

Cours 2017-2018:

Origines du langage et singularité de l'espèce humaine

Stanislas Dehaene
Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Cours n°4

**L'apprentissage de grammaires artificielles:
Etudes comportementales**

Fresque de Marietta Ren (mariettaren.com)

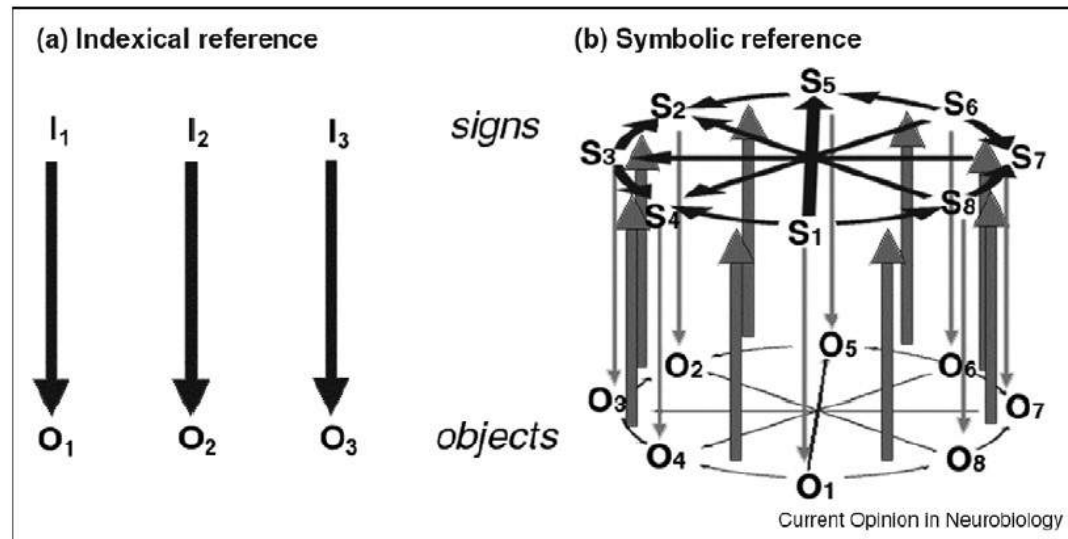


Conclusion: La nature des signes acquis par les animaux

Deacon, T. (1997). *The symbolic species*. New York: Norton.

Nieder, A. (2009). Prefrontal cortex and the evolution of symbolic reference. *Curr Opin Neurobiol*, 19(1), 99–108.

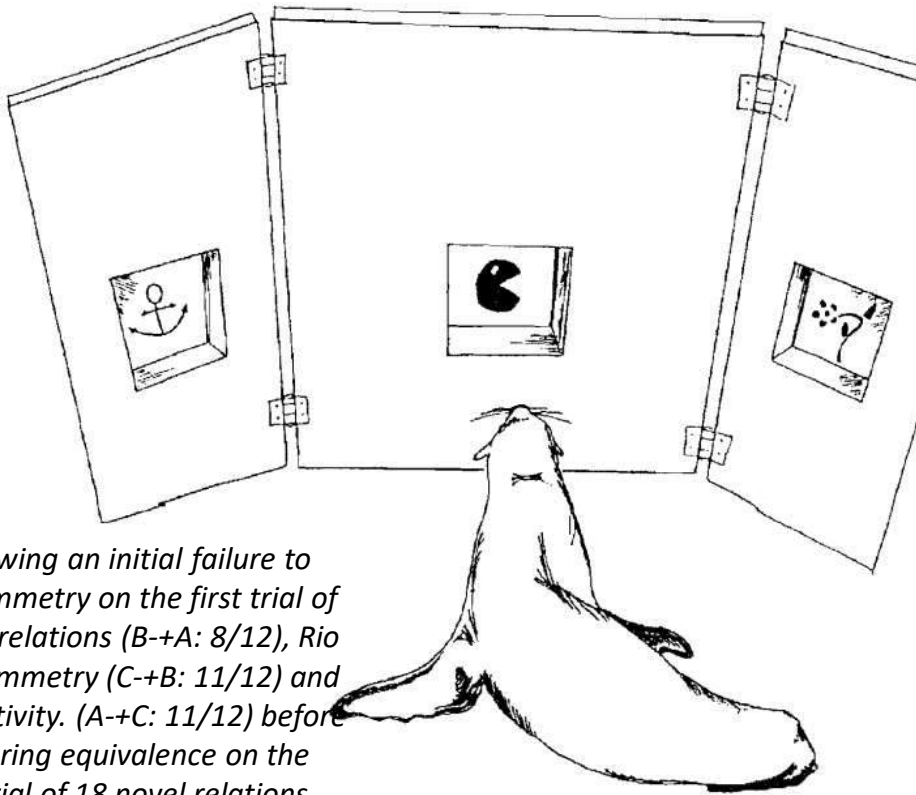
- Même des espèces dépourvues d'apprentissage vocal peuvent apprendre **des dizaines de signes**.
- Ces signes sont bien plus que des « **icônes** » : la relation signifiant-signifié est **arbitraire**.
- **S'agit-il d'indices ou de symboles?**
 - Dans le cas des nombres, au moins, on observe une capacité de comparer les symboles entre eux – mais la combinaison de signes (addition) pose déjà de grandes difficultés.
 - **Non-reversibilité**: Incapacité de faire des aller-retours flexibles entre le signifiant et le signifié
 - La semaine prochaine: Les animaux peuvent-ils apprendre à combiner plusieurs symboles dans une phrase, selon une authentique **syntaxe**?



Des compétences 'symboliques' chez certaines espèces capables d'apprentissage vocal ?

Apprentissage de la réversibilité symbolique
chez une **otarie**?

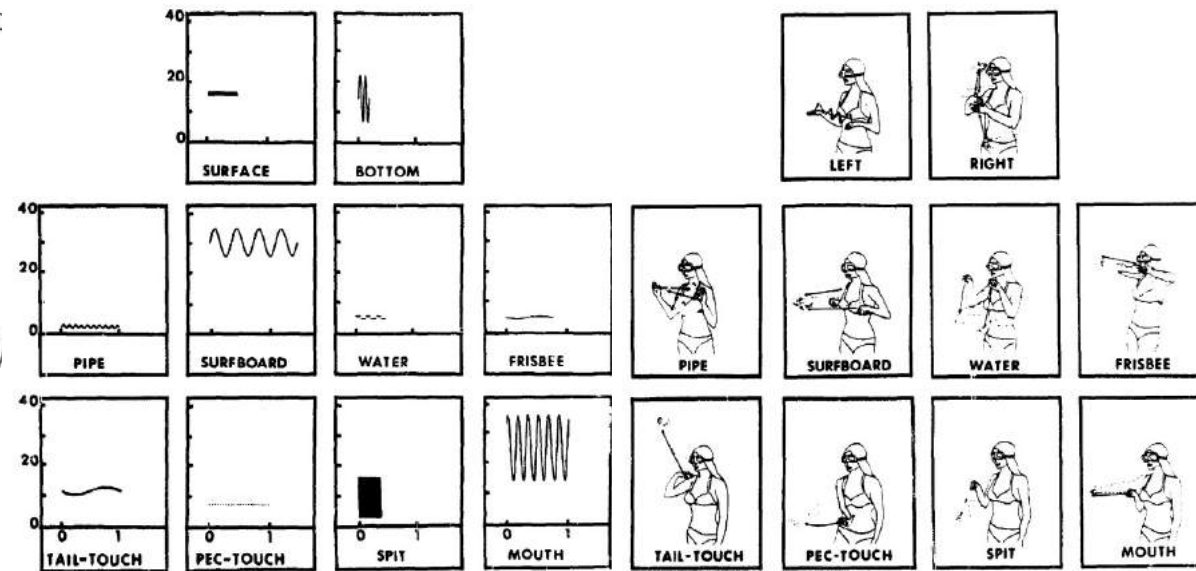
Schusterman & Kastak 1993. *Psychol. Rec.* 43. 823-839



"Following an initial failure to do symmetry on the first trial of novel relations (B→A: 8/12), Rio did symmetry (C→B: 11/12) and transitivity. (A→C: 11/12) before mastering equivalence on the first trial of 18 novel relations (C→A: 16/18)"

Deux **dauphins** auraient appris un langage, l'un fondé sur des sons, l'autre fondé sur des gestes.

Louis Herman, Richards, D. G., & Wolz, J. P. (1984). Comprehension of sentences by bottlenosed dolphins. *Cognition*, 16(2), 129–219.



"Comprehension, at levels far above chance, was shown for all of the sentence forms and sentence meanings that could be generated by the lexicon and the set of syntactic rules, and included the understanding of: (a) lexically novel sentences; (b) structurally novel sentences; (c) semantically reversible sentences that expressed relationships between objects; (d) sentences in which changes in modifier position changed sentence meaning; and (e) conjoined sentences."

Irene Pepperberg et son perroquet Alex

Pepperberg, I. M. (1987). Evidence for conceptual quantitative abilities in the african grey parrot: Labeling of cardinal sets. *Ethology*, 75, 37–61.

Pepperberg, I. M. (2013). Abstract concepts: data from a Grey parrot. *Behavioural Processes*, 93, 82–90. <http://doi.org/10.1016/j.beproc.2012.09.016>

Pepperberg, I. M., & Carey, S. (2012). Grey parrot number acquisition: the inference of cardinal value from ordinal position on the numeral list. *Cognition*, 125(2), 219–232. <http://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.07.003>



Alex

- avait un vocabulaire d'environ 100 mots, dont 50 noms d'objets, 7 couleurs...
- connaissait les noms de nombres jusqu'à six.
- savait les utiliser pour répondre à des questions complexes comme « combien de cubes rouges? »
- A appris les mots « sept » et « huit » comme le fait un enfant, en semblant comprendre l'importance de la « fonction successeur ».

Encore un exemple frappant mais ambigu: Kanzi

Savage-Rumbaugh, E. S., Murphy, J., Sevcik, R. A., Brakke, K. E., Williams, S. L., & Rumbaugh, D. M. (1993). Language comprehension in ape and child. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 58(3-4), 1-222.



Penn, D. C., Holyoak, K. J., & Povinelli, D. J. (2008). Darwin's mistake: explaining the discontinuity between human and nonhuman minds. *Behav Brain Sci*, 31(2), 109-30; discussion 130-178.

“Why not grant syntactic competence to a sibling species?” demandent les auteurs.

Difficultés nombreuses :

- Risque d'effet 'Clever Hans' ? Peut-être pas (masques, miroirs, casques audio...)
- Pas de séparation nette de l'ensemble d'entraînement et de l'ensemble de test
« *Kanzi spent a great deal of time outdoors (...) in the winter he played with toys, painted, helped cook, watched television, visiting people (...) All these activities were accompanied by language in any way that seemed natural to the caretakers.* »
- Tolérance considérable aux erreurs: par ex.
« *[when asked to] put object X in transportable object Y, (...) they were scored correctly if they placed X and Y in any adjacent relation.* »
- Difficultés de réplication
 - Très petit nombre de sujets
 - Entraînés pendant des années
 - Avec lien affectif fort

Les chimpanzés peuvent-ils acquérir une syntaxe? Le projet Nim

Terrace, H. S., Petitto, L. A., Sanders, R. J., & Bever, T. G. (1979). Can an ape create a sentence? *Science (New York, N.Y.)*, 206(4421), 891–902.

Herb Terrace, spécialiste du conditionnement opérant, voulait initialement prouver que Noam Chomsky avait tort et qu'un chimpanzé (Nim), élevé depuis l'âge de 2 semaines comme un enfant humain, pourrait acquérir la langue des signes.

Au bout de 4 ans, Nim maîtrisait 125 signes.

Dans l'article, les auteurs analysent 19,000 productions comprenant au moins 2 signes.

Aucun doute sur la présence d'un **ordre séquentiel**: Les signes sont donnés dans un ordre spécifique (par exemple « more + x » est 7 à 8 fois plus fréquent que « x + more »), et cet ordre ne dérive pas juste d'un simple préférence pour placer certains mots en premier et d'autres en second.

Cependant, les combinaisons de plus de 2 mots ne semblent pas composées selon le même principe que les enfants humains, en enchâssant des syntagmes pour construire un contenu sémantique de plus en plus complexe.

Par exemple, « Manger Nim manger nim », « Boire manger moi Nim », etc...

La phrase la plus longue produite par Nim est « Donner orange moi donner manger orange moi manger orange donner moi toi »

Ces groupes de signes, à la différence des phrases humaines, contiennent un nombre considérable de répétitions.

« L'explication la plus simple est qu'il s'agit de combinaisons non-structurées de signes, dans lesquelles chaque signe est, séparément, adéquat à la situation actuelle. »



Fig. 1. Nim signing the linear combination, me hug cat to his teacher (Susan Quinby). (Photographed in classroom by H. S. Terrace.)

Table 4. Twenty-five most frequent two- and three-sign combinations.

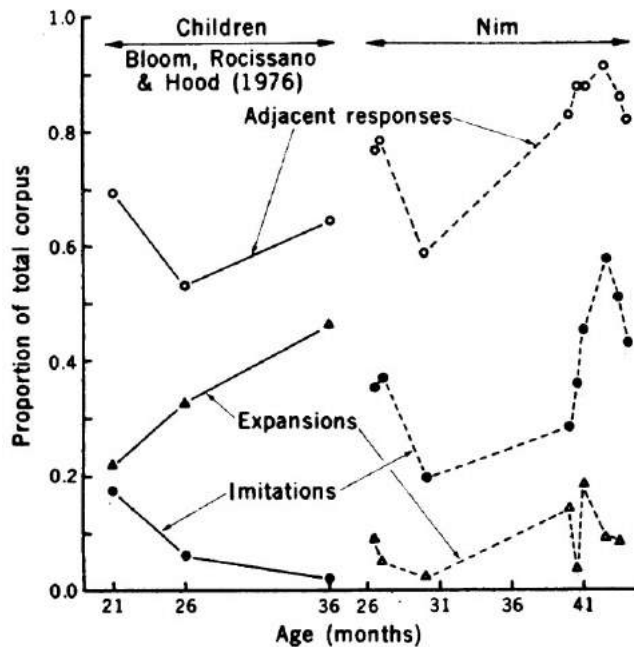
Two-sign combinations		Fre-quency	Three-sign combinations		Fre-quency	
play	me	375	play	me	Nim	81
me	Nim	328	eat	me	Nim	48
tickle	me	316	eat	Nim	eat	46
eat	Nim	302	tickle	me	Nim	44
more	eat	287	grape	eat	Nim	37
me	eat	237	banana	Nim	eat	33
Nim	eat	209	Nim	me	eat	27
finish	hug	187	banana	eat	Nim	26
drink	Nim	143	eat	me	eat	22
more	tickle	136	me	Nim	eat	21
sorry	hug	123	hug	me	Nim	20
tickle	Nim	107	yogurt	Nim	eat	20
hug	Nim	106	me	more	eat	19
more	drink	99	more	eat	Nim	19
eat	drink	98	finish	hug	Nim	18
banana	me	97	banana	me	eat	17
Nim	me	89	Nim	eat	Nim	17
sweet	Nim	85	tickle	me	tickle	17
me	play	81	apple	me	eat	15
gun	eat	79	eat	Nim	me	15
tea	drink	77	give	me	eat	15
grape	eat	74	nut	Nim	nut	15
hug	me	74	drink	me	Nim	14
banana	Nim	73	hug	me	hug	14
in	pants	70	sweet	Nim	sweet	14

Les chimpanzés peuvent-ils acquérir une syntaxe? Le projet Nim

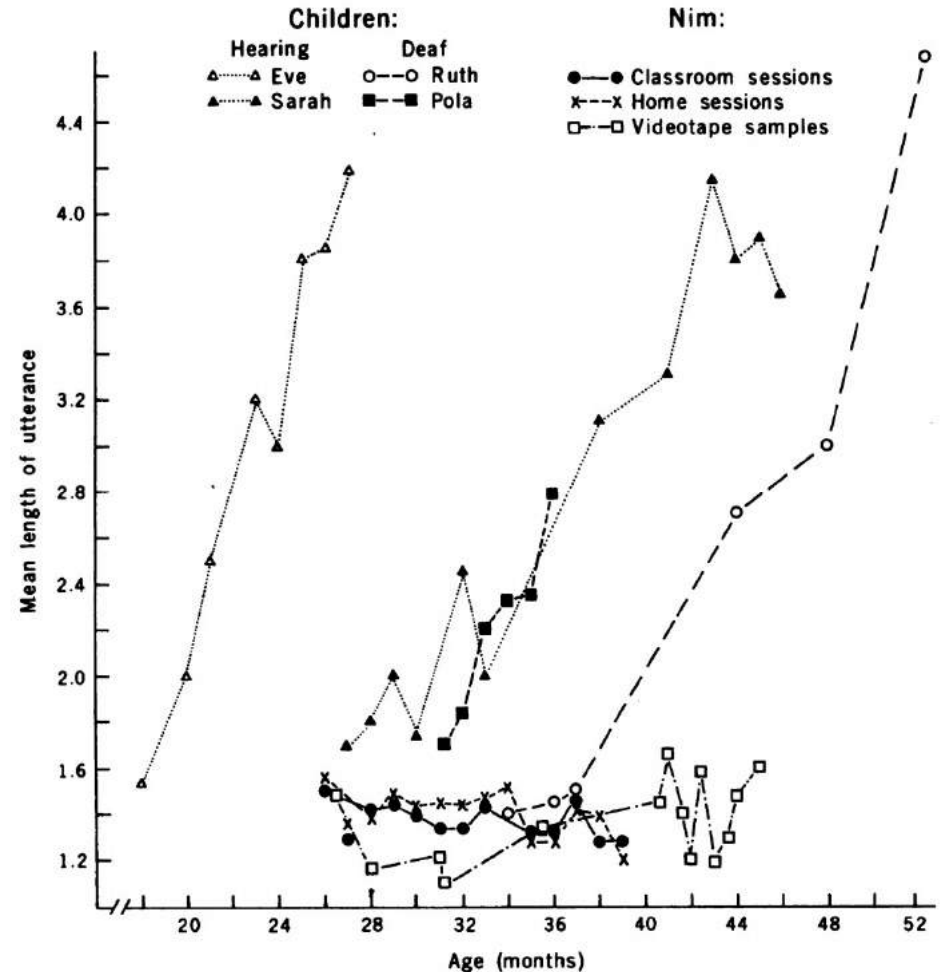
Terrace, H. S., Petitto, L. A., Sanders, R. J., & Bever, T. G. (1979). Can an ape create a sentence? *Science (New York, N.Y.)*, 206(4421), 891–902.

Contrairement aux enfants, on n’observe chez Nim aucune augmentation rapide de la longueur des productions verbales.

Autre différence majeure: dans un dialogue, les enfants imitent de moins en moins, mais produisent de plus en plus d’extensions sémantiques (ajouts de mots supplémentaires). Mais chez Nim, l’imitation pure domine.



Nim interrompt également son interlocuteur, au lieu d’attendre son tour de dialogue. L’article contient également une critique sévère d’expériences similaires menées par Allen et Beatrix Gardner chez leur chimpanzé Washoe: il s’avère que beaucoup des productions de Washoe sont de simples imitations différées des signes que les Gardner viennent de produire...



Un marqueur de l'existence de règles combinatoires productives chez l'homme, mais pas chez le chimpanzé

Yang, C. (2013). Ontogeny and phylogeny of language. *PNAS*, 2012, 16803.

La production du langage, chez l'enfant comme chez le chimpanzé, est-elle fondée sur des règles abstraites (Chomsky) ou bien sur la simple mémorisation d'expressions entendues (Tomasello)? Un critère simple: dès qu'un enfant apprend un nom nouveau, est-il capable de le combiner avec n'importe quel déterminant? *A blicket, the blicket?*

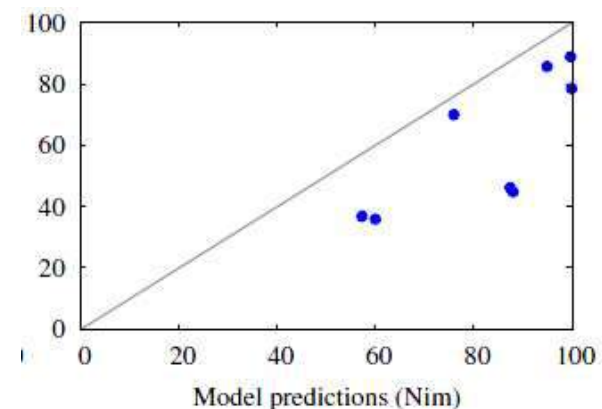
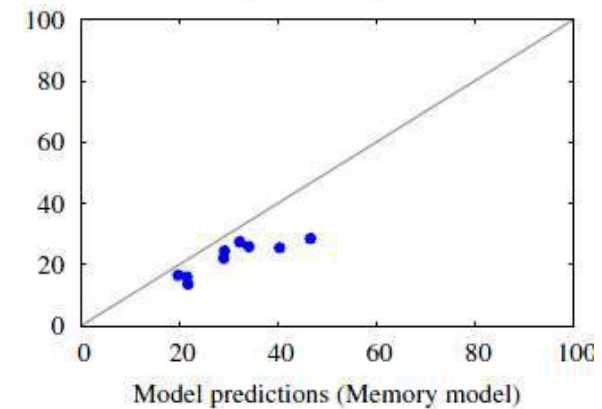
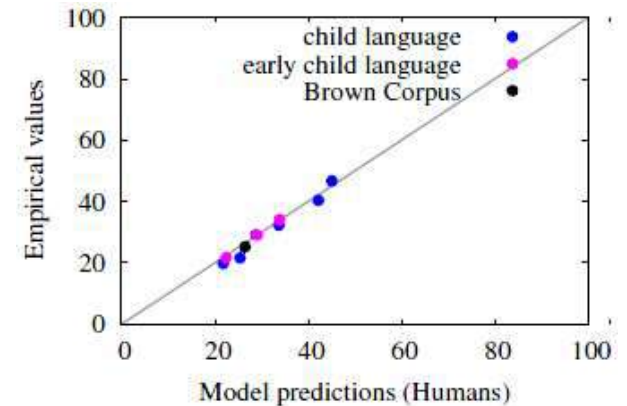
Appelons « diversité » cette variable qui va entre 0% (toujours un seul déterminant) et 100% (toujours deux déterminants pour tous les noms).

Si l'enfant apprend la règle « $NP = Det + Noun$ », on pourrait s'attendre à une diversité de 100%. L'analyse des productions des enfants montre que seulement 20-40% des noms singuliers sont utilisés à la fois avec *a* et avec *the* (Pine & Lieven, 1997) – ce qui a été interprété comme l'absence d'une règle grammaticale systématique

Mais Yang fait remarquer que, si un mot est rare, alors il se peut que, par hasard, on ne l'observe qu'avec un seul déterminant (cas extrême: s'il n'est observé qu'une seule fois!)

La fréquence des mots (elle-même déterminée par la loi de Zipf) permet de prédire, en fonction de la taille du corpus, quelle diversité moyenne on doit observer – et cette formule prédit exactement les observations empiriques chez l'enfant, dès le plus jeune âge (100 premiers mots). Yang évalue également un modèle de « pure mémoire », inspiré des idées de Tomasello, selon lequel l'enfant imite les productions qu'il entend. Ce modèle sous-estime grandement la diversité des productions des enfants, et peut donc être rejeté.

Par contre, chez Nim Chimpsky, la diversité des constructions est bien moins grande que prédite par le modèle des règles.



Un marqueur de l'existence de règles combinatoires productives chez l'homme, mais pas chez le chimpanzé

Yang, C. (2013). Ontogeny and phylogeny of language. *PNAS*, 2012, 16803.

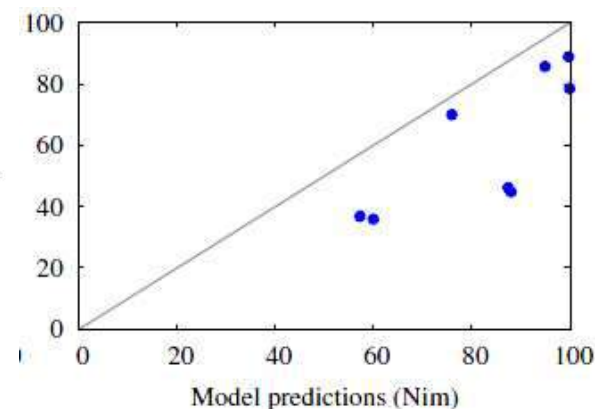
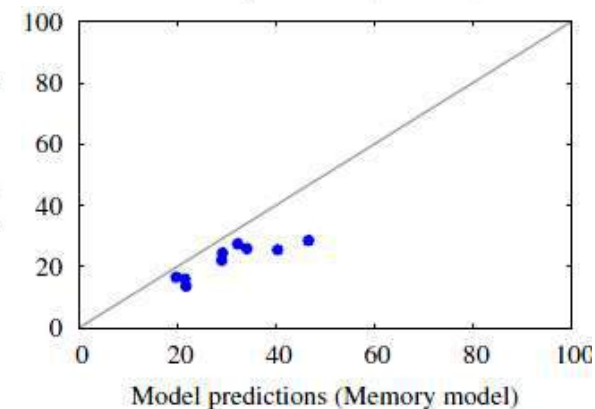
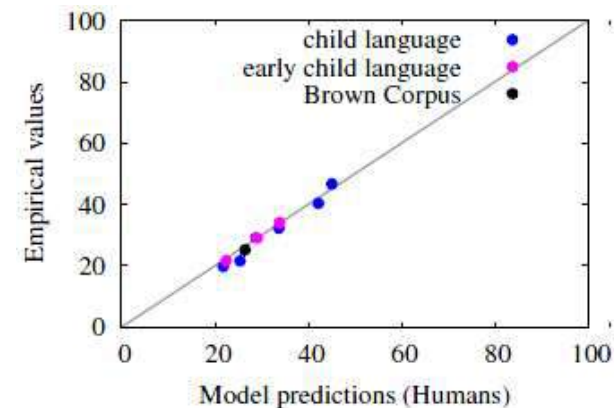
Par exemple, Nim possède des constructions de type « more X » et « give X » -- et le corpus, très vaste, suggère qu'on devrait observer une diversité de 88% ; mais ce n'est pas le cas: Nim utilise tantôt « more X » avec certains mots, et tantôt « give X » avec d'autres mots.

Table S2. Empirical values of syntactic diversity in Nim's eight sign combination patterns compared with theoretical values if the combinations are independent

Rule	Sample size	Types	Theoretical, %	Empirical, %
(more give) X	1,215	67	88.0	44.8
X (more give)	256	39	59.9	35.9
Verb (me Nim)	800	14	99.9	78.6
(me Nim) verb	158	13	87.4	46.1
Food-item (me Nim)	775	18	99.7	88.9
(me Nim) food-item	261	14	94.9	85.7
Nonfood-item (me Nim)	180	20	75.9	70.0
(me Nim) nonfood-item	99	19	57.2	36.8

The empirical values are significantly lower ($P < 0.004$, paired one-tailed Mann–Whitney test).

Ces observations confortent l'hypothèse que Nim n'utilise pas des règles syntaxiques de façon systématique et productive.



Les règles combinatoires apparaissent spontanément dans la langue des signes d'un enfant « homesigner »

Goldin-Meadow, S., & Yang, C. (2016). Statistical evidence that a child can create a combinatorial linguistic system without external linguistic input: Implications for language evolution. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.12.016>

Les enfants sourds qui ne sont ni appareillés, ni exposés à la langue des signes développent des systèmes de communication gestuelle qui leur sont propres.

Ces « langues » partagent de nombreuses propriétés linguistiques abstraites avec les autres langues naturelles (présence de noms et de verbes, formation des questions, des négatives...).

Présentent-elles la signature de règles combinatoires?

Les auteurs analysent environ 20 heures de vidéos d'un enfant sourd, « David », entre 2 et 5 ans.

La combinatoire est bel et bien présente:

Le même nom, par exemple, peut être utilisé avec ou sans démonstratif; avec un verbe d'action ou d'état; avec un verbe transitif ou intransitif; avec un locatif ou un possessif; etc...

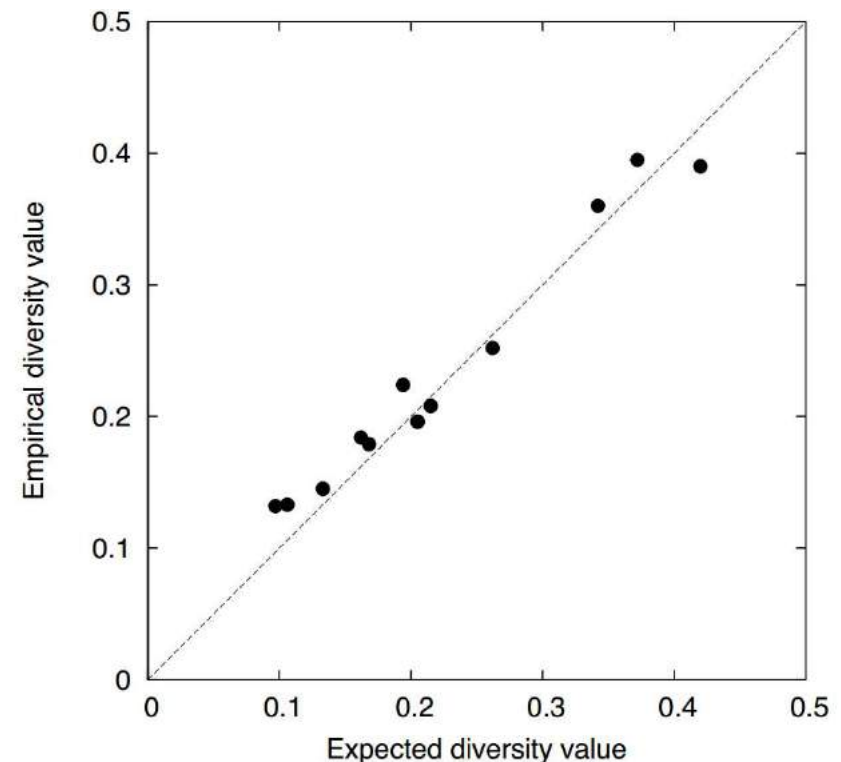


Fig. 1. The expected diversity value for each of the 12 constructions agrees well with the empirical diversity value for that construction (dotted line indicates identity).

L'apprentissage de règles abstraites

Shepard, R. N., Hovland, C. L., & Jenkins, H. M. (1961). Learning and memorization of classifications. *Psychological Monographs: General and Applied*, 75(13), 1-42.

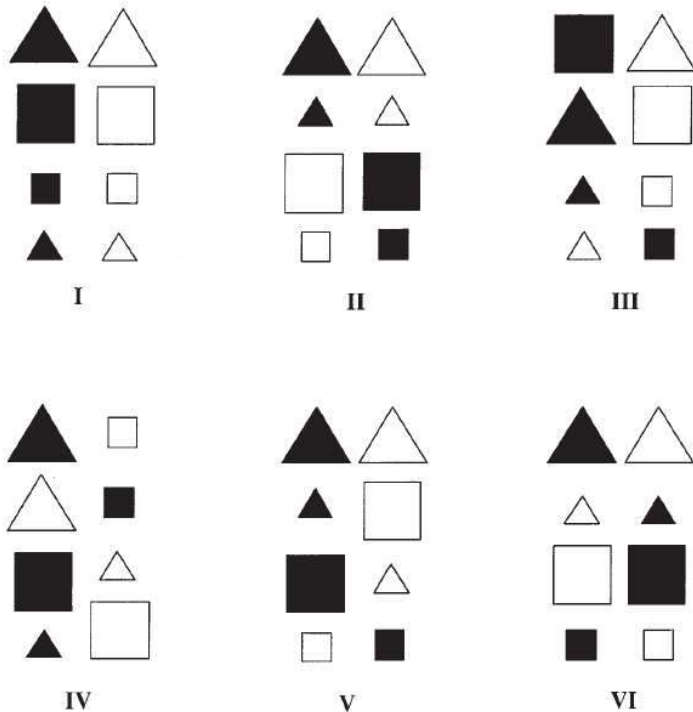


Figure 1. Examples of the six types of category task used by Shepard et al. (1961) and in the present research.

Etude classique de Roger Shepard et coll. (1961) sur l'apprentissage des règles. Les humains apprennent remarquablement vite à classer les items suivant l'une des six règles possibles.

Conclusions de Shepard:

- Pas d'apprentissage associatif de chaque forme ou de chaque dimension perceptive avec telle ou telle réponse
- La vitesse d'apprentissage et la performance ne dépendent pas de la similarité entre les items (intra-catégorie versus inter-catégorie).
- En particulier, les humains apprennent facilement la règle XOR (type II) alors que la similarité perceptive prédit que ce type de problème devrait être difficile.

Les données sont bien prédites par la longueur de la règle la plus simple que les sujets sont capables d'exprimer (complexité de Kolmogorov)

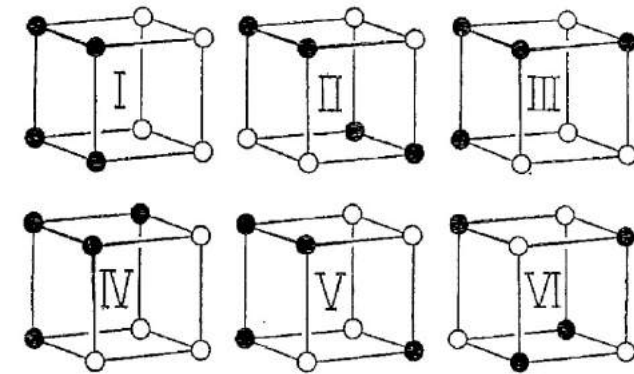
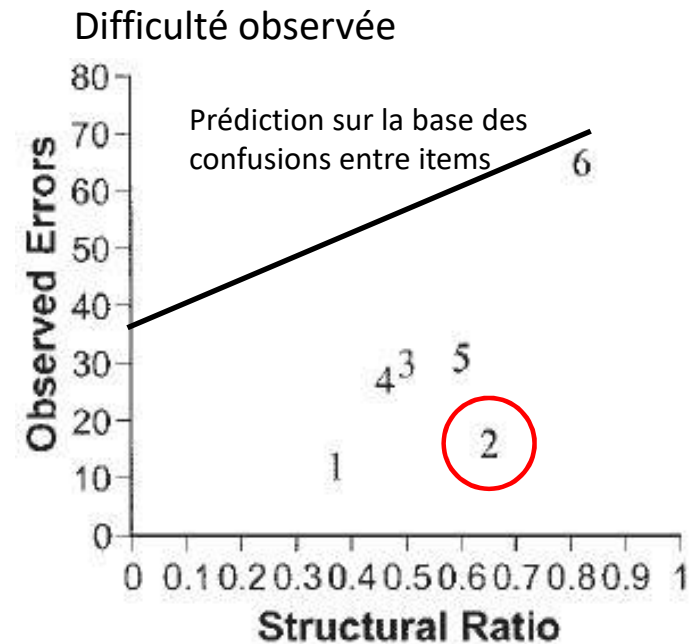
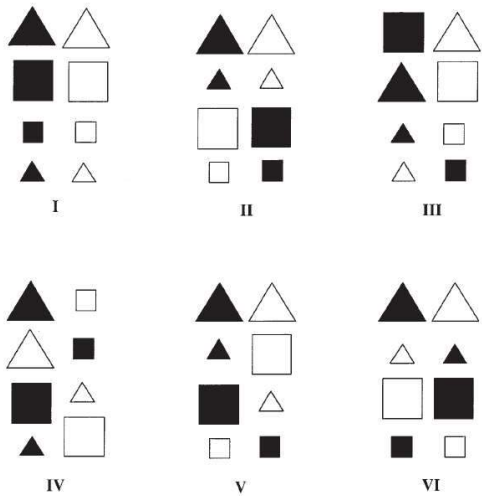


FIG. 3. The six basic types of classification represented abstractly by coloring four corners of the cube black and the remaining four white.



Un déficit de compréhension des règles abstraites chez le singe macaque

Smith, J. D., Minda, J. P., & Washburn, D. A. (2004). Category Learning in Rhesus Monkeys: A Study of the Shepard, Hovland, and Jenkins (1961) Tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(3), 398–414.



Réplication par Smith et al.:
Les sujets humains montrent le même ordre de difficulté que dans l'expérience de Shepard.

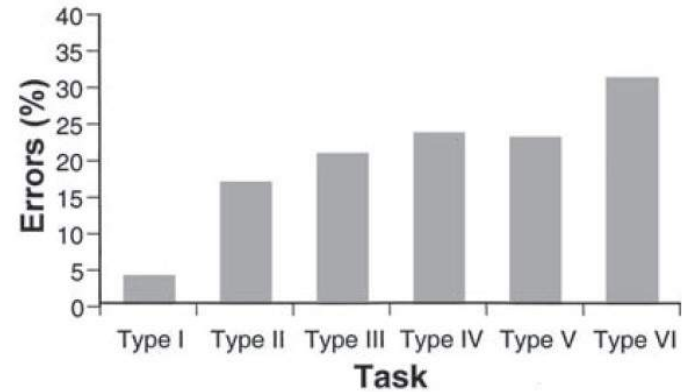
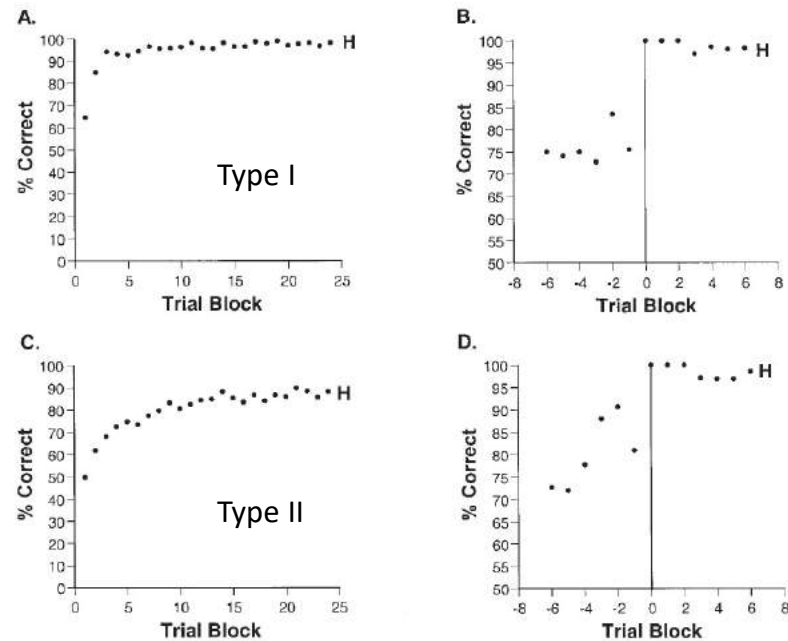


Figure 1. Examples of the six types of category task used by Shepard et al. (1961) and in the present research.

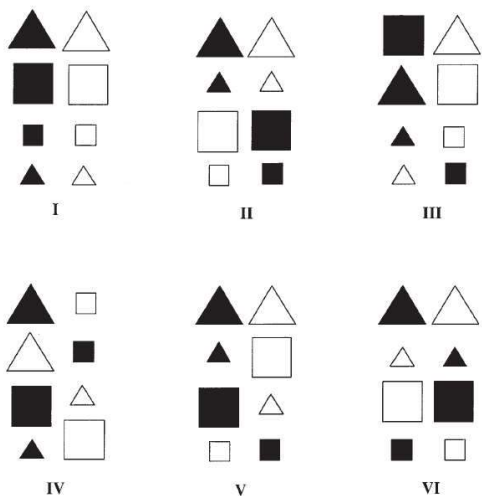
L'apprentissage semble être continu: la performance augmente continuellement avec le nombre d'essais...

Mais, si on aligne les données sur le début de la première série de 3 succès consécutifs, les données suggèrent une découverte soudaine de la règle.



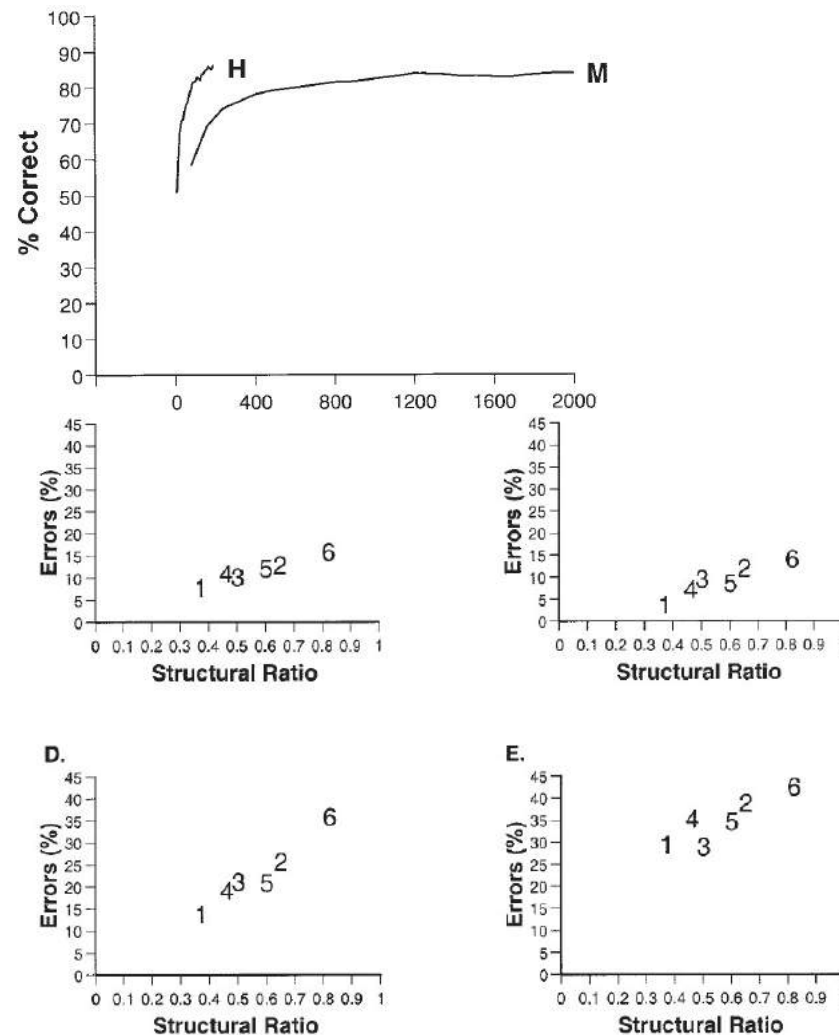
Un déficit de compréhension des règles abstraites chez le singe macaque

Smith, J. D., Minda, J. P., & Washburn, D. A. (2004). Category Learning in Rhesus Monkeys: A Study of the Shepard, Hovland, and Jenkins (1961) Tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(3), 398–414.



- Chez le singe:
- l'apprentissage est massivement plus lent.
 - L'ordre de difficulté n'est pas le même: le type II est particulièrement difficile.
 - Chez les 4 singes, les données sont bien prédites par une mesure de similarité perceptive.

Figure 1. Examples of the six types of category task used by Shepard et al. (1961) and in the present research.



Un déficit de compréhension des règles abstraites chez le singe macaque

Smith, J. D., Minda, J. P., & Washburn, D. A. (2004). Category Learning in Rhesus Monkeys: A Study of the Shepard, Hovland, and Jenkins (1961) Tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(3), 398–414.

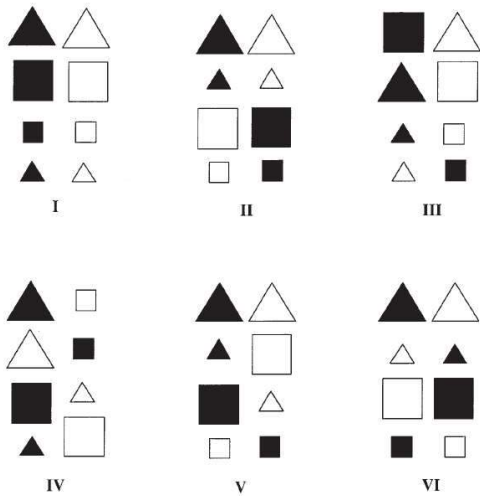
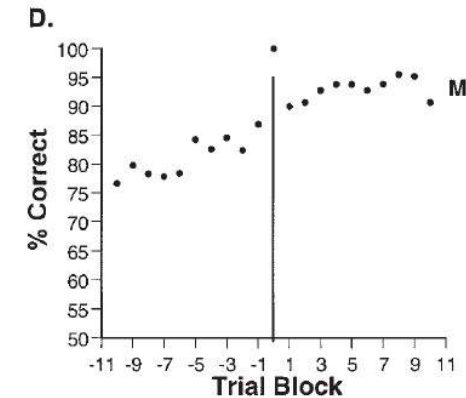
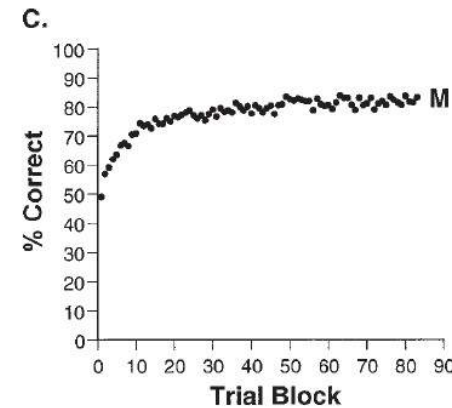
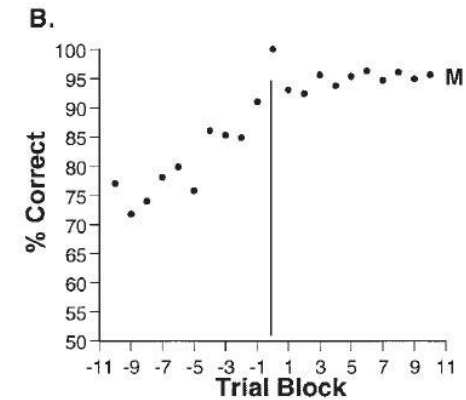
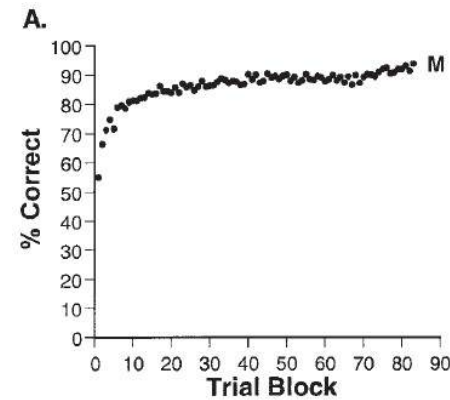


Figure 1. Examples of the six types of category task used by Shepard et al. (1961) and in the present research.

Les courbes d'apprentissage ne suggèrent pas de découverte soudaine d'une règle.



Conclusions:

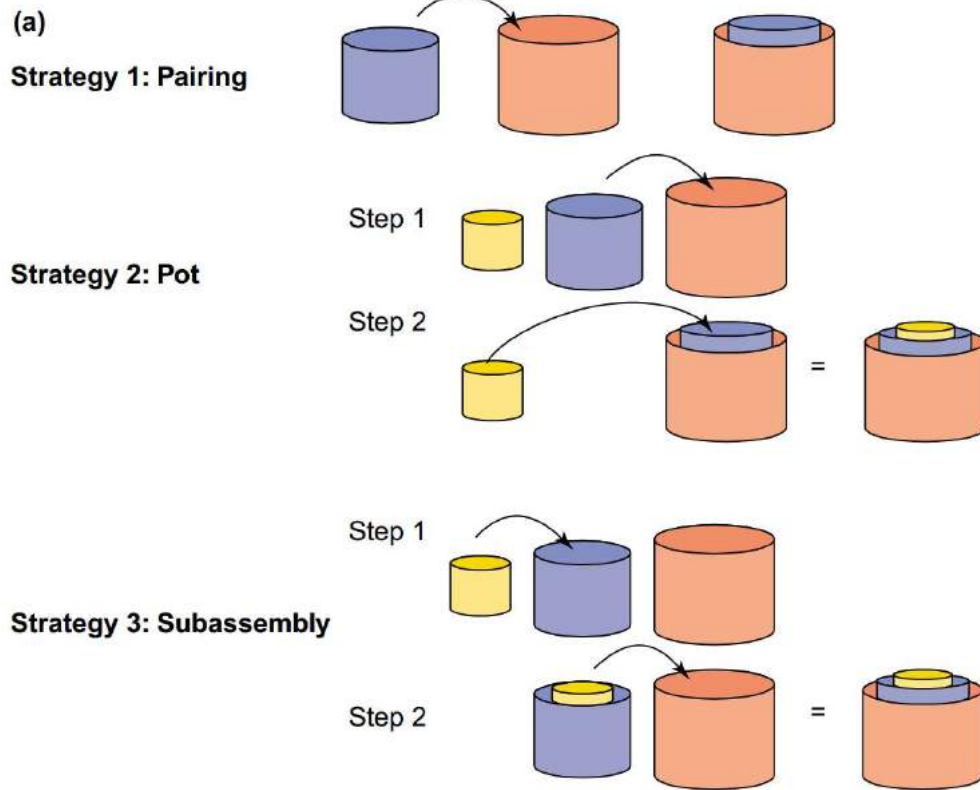
- Les humains semblent apprendre rapidement des règles symboliques abstraites, qui peuvent même combiner plusieurs dimensions selon un enchâssement logique (« triangle noir ou carré blanc »).
- Les singes apprennent bien plus lentement, sans doute parce qu'ils cherchent seulement des associations stimulus-réponse.

Des différences même dans le comportement spontanée en résolution de problèmes

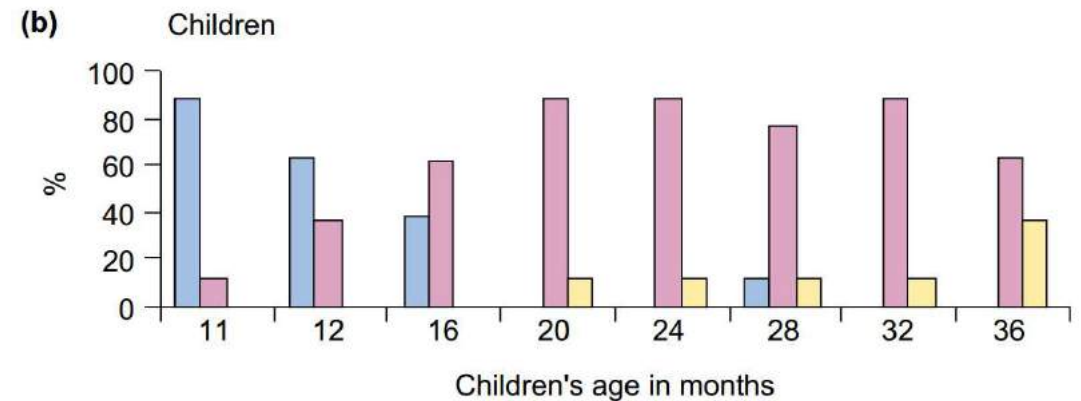
Johnson-Pynn, J. *et al.* (1999) Strategies used to combine seriated cups by chimpanzees (*Pan troglodytes*), bonobos (*Pan paniscus*), and capuchins (*Cebus apella*). *J. Comp. Psychol.* 113, 137–148

Greenfield, P.M. *et al.* (1972) The development of rulebound strategies for manipulating seriated cups: a parallel between action and grammar. *Cognit. Psychol.* 3, 291–310

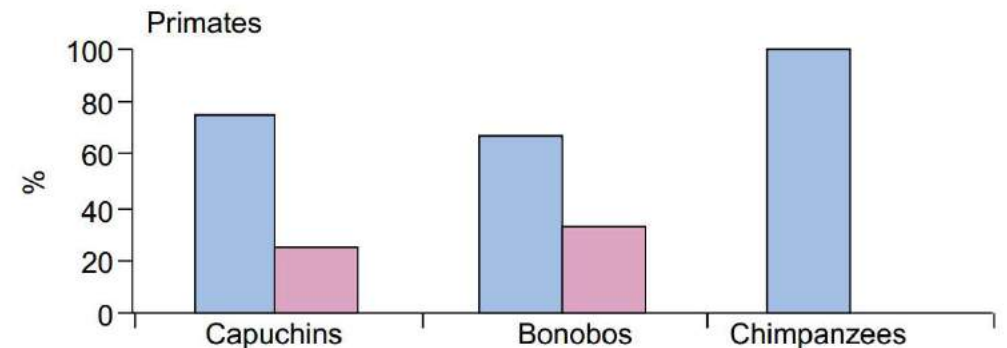
Review: Conway, C. M., & Christiansen, M. H. (2001). Sequential learning in non-human primates. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(12), 539–546.



Les enfants humains utilisent successivement les trois stratégies.

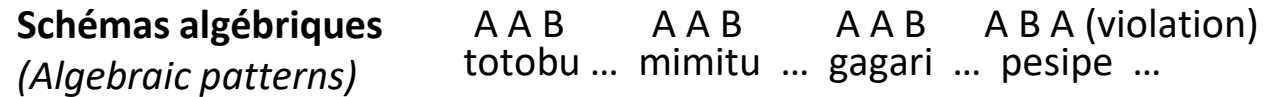
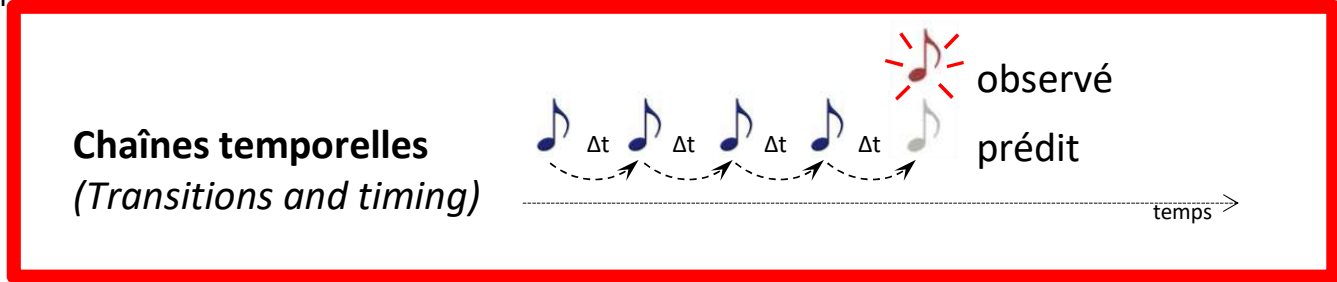
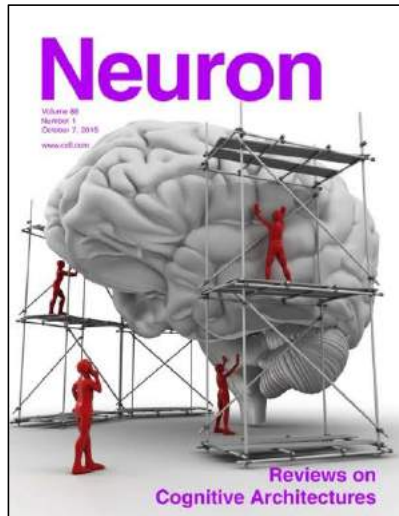


Les primates non-humains n'utilisent guère les stratégies hiérarchiques.

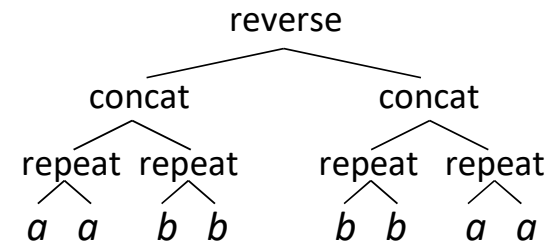
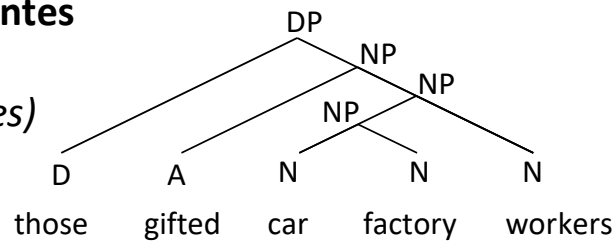


Cinq formes de représentations mentales des séquences

Dehaene, S., Meyniel, F., Wacongne, C., Wang, L., & Pallier, C. (2015). The Neural Representation of Sequences: From Transition Probabilities to Algebraic Patterns and Linguistic Trees. *Neuron*, 88(1), 2–19.



**Structures arborescentes
enchâssées**
(nested tree structures)



La détection de séquences spatiales chez le babouin

Minier, L., Fagot, J., & Rey, A. (2015). The Temporal Dynamics of Regularity Extraction in Non-Human Primates. *Cognitive Science*. <https://doi.org/10.1111/cogs.12279>

1	2	3
+	+	+
4	5	6
+	+	+
7	8	9
+	+	+

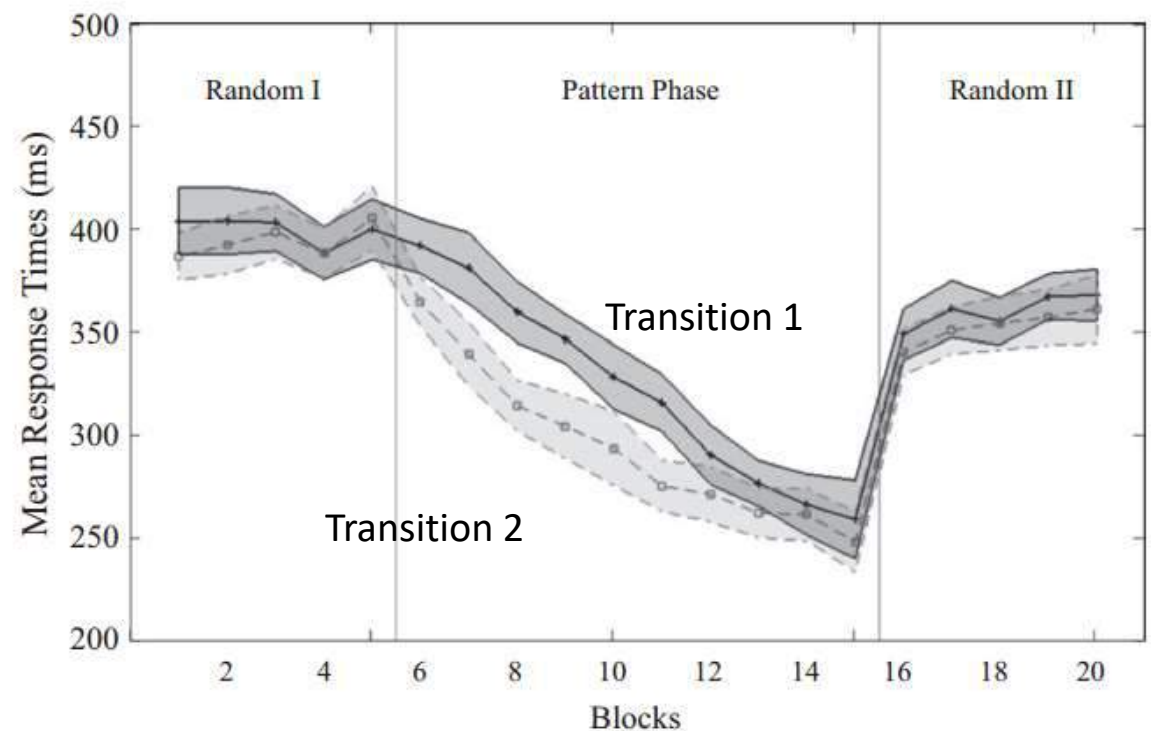
Tâche de temps de réaction en série (*serial reaction-time task*) avec une séquence de 9 positions, sans répétition.

Deux conditions

- Random = chaque essai comprend une nouvelle séquence de 9 positions.
- Pattern = les 9 positions sont formées de 3 « mots », chacun constitué de 3 positions (par exemple 5-8-2, 4-7-3 et 1-9-6)

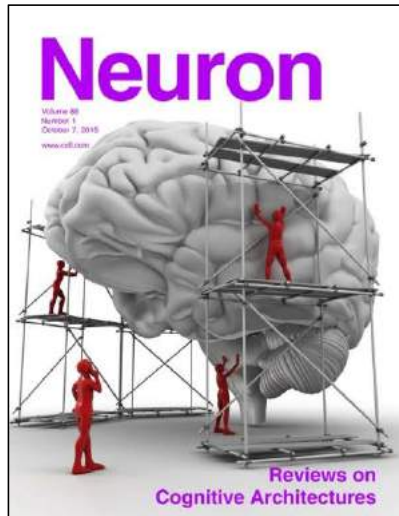
Les résultats montrent que les transitions « intra-chunk » qui sont prévisibles s'accélèrent, ce qui implique que l'animal a détecté les probabilités de transition

... mais pas nécessairement qu'il a extrait les groupes de trois (*chunks*).

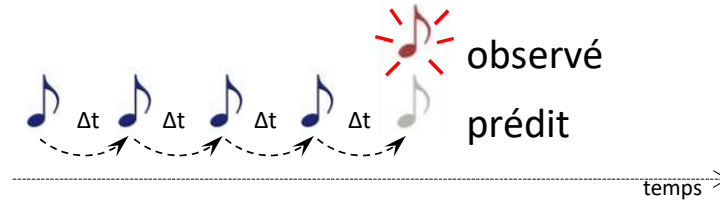


Cinq formes de représentations mentales des séquences

Dehaene, S., Meyniel, F., Wacongne, C., Wang, L., & Pallier, C. (2015). The Neural Representation of Sequences: From Transition Probabilities to Algebraic Patterns and Linguistic Trees. *Neuron*, 88(1), 2–19.



Chaînes temporelles
(*Transitions and timing*)



Formation de groupes
(*Chunking*)

tokibugikobagopilagikobatokibugopila ...

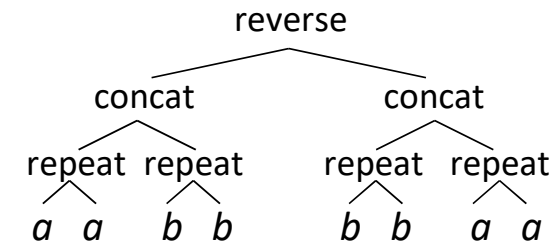
Codage de l'ordre
(*Ordinal knowledge*)



Schémas algébriques
(*Algebraic patterns*)

A A B A A B A A B A B A (violation)
totobu ... mimitu ... gagari ... pesipe ...

**Structures arborescentes
enchâssées**
(*nested tree structures*)



Formation de groupes (*chunks*) chez le singe tamarin

Saffran, J. R., Aslin, R. N., & Newport, E. L. (1996). Statistical learning by 8-month-old infants. *Science*, 274(5294), 1926–8.

Hauser, M. D., Newport, E. L., & Aslin, R. N. (2001). Segmentation of the speech stream in a non-human primate: statistical learning in cotton-top tamarins. *Cognition*, 78(3), B53-64.

Review: Conway, C. M., & Christiansen, M. H. (2001). Sequential learning in non-human primates. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(12), 539–546.

tokibugikobagopilatipolutokibu
 gopilatipolutokibugikobagopila
 gikobatokibugopilatipolugikoba
 tipolugikobatipolugopilatipolu
 tokibugopilatipolutokibugopila
 tipolutokibugopilagikobatipolu
 tokibugopilagikobatipolugikoba
 tipolugikobatipolutokibugikoba
 gopilatipolugikobatokibugopila



Les enfants de 8 mois et les singes tamarins font la différence entre « vrais » mots et les deux types de contrôle.

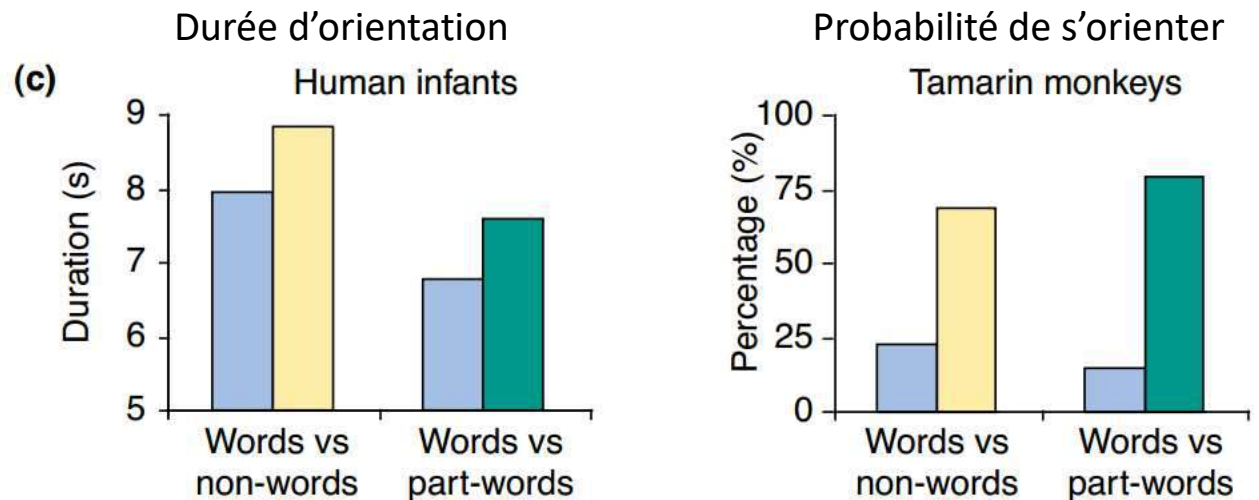
Exposition à une séquence de syllabes formées d'un concaténation de « mots » de 3 syllabes.

Ensuite on fait écouter des chaînes de trois syllabes qui sont

-soit des « mots » de la séquence initiale: **tokibu**

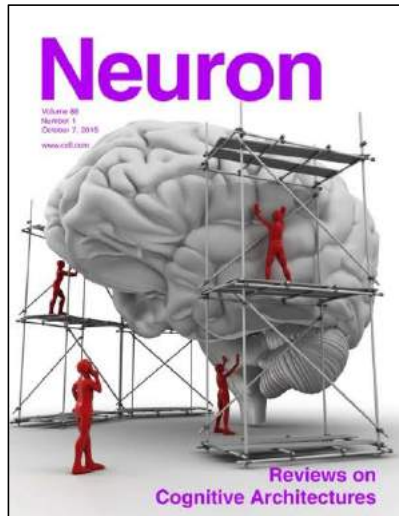
-soit des non-mots: **gokiba**

-soit des « parties de mots » : la fin d'un mot et le début du suivant, par ex. **bugiko**

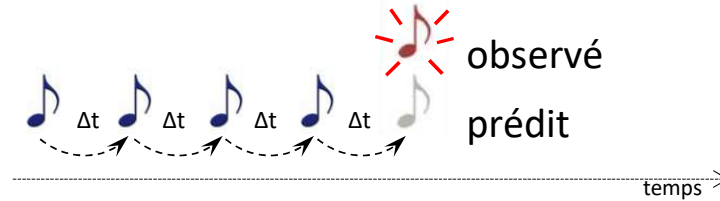


Cinq formes de représentations mentales des séquences

Dehaene, S., Meyniel, F., Wacongne, C., Wang, L., & Pallier, C. (2015). The Neural Representation of Sequences: From Transition Probabilities to Algebraic Patterns and Linguistic Trees. *Neuron*, 88(1), 2–19.



Chaînes temporelles
(*Transitions and timing*)



Formation de groupes
(*Chunking*)

tokibugikobagopilagikobatokibugopila ...

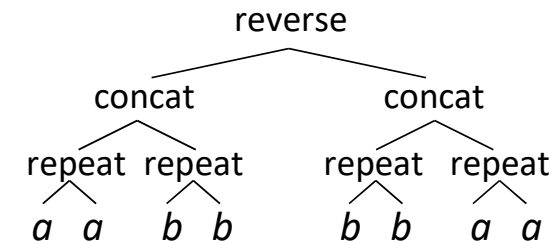
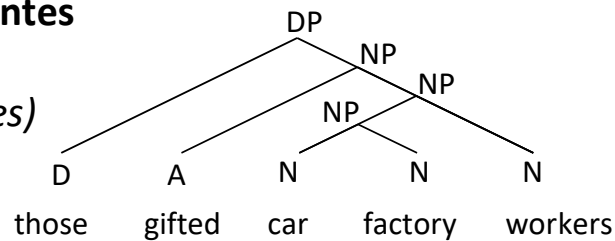
Codage de l'ordre
(*Ordinal knowledge*)



Schémas algébriques
(*Algebraic patterns*)

A A B A A B A A B A B A (violation)
totobu ... mimitu ... gagari ... pesipe ...

**Structures arborescentes
enchâssées**
(*nested tree structures*)



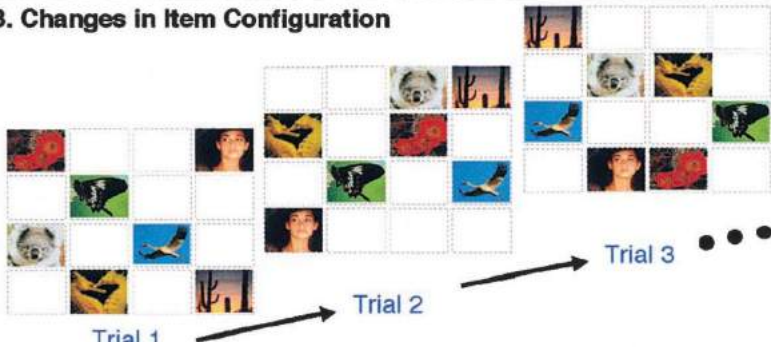
Apprentissage de l'ordre sériel chez le singe macaque

Terrace, H. S., Son, L. K., & Brannon, E. M. (2003). Serial expertise of rhesus macaques. *Psychological Science*, 14(1), 66–73.

A. Required Sequence



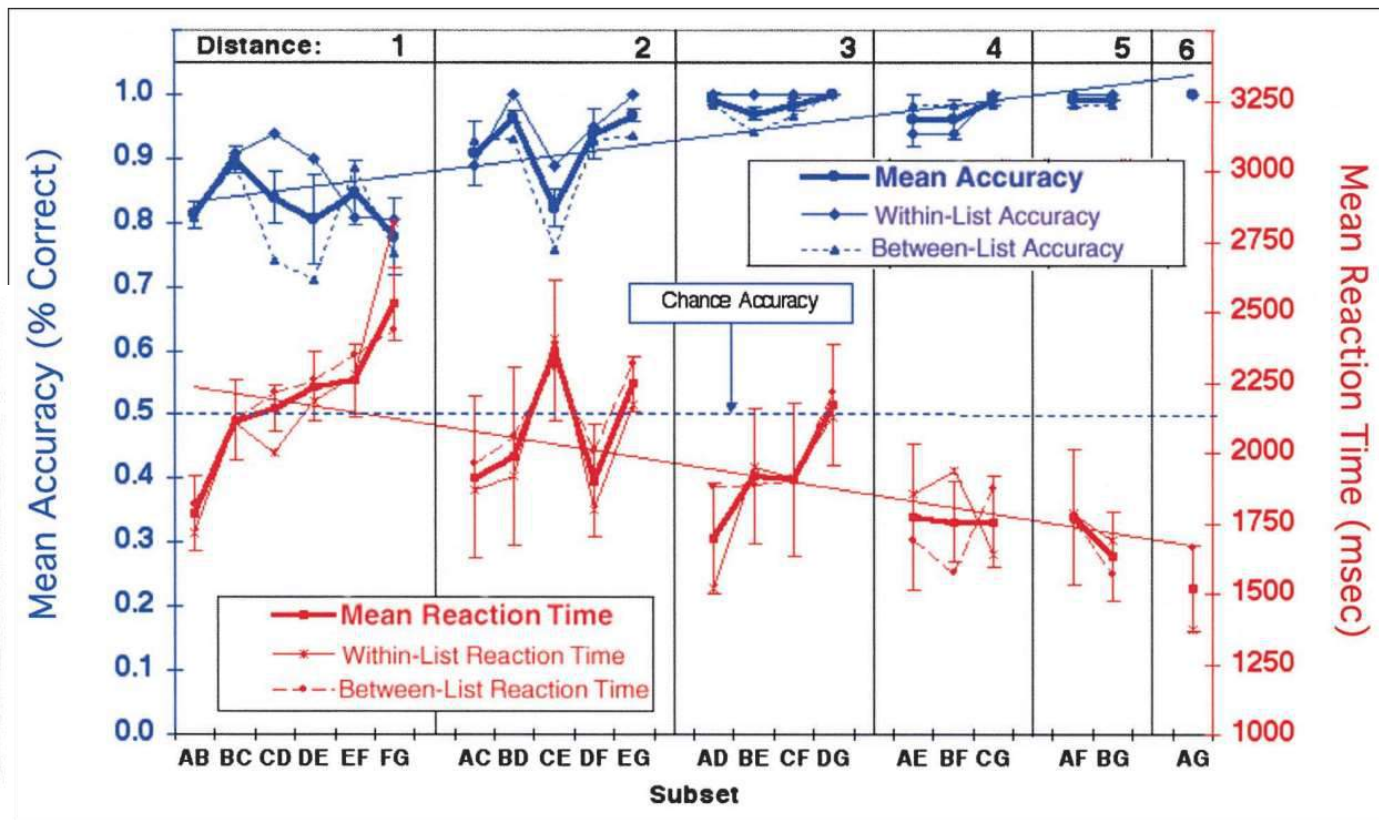
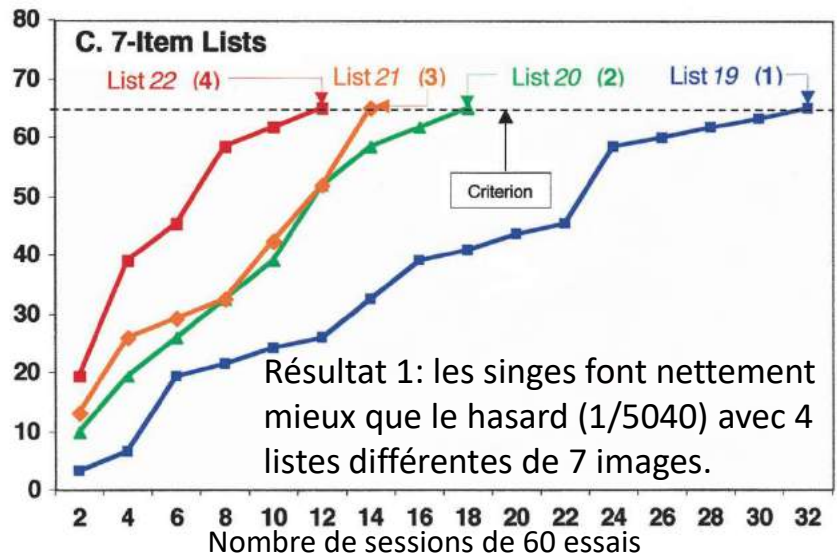
B. Changes in Item Configuration



On demande à des singes macaques d'apprendre dans quel ordre appuyer sur 7 images. La disposition spatiale change à chaque essai – seul compte l'ordre.

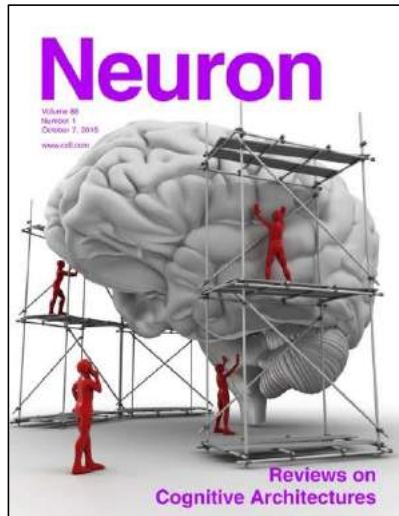
Résultat 2: les singes généralisent du premier coup à la présentation de deux images quelconques – que celles-ci fassent partie de la même liste ou pas.

C. 7-Item Lists

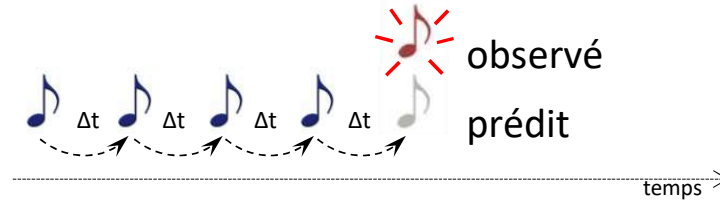


Cinq formes de représentations mentales des séquences

Dehaene, S., Meyniel, F., Wacongne, C., Wang, L., & Pallier, C. (2015). The Neural Representation of Sequences: From Transition Probabilities to Algebraic Patterns and Linguistic Trees. *Neuron*, 88(1), 2–19.



Chaînes temporelles
(*Transitions and timing*)



Formation de groupes
(*Chunking*)

tokibugikobagopilagikobatokibugopila ...

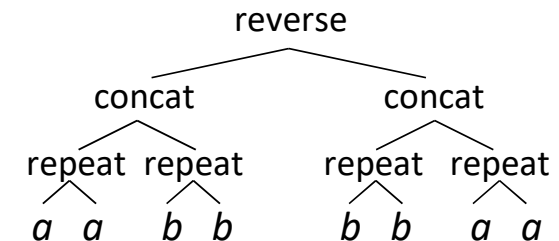
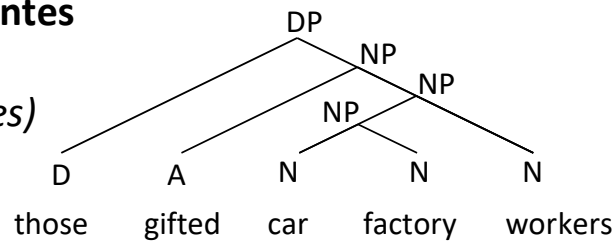
Codage de l'ordre
(*Ordinal knowledge*)



Schémas algébriques
(*Algebraic patterns*)

A A B A A B A A B A B A (violation)
totobu ... mimitu ... gagari ... pesipe ...

**Structures arborescentes
enchâssées**
(*nested tree structures*)



Qu'appelle-t-on « connaissance d'un schéma algébrique ? »

Marcus, G. F., Vijayan, S., Bandi Rao, S., & Vishton, P. M. (1999). Rule learning by seven-month-old infants. *Science*, 283, 77–80.

16 bébés de 7 mois entendent des séquences de trois syllabes, tirées soit d'un schéma « ABB », soit d'un schéma « ABA » (par ex. « ga ti ti » versus « ga ti ga »).

Dans la phase de test, on présente exclusivement des séquences nouvelles, mais qui respectent le schéma d'origine ou pas (par ex. « wo fe fe » ou « wo fe wo »).

Les enfants écoutent nettement plus longtemps les séquences qui s'écartent du schéma de départ.

Ces résultats, très significatifs, sont répliqués avec des syllabes qui ne partagent aucun trait phonétique (exp. 2).

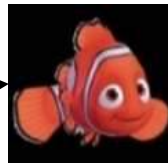
Dans l'expérience 3, les résultats sont étendus à AAB versus ABB.

Ces résultats ne peuvent s'expliquer par un apprentissage associatif ou de probabilités de transition. Les enfants seraient capables d'extraire des « schémas algébriques » (*algebraic patterns*).

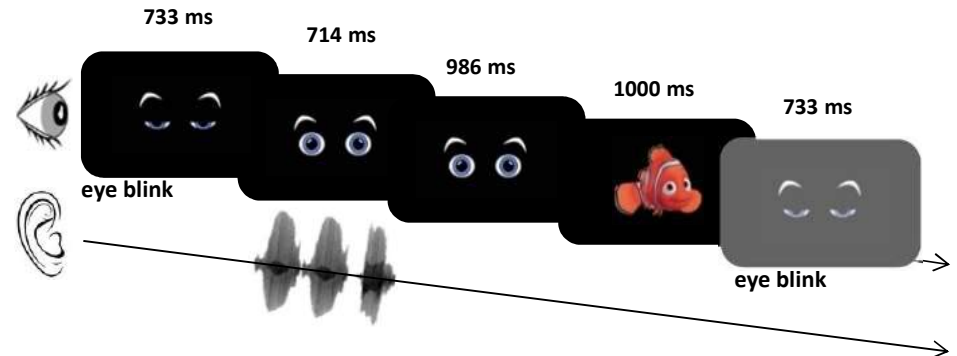
Réplication et extension avec l'imagerie cérébrale chez le bébé de 5 mois:



ABB
tebaba,
golili...



ABA
kiloki
pidopi



Kabdebon & Dehaene-Lambertz, article soumis

Apprentissage de schémas algébriques chez le rat !

Murphy, R. A., Mondragon, E., & Murphy, V. A. (2008). Rule Learning by Rats. *Science*, 319(5871), 1849–1851.

Voir aussi de la Mora, D. M., & Toro, J. M. (2013). Rule learning over consonants and vowels in a non-human animal. *Cognition*, 126(2), 307–312.

Des rats sont exposés à des séquences (visuelles ou auditives) de type XyX, XXY, ou yXX, dont un seul type prédit la survenue de nourriture.

Expérience 1: les stimuli sont des séquences de lumière (A) versus obscurité (B). Deux séquences sont renforcées (RF, par exemple ABA et BAB), les autres servent de distracteurs (NRF).

Block of learning trials	Group 1 Rule 1 (XYX) ABA, BAB		Group 2 Rule 2 (XXY) BBA, AAB		Group 3 Rule 3 (YXX) BAA, ABB	
	RF	NRF	RF	NRF	RF	NRF
Rate of food tray entry (/min)						
First	12.66	12.58	9.14	9.81	13.94	13.97
Last	25.97	>24.18	24.47	>22.97	32.08	>29.06

Expérience 2: Les stimuli sont des tons purs (A = 3.2 kHz and B = 9 kHz), et on teste la généralisation à deux autres tons purs (C = 12.5 kHz and D = 17.5 kHz).

Résultats: les rats apprennent à discriminer.... et généralisent aux sons nouveaux.

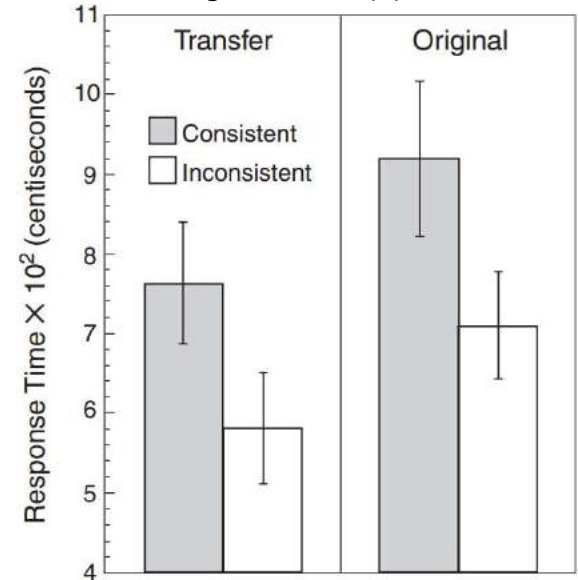


Fig. 1. Mean time (in centiseconds) with head in the food trough during the final 10 s of a sequence, subtracting the 10-s prestimulus interval for that trial. Response rates are shown separately for consistent sequences and inconsistent sequences, and the analysis confirmed that there was more responding to consistent than inconsistent sequences during the transfer test in the absence of food [$F(1,13) = 5.35, P < 0.05$] and during a test of the original stimuli [$F(1,13) = 4.87, P < 0.05$].

Schémas algébriques et généralisation inter-modale chez le chimpanzé

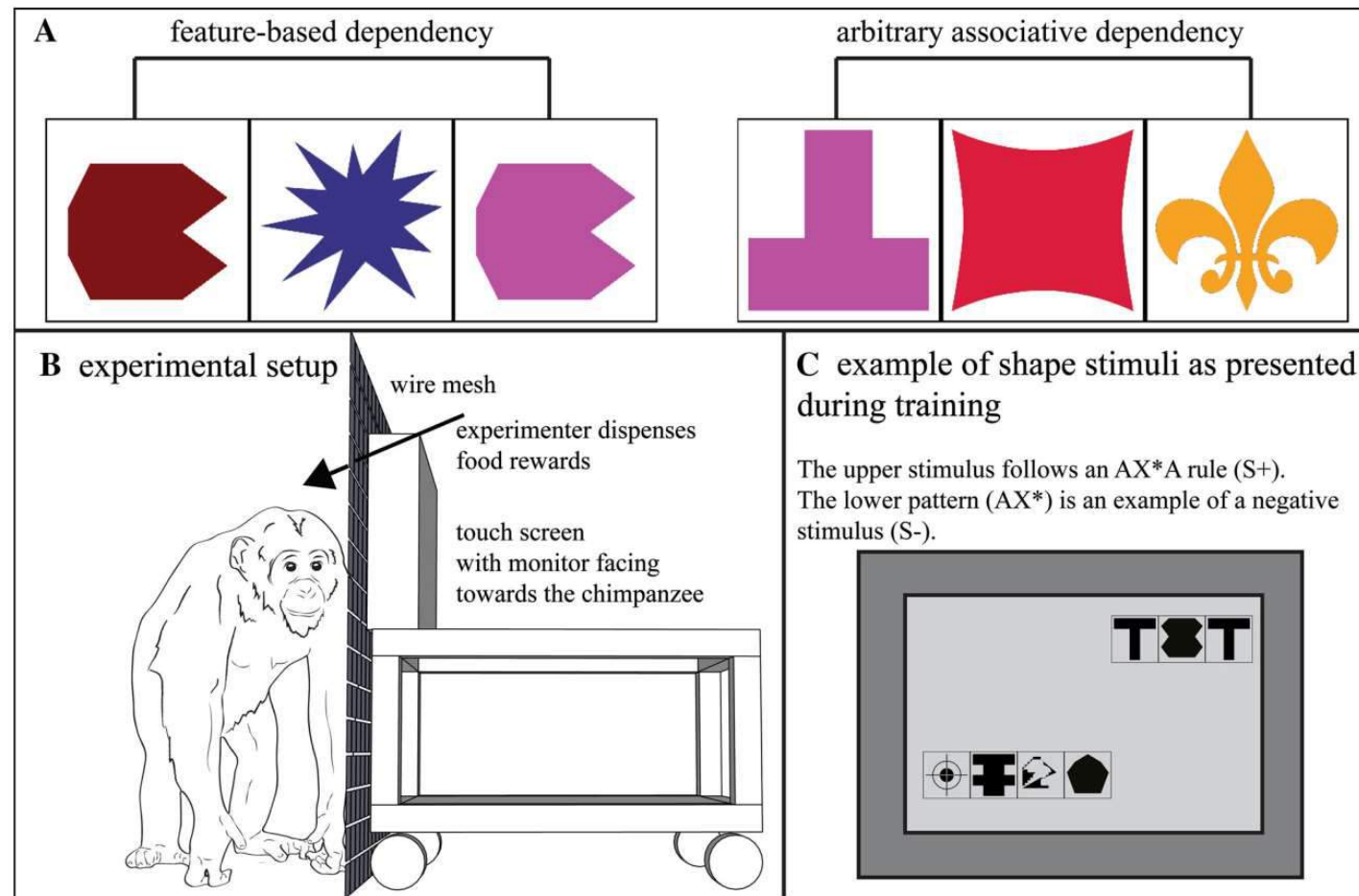
- Sonnweber, R., Ravnani, A., & Fitch, W. T. (2015). Non-adjacent visual dependency learning in chimpanzees. *Animal Cognition*, 18(3), 733–745.

Six chimpanzés apprennent à classer des chaînes visuelles de type ABA dans lesquelles existe une dépendance à longue distance

- Soit fondée sur l'identité d'un trait perceptif, la forme
- Soit fondée sur un appariement arbitraire.

Entraînement exclusivement avec

- cibles AXA' ou AXXA', où les X sont des images différentes qui n'ont aucun rapport avec A ou A'.
- Distracteurs AX ou AXXX
- Les stimuli de généralisation ne sont pas renforcés



Schémas algébriques et généralisation inter-modale chez le chimpanzé

- Sonnweber, R., Ravnani, A., & Fitch, W. T. (2015). Non-adjacent visual dependency learning in chimpanzees. *Animal Cognition*, 18(3), 733–745.

Pour déterminer ce que les animaux ont compris, on teste la généralisation à de nombreuses configurations nouvelles:

Feature-Based Dependencies		Arbitrary Associative Dependencies		
	<p>S+</p> <p>A A</p> <p>training: </p> <p>testing:</p>	<p>S-</p> <p>training: </p> <p>testing:</p>	<p>5 trained associative pairs </p> <p>S+</p> <p>training: </p> <p>testing:</p>	<p>S-</p> <p>training: </p> <p>testing:</p>
6/6	1. color:		1. color:	
4/5	2. extension:		2. extension:	
3/5	3. novel shapes:		3. novel shapes:	
1/5	4. duplication:		4. duplication:	
4/4	5. dependency position:		5. dependency position:	
0/4	6. center near edges foils:		6. center/ near edges:	
0/2	7. category transfer:		8. edge foil:	
			9. inversion:	
			10. crossing:	

Conclusion: Les animaux semblent capable d'apprendre des schémas algébriques du type AB*A

- Il doit y avoir la même forme aux deux extrémités
- Ou bien, il doit y avoir certaines formes aux extrémités

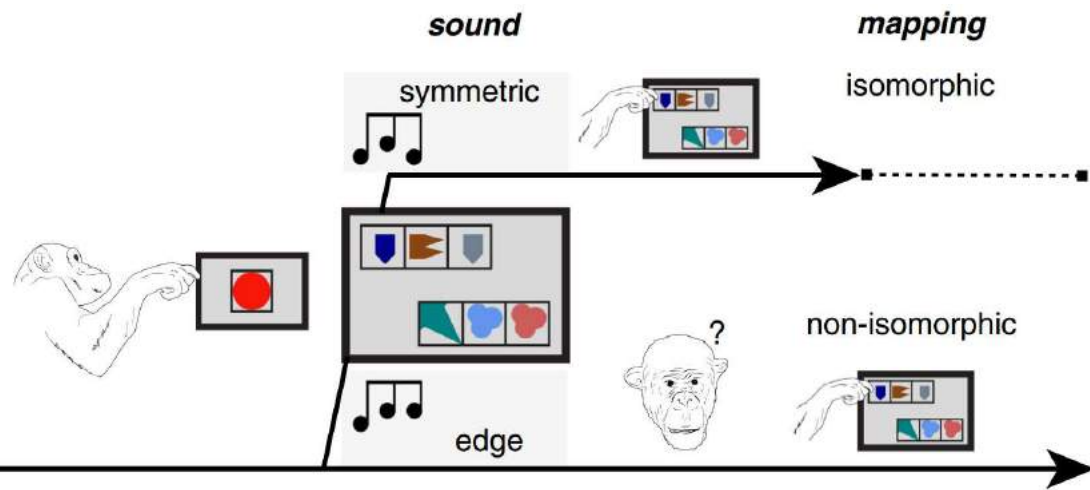
1/1
0/1
1/1

Tests cruciaux :
Pas de notion d'ordre, ni de vraie dépendance à longue distance

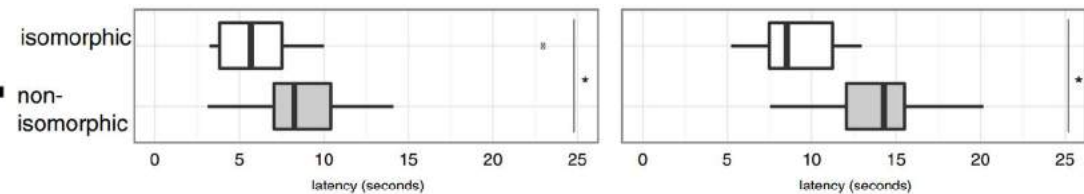
Schémas algébriques et généralisation inter-modale chez le chimpanzé

- Ravignani, A., & Sonnweber, R. (2017). Chimpanzees process structural isomorphisms across sensory modalities. *Cognition*, 161, 74–79.

Deux chimpanzés ont initialement été entraînés à détecter des chaînes visuelles avec une dépendance à longue distance de type AB*A
On leur demande ensuite de choisir parmi deux chaînes ABA vs ABB, mais **en présence d'une séquence auditive** isomorphe ou pas avec la règle à détecter.

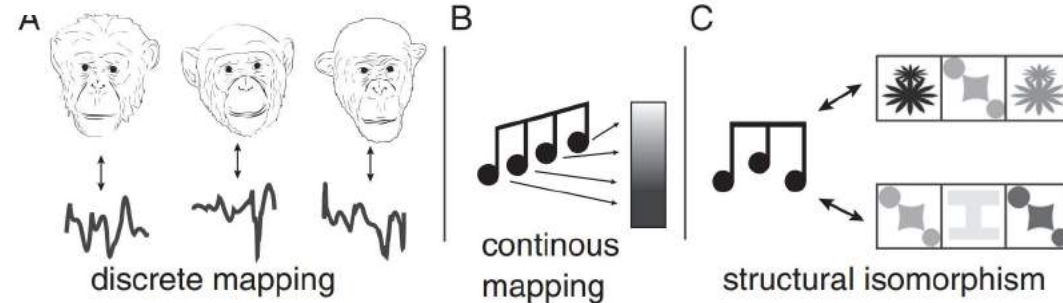


Résultat: L'audition interfère avec la décision visuelle:



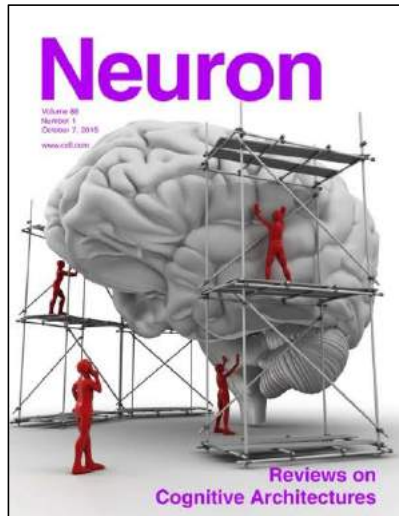
Conclusion: les chimpanzés disposent d'une capacité abstraite de **détection d'isomorphismes structurels** entre les modalités auditive et visuelle.

types of cross-modal mapping

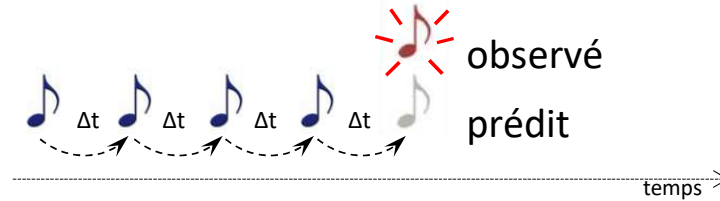


Cinq formes de représentations mentales des séquences

Dehaene, S., Meyniel, F., Wacongne, C., Wang, L., & Pallier, C. (2015). The Neural Representation of Sequences: From Transition Probabilities to Algebraic Patterns and Linguistic Trees. *Neuron*, 88(1), 2–19.



Chaînes temporelles
(*Transitions and timing*)



Formation de groupes
(*Chunking*)

tokibugikobagopilagikobatokibugopila ...

Codage de l'ordre
(*Ordinal knowledge*)



Schémas algébriques
(*Algebraic patterns*)

A A B A A B A A B A B A (violation)
totobu ... mimitu ... gagari ... pesipe ...

**Structures arborescentes
enchâssées**
(*nested tree structures*)

