopkins & Cantero, 2003; Hopkins & Wesley, 2002; olive baboons: Meguerditchian & Vauclair, 2006). One can thus assume that the study of hand preferences for communicative gestures (vs. noncommunicative gestures such as grasping) constitutes a highly relevant approach to considering language origin and lateralization (Meguerditchian & Vauclair, 2009; Vauclair, 2004) as already suggested by Kimura (1993). This view is supported by the existence of strong links between speech and gestures in humans

Manuscript Received: 19 December 2012

Manuscript Accepted: 18 June 2013

Correspondence to: Hélène Meunier

Contract grant sponsor: French National Research Agency (ANR)

Contract grant number: ANR-08-BLAN-0011_01

Article first published online in Wiley Online Library
 (wileyonlinelibrary.com): 12 July 2013

DOI 10.1002/dev.21151 • © 2013 Wiley Periodicals, Inc.

(Goldin-Meadow & McNeill, 1999). It has been shown, for example, that we predominantly use our right hand for manual movements when we are talking (Kimura, 1973) and that the degree of right-hand asymmetry for manual communication (e.g., pointing) increases during the development of speech in young children (e.g., Blake, O'Rourke, & Borzellino, 1994; Vauclair & Imbault, 2009). The facts (1) that nonhuman primates' gestures (e.g., pointing in the chimpanzee), as human infants' pointing gesture, convey intentional, and relational content (Leavens, Hopkins, & Thomas, 2004), and (2) that great apes (Hopkins & Leavens, 1998), monkeys (Meguerditchian & Vauclair, 2009), as well as human infants (Esseily, Jacquet, & Fagard, 2011; Vauclair & Imbault, 2009) show preferential use of the right hand when pointing, indicate that nonhuman primates and humans who have not yet acquired language are ideal models to investigate some precursors of speech.

However, systematic and comprehensive studies comparing handedness in communicative gestures and in noncommunicative manual actions (e.g., grasping) are still scarce and many methodological problems appear when comparing findings on hand preferences between humans and nonhuman primates (Uomini, 2009). Even between studies on a same species, postural (subject's posture, e.g., MacNeilage, Studdert-Kennedy, & Lindblom, 1987) and situational (object position, see Lehman, 1993 for a review) factors as well as task complexity (Fagot & Vauclair, 1991) or type of data (observational vs. experimental, e.g., Hopkins et al., 2012) have been often neglected despite of their crucial influence on hand preferences. We thus crucially lack comparable methods based on observations while subjects (human and/or nonhuman) perform the same manual tasks (see McGrew & Marchant, 1997 for a review). A consistency in data analyses could also help to compare reliably studies and species, especially humans with nonhumans (Hopkins et al., 2012; Hopkins, Gardner, Mingle, Reamer, & Schapiro, 2013). Our study aims to overcome this deficit by testing human infants and nonhuman primates using a similar experimental setup and the same statistical analyses. For that purpose, we used a test initially designed to quantify hand preference in humans (the QHP task) by Bishop, Ross, Daniels, and Bright (1996). These authors were the first to propose a standard method for quantifying laterality in humans using a behavioral measure to ensure uniformity in a field where data consistency is a major problem. This task requires subjects to reach objects that are placed on varying spatial positions on a half-circle in front of them (see Bishop et al., 1996 for details). The idea is to assess the flexibility of hand preferences by determining where in the preferred hand's contralateral space the subject shifts to using his/her nonpreferred ipsilateral hand. The stronger a subject

preference for his/her right hand, the further in the contralateral space from his/her body midline he/she is likely to switch to using his/her left hand and vice versa. We adapted this task in such a way that it could be used to investigate both human infants and nonhuman primates. Moreover, our adaptation of the QHP task included the design of two experiments to compare both hand preferences while subjects grasped an object and hand preferences while subjects displayed a communicative gesture (see also Bourjade, Meunier, Blois-Heulin, & Vauclair, 2013). One can remark that nonhuman primates do usually not point spontaneously for each other (but see in apes Inoue-Nakamura & Matsuzawa, 1997 and Veà & Sabater-Pi, 1998) and that pointing is a gesture more specific for nonhuman primate-human interactions (e.g., Call & Tomasello, 1994; Leavens & Hopkins, 1998; Mitchell & Anderson, 1997). However, this pointing can emerge spontaneously, without any explicit training (Call & Tomasello, 1994) or can be learnt by monkeys (e.g., Hattori, Kuroshima, & Fujita, 2007; Meunier, Fizet, & Vauclair, 2013; Meunier, Prieur, & Vauclair, 2013) without losing its communicative function.

Thus, our experimental paradigm allowed us to assess hand preferences in several species both in a communication task and a simple (manipulative) grasping task, while controlling spatial and postural factors, two factors considered to affect hand preferences (Bishop et al., 1996; Calvert & Bishop, 1998; Leconte & Fagard, 2004). Even though these positional factors may have a crucial influence on hand preferences, they have almost never been quantified in nonhuman primates (but see Bourjade et al., 2013; Chapelain et al., 2012; Meunier, Blois-Heulin, & Vauclair, 2011). The present report grouped results issued from several studies taking into consideration all of these critical methodological points. The same experimental setup was proposed to four species (human infants: Jacquet, Esseily, Rider, & Fagard, 2012; baboons: Meunier, Vauclair, & Fagard, 2012; macaques: Meunier, Fizet, et al., 2013; capuchins: Meunier, unpublished data). Those studies are the first ones quantifying the effect of situational factors in both a grasping task and a communicative task and in both human and nonhuman primates.

The aims of our study was (1) to look for possible convergences and divergences in hand use between a motor action and a communicative gesture, (2) to look for possible convergences and divergences between different species of nonhuman primates and human infants with respect to the laterality of their motor actions and gestural communication. We expected that human infants and nonhuman primates would present a comparable difference in the pattern of laterality according to the task: all the tested species should be

more right-hand/left-hemisphere specialized when communicating by pointing than when simply grasping objects. We also predicted that the position of laterally presented objects would influence hand choice for pointing to a lesser extent than for object grasping.

METHODS

This experiment included only behavioral investigations, routine training, and noninvasive contact with both the infants and the nonhuman primates. The infant experiment was conducted in accordance with the ethical standards specified in the 1964 declaration of Helsinki, and written formal parental consent was granted before observation. Our institutional review boards approved this study for both infants and nonhuman primates (authorization numbers for experimentation on baboons: C 13-087.7, on macaques and capuchins: B 67-273). All the experiments were carried out in accordance with the Principles of Laboratory Animal Care, and with the CNRS guidelines on animal care.

Subjects

The subjects were 12 captive Olive baboons (*Papio anubis*) including 2 adult females, 9 adult males, and 1 subadult male. All the subjects lived in social groups, and were housed at the Rousset Center of Primatology, France, either in parks or large cages, both with free access to an indoor shelter in which water was available ad libitum. All groups were fed with monkey chows, fodder seeds and fresh vegetables several times a day. Individuals participated spontaneously in the experiments, so our subjects are mainly dominant individuals from each group.

Six captive Tonkean macaques (*Macaca tonkeana*) and six captive tufted capuchins (*Cebus apella*) were also tested at the Primatology Center of Strasbourg University, France. Macaques included three adult males, one adult female and two subadult males. All the subjects lived in the same social group of 22 individuals and were housed in a one-acre wooded area. Capuchins included two adult males, three adult females, and one subadult male, all living in the same social group of 12 individuals. They were housed in a multi-cage complex of 94 m², with indoor and outdoor enclosures. Both species had free access to an indoor shelter in which monkey chows and water were available ad libitum and were fed with commercial primate pellets twice a day, fresh fruits and vegetables once a day, and seeds three times a week.

Finally, we tested 10 infants, including three girls and seven boys, on three occasions, that is, at 14, 17, and 20 months of age. This age range was chosen because it has been shown that infants start to point around the end of the first year (Liszkowski, Carpenter, Henning, Striano, & Tomasello, 2004) and that about two-thirds of infants point at 14 months (Murphy, 1978). We stopped at 20 months since we did not want to test pointing gestures accompanying language and since many infants undergo a language spurt at the end of the second year (Goldfield & Reznick, 1990).

Training

For the nonhuman primates, a training phase was necessary until each subject was able to point at one baited container with its whole hand. Initially, a reachable raisin was presented to the subject on the experimental table so that the subject was able to grasp it. Next, the raisin was progressively moved further away up to an ambiguous distance (the raisin was almost reachable) so that when the subject attempted to grasp the raisin, the experimenter gave it directly to the animal. Finally, the raisin was placed at 70 cm from the subject, that is, beyond the subject's reach. Training was terminated when the subject was able to point at the out-of-reach raisin with one hand (left or right) and without trying to grasp it.

Previous Experience of the Subjects

Four of our adult males baboons had already participated in experiments in which they were trained to point toward unreachable food using the same methodology (see Meguerditchian & Vauclair, 2009) as the one described above. Capuchins and macaques had previously participated to others studies in relation to the investigation of their cognitive skills. Human infants were previously tested at 8 months old for grasping and at 11 months old for both grasping and pointing but the number of pointing collected were not sufficient for analyzing hand preferences.

Experimental Procedure

For the grasping task, an attractive item (a toy for infants and a raisin for nonhuman primates) was placed in a randomized order at one of five positions, each separated from the adjacent position(s) by 30° on a half-circle, at a distance reachable by each subject's hand (Fig. 1, see also Meunier et al., 2011). For the pointing task with infants, we presented puppets through holes made in a white sheet lining the wall facing the infant, with an angle of 20° between adjacent holes. Infants were seated at a distance of 2 m from the screen, between a parent and an observer who encouraged them to indicate the puppet when they did not point spontaneously. For pointing in nonhuman primates, an opaque container in which raisins were hidden was placed at each of the five positions. Only one of the five containers was baited at a time. Two experimenters performed the task. The first experimenter hid the raisin in one of the five containers, in the view of the subject. The second experimenter was present, but could not see where the raisin was hidden. Then the second experimenter faced the subject, who then had to point toward the correct container so the experimenter would retrieve the raisin for the animal. Two experimenters were used for the nonhuman primates in order to avoid any ambiguity concerning the production and the interpretation of the gesture performed by the monkey, given that Experimenter 2 had no knowledge of the baited position and had to rely solely on the cues provided by the animal. Above all, the use of two experimenters allowed us to impose a delay in the production of the pointing gesture, and consequently it facilitated discrimination between a response that could be considered as a "frustrated reaching response" from an

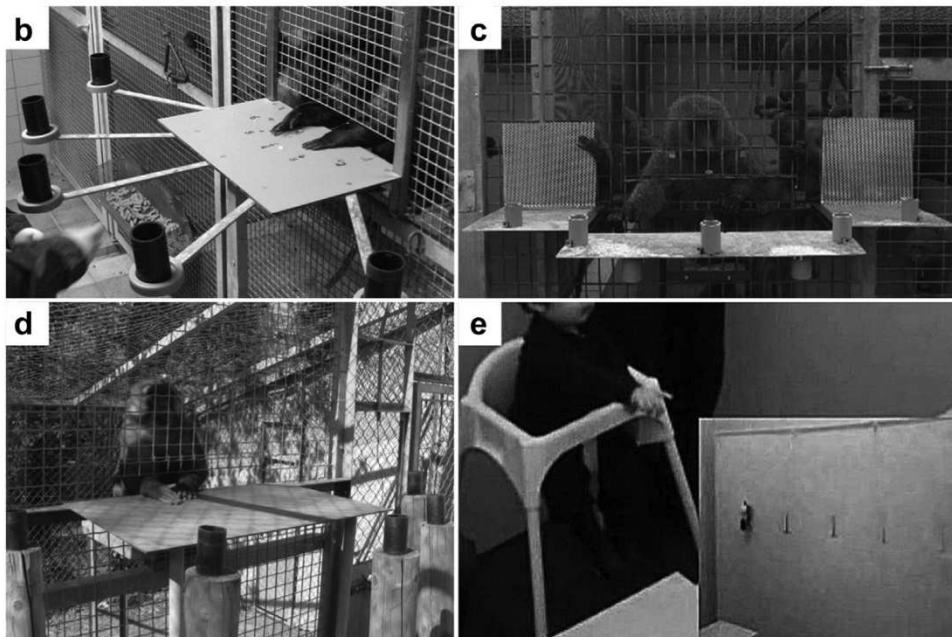
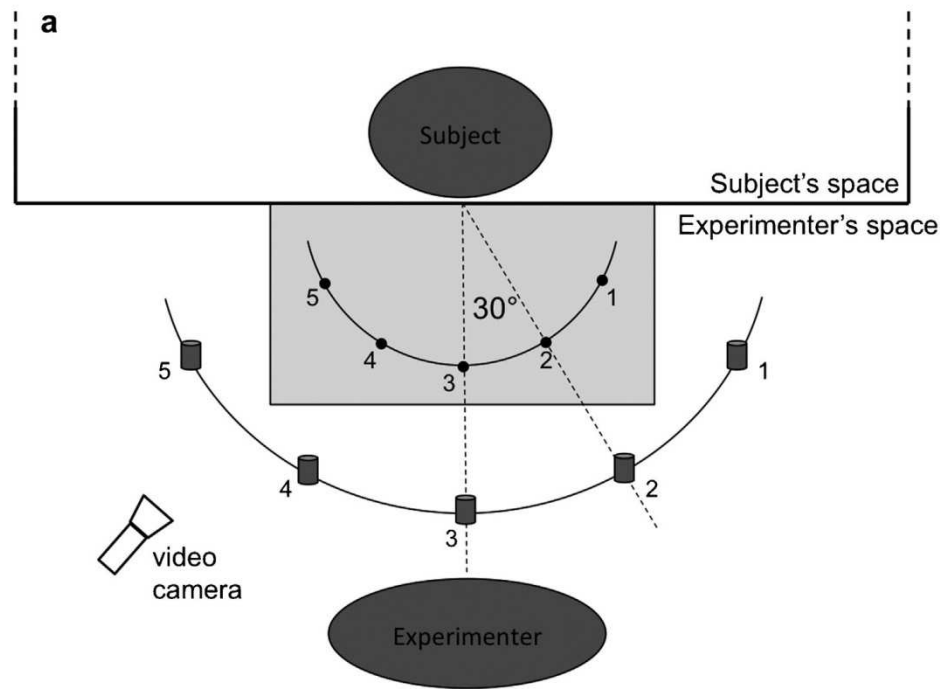


FIGURE 1 Schema of the experimental setup (**a**). Points on the smaller semicircle represent the five positions used for the simple reaching task and points on the larger semicircle represent the five positions used for the communicative task. Pictures of the pointing task setup for capuchins (**b**), baboons (**c**), macaques (**d**), and human infants (**e**).

intentional communicative gesture. If the subject pointed to the correct container, it was rewarded with the food placed under the container. In the rare cases when the subject pointed to another container, the food was removed, the trial was cancelled, and a new trial started. We noted the hand used for

grasping and pointing in both infants and nonhuman primates. We recorded five trials per position and per subject for grasping and three trials per position and per subject for pointing. We then compared hand-biases for each species and task.

Data Analysis

We calculated an individual handedness index (HI) for each individual and each position using the formula $(R - L) / (R + L) = (\text{Number of Right Hand} - \text{Left Hand choices}) / (\text{Number of Right Hand} + \text{Left Hand choices})$. This index ranges from -1.0 to 1.0 and estimates the strength of hand preference along a continuum, with negative values indicating a left-hand preference and positive values indicating a right-hand bias.

We performed an ANOVA calculated on the handedness index HI as a function of species, with position ($\times 5$) and task ($\times 2$) as repeated measures.

Results were considered to be significant when p was less than .05.

RESULTS

Our data reveal a main effect of task ($F(1,30) = 18.07$, $p < .001$), a main effect of position ($F(4,120) = 67.25$, $p < .001$), a task \times position interaction ($F(4,120) = 27.34$, $p < .00001$), a position \times species interaction ($F(12,120) = 6.95$, $p < .00001$), and a task \times position \times species interaction ($F(12,120) = 3.08$, $p < .001$) but no task \times species interaction ($p = .99$) (Fig. 2). There was also no species effect ($p = .39$). A LSD post hoc test on the task \times position \times species interaction indicates that in human infants the HI differed between the two tasks on position 1 and 2 (left targets), but not on the other positions. For the baboons and the macaques, the HI differed between the two tasks on position 1, 2, and 3, but not on the right positions. For the capuchins the HI differed between the two tasks independently of the position.

Interestingly, if one removes the capuchins data, the task \times position \times species interaction disappears ($p = .14$) whereas all other effects remain. Removing another species from the analysis did not change the results.

When grasping, hand preferences of all the species were shown to depend on item's position. Subjects reached for spatial positions located to the left (positions 1 and 2) predominantly with their left hand, and positions situated to the right of their body's midline (positions 4 and 5) predominantly with their right hand. In the pointing task, the position of the object to point is still influent but elicited a rather different pattern of bias. Hand preferences for the communicative task significantly favored the use of the right hand in human infants, baboons and macaques. Capuchins' hand preferences differed from those of human infants, baboons and macaques. As human infants, baboons and macaques, capuchins are affected by positional factors and this effect is dependent on the task, but, contrary to the other tested species, capuchins mainly produced manu-

al gestures directed toward laterally placed raisins by using the contralateral hand.

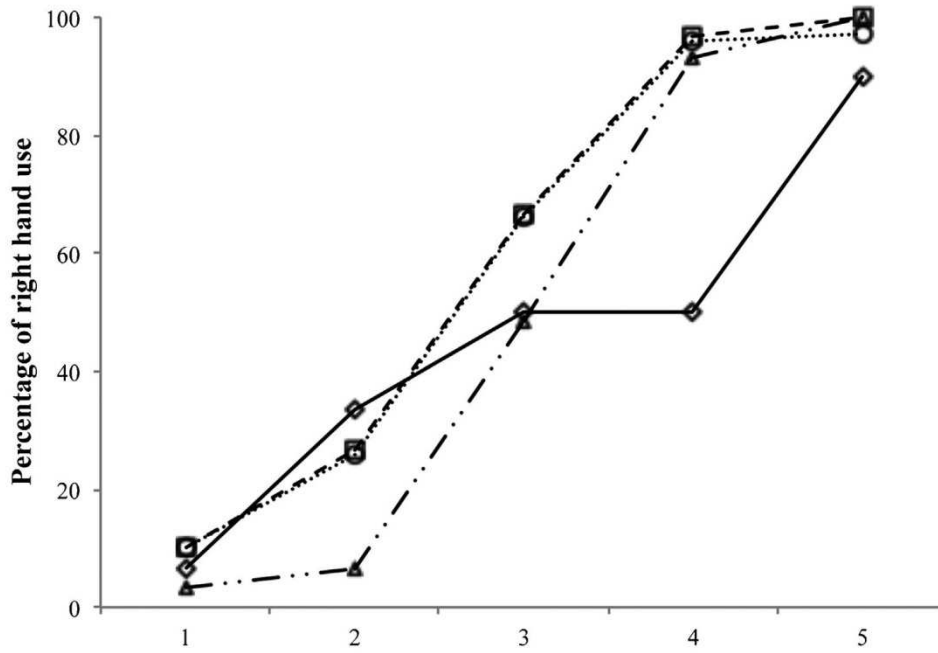
DISCUSSION

Those studies highlighted several original results. Using a same setup for several species including both human and nonhuman primates, they quantified the effect of the position of items to grasp or point to on handedness expression for each species, and confirmed the crucial effect of the nature of the task. Moreover, results show a remarkable convergence in the distribution of the human infants, baboons and macaques hand biases on the two kinds of tasks and an interesting divergence between capuchins' and other species' hand preferences in the pointing task. More particularly, our results highlighted an important positional effect, an important task effect and an interaction between the position and the task, meaning that position of the object did not influence handedness in the same way according to task's nature, that is, communicative or not.

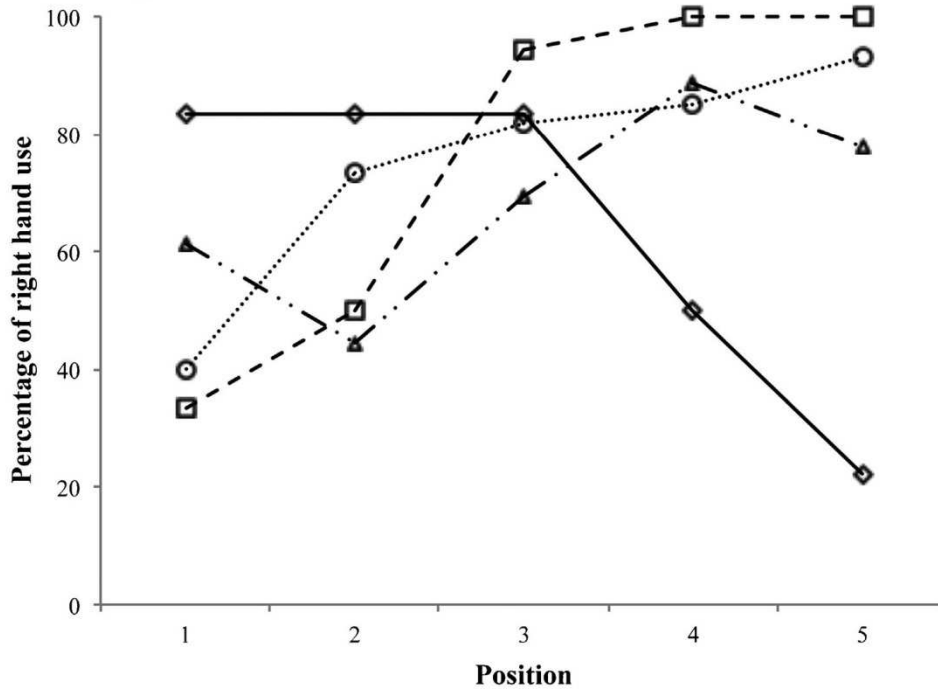
Positional Effects, Task Nature, and Hand Preferences

When grasping, hand preferences of all the species were shown to depend on item's position, which is in accordance with several studies in monkeys, apes, and humans (Bourjade et al., 2013; Carlson & Harris, 1985; Chapelain et al., 2012; Cronholm, Grodsky, & Behar, 1963; Doyen, Dufour, Caroff, Cherfouh, & Carlier, 2008; Fagard, 1998; Lehman, 1980; Meunier et al., 2011), agreeing that reaching is strongly influenced by situational factors. In other words, humans (infants, children, and adults, e.g., Calvert & Bishop, 1998; Leconte & Fagard, 2006), as well as nonhuman primates, strongly prefer to use the hand that is closest to the item to be reached for in a simple reaching task. By contrast, concerning the pointing task, the position of the object to point elicited a rather different pattern of bias. Human infants, baboons and macaques significantly favored the use of the right hand for the communicative task (Esseily et al., 2011; Meunier et al., 2012, Meunier, Fizet, et al., 2013). The fact that these three species follow the same pattern is even more noteworthy that children and monkeys may have used pointing for different functions. Indeed, in spite of our effort of standardization, the type of pointing (declarative vs. imperative) was not controlled in our experiment. The human infants needed to point to inform the experimenter whenever a puppet appeared, while the monkeys pointed to request the food from the experimenter. However, both children

a Grasping task



b Pointing task



···○··· Human Infants -▲- Baboons -□- Macaques -◇- Capuchins

FIGURE 2 Percentage of right hand use for each position and each species in the grasping task (a) and in the pointing task (b).

and monkeys were not able to obtain the toys/food by themselves, and thus needed to communicate its location to the experimenter. Capuchins behave differently by mainly producing manual gestures directed toward laterally placed raisins by using the contralateral hand (see Fig. 2). Although in contradiction with our other tested species and also with chimpanzees (Hopkins & Wesley, 2002), this kind of hand preference's pattern had already been described in galagos (Ward, Milliken, & Stafford, 1993), mangabeys and guenons (Maille, Chapelain, Déruiti, Bec, & Blois-Heulin, 2013), while pointing or grasping to objects placed at far distances. We suggest that this difference of behavior could be due to differences between species in terms of ecological habits and more particularly to the fact that capuchins, galagos, and guenons are arboreal, mangabeys are both arboreal and terrestrial, whereas Tonkean macaques, olive baboons, chimpanzees, and human infants are terrestrial (Schmitt, 2010). Arboreal locomotion should confer easier and higher amplitude in shoulders and arms movements, allowing them to use more easily their contralateral arm/hand in communicative gestures. Another explanation could be that capuchins did not understand that pointing gestures influence the internal mental state of the recipient, that is, they did not point to distal objects but exhibited a kind of "extending reach" for unreachable food, as suggested also for great apes' pointing (e.g., Povinelli & Davis, 1994). However, (i) our results highlighted that the nature of the task induced changes in capuchins hand use and (ii) intentional aspects of capuchins' pointing have been highlighted, that is, they flexibly used pointing to adapt to the attentional state of their human partner (Defolie, Malassis, Serre, & Meunier, in preparation; Mitchell & Anderson, 1997). Both arguments suggest that capuchins produced their pointing gesture as an intentional communication and not as an "extending reach."

Our results confirm the interest of using a standardized protocol, the crucial impact of positional factors but also the critical role of task's nature and thus the importance of considering simultaneously those factors to investigate hand preference and to make reliable comparison between both tasks and species.

Hand Preferences in a Communicative Gesture—Implication for Theories of Language Origins

Human infants, olive baboons, and Tonkean macaques are more right-handed when communicating than when grasping (Esseily et al., 2011; Meunier et al., 2012, Meunier, Fizet, et al., 2013), which leads us to postulate that the left hemisphere plays a specific role in controlling communicative gestures such as pointing.

This greater right hand preference for communicative gestures compared with object manipulation concurs with previous reports concerning pointing gestures, symbolic gestures, and ASL signs in human infants and toddlers (Bates, O'Connell, Vaid, Sledge, & Oakes, 1986; Bonvillian, Richards, & Dooley, 1997; Vauclair & Imbault, 2009) but also with reports concerning gestural communication in nonhuman primates (Hopkins et al., 2005; Meguerditchian, Vauclair, & Hopkins, 2010). Moreover, chimpanzees' right-handedness for food-begging gestures (Tagliatalata, Cantalupo, & Hopkins, 2006) and for clapping, that is, a communicative signal (Meguerditchian, Gardner, Schapiro, & Hopkins, 2012) is associated with morphological left asymmetries in the homologue of Broca's area (inferior frontal gyrus). Taken together, these findings support the hypothesis that left lateralization for language may be derived from a gestural communication system that was present in the common ancestor of macaques, baboons, chimpanzees, and humans.

In conclusion, despite of the low number of subjects for each species, all the reviewed studies converge and provide additional evidence toward the need of using standardized tasks to investigate hand preference and compare efficiently and reliably findings within and between species. Human infants, baboons, macaques, and capuchins were indeed tested successfully, independently of their differences in terms of size, morphology, and main habitat. By controlling both the subjects' posture and the position of the item they had to reach for or point to, we provided findings that corroborate the notion that both the position of the object and the nature of the task, that is, communicative or not, crucially influence hand preference patterns.

NOTES

This research was supported by a French National Research Agency (ANR) grant, reference ANR-08-BLAN-0011_01. The authors are grateful to Nicolas Herrenschildt for permission to conduct the study on macaques and capuchins at the Primate Centre of Strasbourg University, France, and to Guy Dubreuil for permission to conduct the study on baboons at the CNRS Field Station of Rousset, France. The authors also sincerely thank Anne-Yvonne Jacquet, Rana Esseily, and Delphine Rider for data collection on infants; to Ameline Bardo, Elsa Batôt, Nadège Lechevrel, and Pauline Le Sommer for helping in data collection on baboons; to Laurence Bôes for helping in data collection in macaques and to Marion Serre and Raphaëlle Malassis for helping in data collection in capuchins. Thanks are extended to Jean-Marc Woock, Adrien Panter, Steve Lapp, Jo Di Grandi, Sebastien Guiol, David Pericat, and Yannick Autier for their logistical aid, and all the caretakers, from both the Primate Centre of Strasbourg University and the CNRS

Field Station of Rousset, for their helpful assistance throughout the study. Lastly, authors thank Thomas Arciszewski for statistical advices.

REFERENCES

- Annett, M. (1985). *Left, right, hand and brain: The right shift theory*. London, UK: Lawrence Erlbaum.
- Bates, E., O'Connell, B., Vaid, J., Sledge, P., & Oakes, L. (1986). Language and hand preference in early development. *Developmental Neuropsychology*, 2, 1–15.
- Bishop, D. V. M., Ross, V. A., Daniels, M. S., & Bright, P. (1996). The measurement of hand preference: A validation study comparing three groups. *British Journal of Psychology*, 87, 269–285.
- Blake, J., O'Rourke, P., & Borzellino, G. (1994). Form and function in the development of pointing and reaching gestures. *Infant Behavior and Development*, 17, 195–203.
- Bonvillian, J. D., Richards, H. C., & Dooley, T. T. (1997). Early sign language acquisition and the development of hand preference in young children. *Brain & Language*, 58, 1–22.
- Bourjade, M., Meunier, H., Blois-Heulin, C., & Vauclair, J. (2013). Baboons' hand preference resists to spatial factors for a communicative gesture but not for a simple manipulative action. *Developmental Psychobiology* (this issue).
- Call, J., & Tomasello, M. (1994). Production and comprehension of referential pointing by orangutans (*Pongo pygmaeus*). *Journal of Comparative Psychology*, 108, 307–317.
- Calvert, G. A., & Bishop, D. V. M. (1998). Quantifying hand preference using a behavioural continuum. *Laterality*, 3, 255–268.
- Carlson, D. F., & Harris, L. J. (1985). Development of the infant's hand preference for visually directed reaching: Preliminary report of a longitudinal study. *Infant Mental Health Journal*, 6, 158–174.
- Chapelain, A., & Hogervorst, E. (2009). Hand preferences for bimanual coordination in 29 bonobos (*Pan paniscus*). *Behavioural Brain Research*, 196, 15–29.
- Chapelain, A., Laurence, A., Vimond, M., Maille, A., Meunier, H., Fagard, J., ... Blois-Heulin, C. (2012). Hand preference and its flexibility according to the position of the object: A study in cercopithecines examining spontaneous behaviour and an experimental task (the Bishop QHP task). *Animal Cognition*, 15, 937–953.
- Corballis, M. C. (2003). From mouth to hand: Gesture, speech, and the evolution of right handedness. *Behavioral Brain Sciences*, 26, 199–260.
- Corballis, M. C. (2009). The evolution and genetics of cerebral asymmetry. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 364, 867–879.
- Cronholm, J. M., Grodsky, M., & Behar, I. (1963). Situational factors in the lateral preference in rhesus monkeys. *Journal of Genetic Psychology*, 103, 167–174.
- Defolie, C., Malassis, R., Serre, M., & Meunier, H. Brown tufted capuchins (*Cebus apella*) adapt their communicative behavior in response to human's attentional states (in preparation).
- Doyen, A. L., Dufour, T., Caroff, X., Cherfouh, A., & Carlier, M. (2008). Hand preference and hand performance: Cross-sectional developmental trends and family resemblance in degree of laterality. *Laterality*, 13, 179–197.
- Esseily, R., Jacquet, A.-Y., & Fagard, J. (2011). Handedness for grasping objects and pointing and the development of language in 14-month-old infants. *Laterality*, 16, 565–585.
- Fagard, J. (1998). Changes in grasping skills and the emergence of bimanual coordination during the first year of life. In K. J. Connolly (Ed.), *The psychology of the hand* (pp. 123–143). London: Mac Keith Press.
- Fagot, J., & Vauclair, J. (1991). Manual laterality in non-human primates: A distinction between handedness and manual specialization. *Psychological Bulletin*, 109, 76–89.
- Goldfield, B. A., & Reznick, S. J. (1990). Early lexical acquisition: Rate, content, and the vocabulary spurt. *Journal of Child Language*, 17, 171–183.
- Goldin-Meadow, S., & McNeill, D. (1999). The role of gesture and mimetic representation in making language the province of speech. In M. C. Corballis & S. E. G. Lea (Eds.), *The descent of mind* (pp. 155–172). Oxford: Oxford University Press.
- Hattori, Y., Kuroshima, H., & Fujita, K. (2007). I know you are not looking at me: Capuchin monkeys' (*Cebus apella*) sensitivity to human attentional states. *Animal Cognition*, 10, 141–148.
- Hopkins, W. D. (1995). Hand preferences for a coordinated bimanual task in 110 chimpanzees: Cross-sectional analysis. *Journal of Comparative Psychology*, 109, 291–297.
- Hopkins, W. D., & Cantero, M. (2003). From hand to mouth in the evolution of language: The influence of vocal behavior on lateralized hand use in manual gestures by chimpanzees. *Developmental Science*, 6, 55–61.
- Hopkins, W. D., Gardner, M., Mingle, M., Reamer, L., & Schapiro, S. J. (2013). Within- and between-task consistency in hand use as a means of characterizing hand preferences in captive chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology*, doi: 10.1037/a0031071
- Hopkins, W. D., & Leavens, D. A. (1998). Hand use and gestural communication in chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology*, 112, 95–99.
- Hopkins, W. D., Pika, S., Liebal, K., Bania, A., Meguerditchian, A., Gardner, M., & Schapiro, S. J. (2012). Handedness for manual gestures in great apes: A meta-analysis. In S. Pika & K. Liebal (Eds.), *Developments in primate gesture research* (pp. 93–110). Amsterdam/Philadelphia: John Benjamins Publishing Company.
- Hopkins, W. D., Russell, J., Freeman, H., Buehler, N., Reynolds, E., & Schapiro, S. (2005). The distribution and development of handedness for manual gestures in captive chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Psychological Science*, 16, 487–493.

- Hopkins, W. D., & Wesley, M. J. (2002). Gestural communication in chimpanzees (*Pan troglodytes*): The effect of situational factors on gesture type and hand use. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 7, 19–30.
- Inoue-Nakamura, N., & Matsuzawa, T. (1997). Development of stone tool use by wild chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology*, 111, 159–173.
- Jacquet, A.-Y., Esseily, R., Rider, D., & Fagard, J. (2012). Handedness for grasping objects and declarative pointing: A longitudinal study. *Developmental Psychobiology*, 5, 436–446.
- Kimura, D. (1973). Manual activity during speaking: I. Right-handers. *Neuropsychologia*, 11, 45–50.
- Kimura, D. (1993). *Neuromotor mechanisms in human communication*. Oxford: Oxford University Press.
- Leavens, D. A., & Hopkins, W. D. (1998). Intentional communication by chimpanzees: a cross-sectional study of the use of referential gestures. *Developmental psychology*, 34(5), 813–822.
- Leavens, D. A., Hopkins, W. D., & Thomas, R. (2004). Referential communication by chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology*, 118, 48–57.
- Lecointe, P., & Fagard, J. (2004). Influence of object spatial location and task complexity on children's use of their preferred hand depending on their handedness consistency. *Developmental Psychobiology*, 45, 51–58.
- Lecointe, P., & Fagard, J. (2006). Which factors affect hand selection in children's grasping in hemispace? Combined effects of task demand and motor dominance. *Brain and Cognition*, 60, 88–93.
- Lehman, R. A. W. (1980). Distribution and changes in strength of hand preference of cynomolgus monkeys. *Brain, Behavior and Evolution*, 17, 209–217.
- Lehman, R. A. W. (1993). Manual preference in prosimians, monkeys, and apes. In J. P. Ward & W. D. Hopkins (Eds.), *Primate laterality: Current behavioral evidence of primate asymmetries* (pp. 107–124). New York, NY: Springer-Verlag.
- Liszkowski, U., Carpenter, M., Henning, A., Striano, T., & Tomasello, M. (2004). Twelve-month-olds point to share attention and interest. *Developmental Science*, 7, 297–307.
- Maille, A., Chapelain, A., Déruti, L., Bec, P., & Blois-heulin, C. (2013). Manual laterality for pointing gestures compared to grasping actions in guenons and mangabeys. *Animal Behaviour* (in press).
- MacNeilage, P. F., Studdert-Kennedy, M. G., & Lindblom, B. (1987). Primate handedness reconsidered. *Behavioral and Brain Sciences*, 10, 247–303.
- McGrew, W. C., & Marchant, L. F. (1997). On the other hand: Current issues in and meta-analysis of the behavioral laterality of hand function in non-human primates. *American Journal of Physical Anthropology*, 40, 201–232.
- Meguerditchian, A., Gardner, M. J., Schapiro, S. J., & Hopkins, W. D. (2012). The sound of one hand clapping: Handedness and perisylvian neural correlates of a communicative gesture in chimpanzees. *Proceeding of the Royal Society (Biology)*, 279, 1959–1966.
- Meguerditchian, A., & Vauclair, J. (2006). Baboons communicate with their right hand. *Behavioral Brain Research*, 171, 170–174.
- Meguerditchian, A., & Vauclair, J. (2009). Contrast of hand preferences between communicative gestures and non communicative actions in baboons: Implications for the origins of hemispheric specialization for language. *Brain & Language*, 108, 167–174.
- Meguerditchian, A., Vauclair, J., & Hopkins, W. D. (2010). Captive chimpanzees use their right hand to communicate with each other: Implications for the origin of the cerebral substrate for language. *Cortex*, 46, 40–48.
- Meunier, H., Blois-Heulin, C., & Vauclair, J. (2011). A new tool for measuring hand preference in non-human primates: Adaptation of Bishop's Quantifying Hand Preference task for Olive baboons. *Behavioural Brain Research*, 218, 1–7.
- Meunier, H., Fizet, J., & Vauclair, J. (2013). Tonkean macaques communicate with their right hand. *Brain and Language* 126, 181–187.
- Meunier, H., Prieur, J., & Vauclair, J. (2013). Olive baboons communicate intentionally by pointing. *Animal Cognition*, 16, 1–9.
- Meunier, H., Vauclair, J., & Fagard, J. (2012). Human infants and baboons show the same pattern of handedness for a communicative gesture. *PLoS ONE*, 7, e33959.
- Mitchell, R. W., & Anderson, J. R. (1997). Pointing, withholding information, and deception in capuchin monkeys (*Cebus apella*). *Journal of Comparative Psychology*, 111, 351–361.
- Murphy, C. M. (1978). Pointing in context of a shared activity. *Child Development*, 49, 371–380.
- Povinelli, D. J., & Davis, D. R. (1994). Differences between chimpanzees (*Pan troglodytes*) and humans (*Homo sapiens*) in the resting state of the index finger: Implications for pointing. *Journal of Comparative Psychology*, 108, 134–139.
- Schmitt, D. (2010). Primate locomotor evolution: Biomechanical studies of Primate locomotion and their implications for understanding Primate neuroethology. In M. L. Platt & A. A. Ghazanfar (Eds.), *Primate neuroethology* (pp. 31–63). Oxford: Oxford University Press.
- Tagliabue, J. P., Cantalupo, C., & Hopkins, W. D. (2006). Gesture handedness predicts asymmetry in the chimpanzee inferior frontal gyrus. *Neuroreport*, 17, 923–927.
- Uomini, N. T. (2009). The prehistory of handedness: Archaeological data and comparative ethology. *Journal of Human Evolution*, 57, 411–419.

- Vauclair, J. (2004). Lateralization of communicative signals in nonhuman primates and the hypothesis of the gestural origin of language. *Interaction Studies. Social Behaviour and Communication in Biological and Artificial Systems*, 5, 363–384.
- Vauclair, J., & Imbault, J. (2009). Relationships between manual preferences for object manipulation and pointing gestures in infants and toddlers. *Developmental Science*, 12, 1060–1069.
- Veà, J. J., & Sabater-Pi, J. (1998). Spontaneous pointing behaviour in the wild pygmy chimpanzee (*Pan paniscus*). *Folia Primatologica*, 69, 289–290.
- Ward, J. P., Milliken, G., & Stafford, D. (1993). Patterns of lateralized behavior in Prosimians. In J. P. Ward & W. D. Hopkins (Eds.), *Primate laterality: Current behavioral evidence of primate asymmetries* (pp. 43–74). New York, NY: Springer-Verlag.

RESUME

Le raisonnement par analogie est un aspect fondamental de la cognition humaine souvent considéré comme propre à notre espèce. Des travaux récents utilisant des tâches d'appariement relationnel suggèrent que des chimpanzés, des babouins et des capucins sont également capables de comparer des relations exprimées par des paires d'objets. Cependant, des doutes persistent quant aux stratégies cognitives qu'ils emploient pour résoudre ces tâches, et notamment l'implication du raisonnement par analogie. Cette thèse a pour objectif (1) de déterminer ces stratégies chez le babouin, (2) d'appréhender les facteurs permettant leur émergence et (3) plus généralement de caractériser les continuités et discontinuités entre l'homme et les primates non humains dans leur capacité à raisonner par analogie.

Nous avons conduit trois études chez le babouin de Guinée (*Papio papio*) pour aborder ces questions. La première montre que le traitement relationnel chez le babouin implique, comme chez l'homme, à la fois une prise en compte des propriétés des objets et de leurs relations. De plus, cette étude met en évidence l'importance du nombre d'exemplaires illustrant chaque relation dans la prise en compte de ces deux types d'information. La seconde étude montre que les babouins utilisent le raisonnement par analogie pour résoudre une tâche d'appariement relationnel puisqu'ils traitent trois niveaux d'informations ; à savoir (1) les objets, (2) les relations entre objets et (3) des relations entre ces relations. La troisième étude montre leur capacité à traiter des relations multidimensionnelles dans une version plus complexe de la tâche d'appariement relationnel. Les résultats de ces études suggèrent l'existence d'une continuité dans les capacités d'analogie entre l'homme et les primates non humains, au moins concernant les relations perceptives. Dans une perspective évolutive, nous discutons les discontinuités qui s'observent entre les capacités d'analogies chez l'homme et le singe. Enfin, nous tentons de déterminer les éventuels facteurs responsables de ces disparités au sein de l'ordre des primates.

Mots-clés : raisonnement par analogie, babouin, cognition, psychologie comparée

ABSTRACT

Analogical reasoning is a cornerstone aspect of human cognition, often considered to be human specific. Recent experiments using relational matching-to-sample (RMTS) tasks suggest that chimpanzees, baboons and capuchin monkeys can understand and compare the relations expressed between and within pairs of objects. However, the exact strategies used by these species to solve analogy problem remain unclear at this point. We conducted three studies exploring different aspects of analogical reasoning in the Guinea baboons (*Papio papio*). The first study showed that (1), as in human, relational processing in baboons involves the processing of both perceptive and relational information, and that (2) the relative contribution of these two types of processing depends on the number of items illustrating each relation during training. The second study showed that the cognitive strategy developed by baboons in a RMTS task involves analogical reasoning. The third study emphasized the ability of baboons to process multidimensional relations in a more complex version of the RMTS task. Altogether, these findings from suggest that (1) baboons are able to use analogical reasoning, to solve at least tasks involving perceptive relations; (2) relational processing and further analogical reasoning skills depend on their previous experience with the different relations. We shall discuss the potential implications of those findings, and the continuity and discontinuity of analogical reasoning skills found in human and nonhuman primates.

Keywords: analogical reasoning, baboon, cognition, comparative psychology