

Cours 2017-2018:

Origines du langage et singularité de l'espèce humaine

Stanislas Dehaene
Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Cours n°5

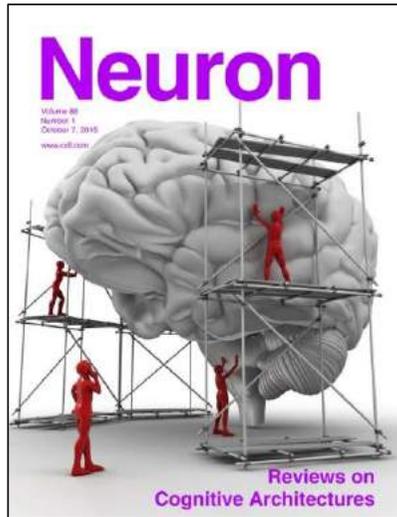
**L'apprentissage de grammaires artificielles :
La saga du langage « A^nB^n » et de ses variantes**

Fresque de Marietta Ren (mariettaren.com)

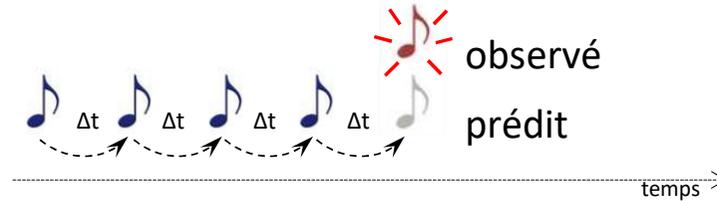


Cinq formes de représentations mentales des séquences

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 ...

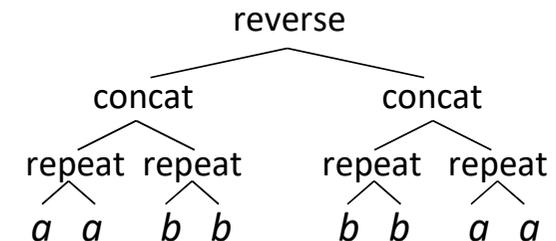
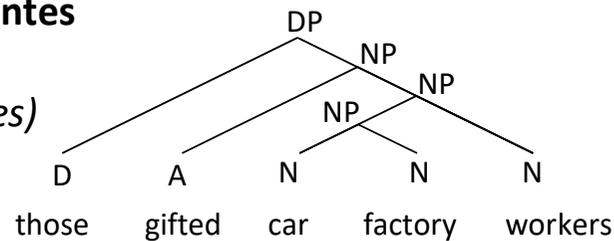
Codage de l'ordre
(*Ordinal knowledge*)



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*)



Introduction à la théorie des langages formels et à la hiérarchie de Chomsky

Fitch, W. T., & Friederici, A. D. (2012). Artificial grammar learning meets formal language theory: an overview. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 367(1598), 1933–55. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0103>

Reconnaissance d'expressions régulières:

```
> filenames = {a.wav, b.doc, c.bmp,
MySong.doc, MySong.wav}
```

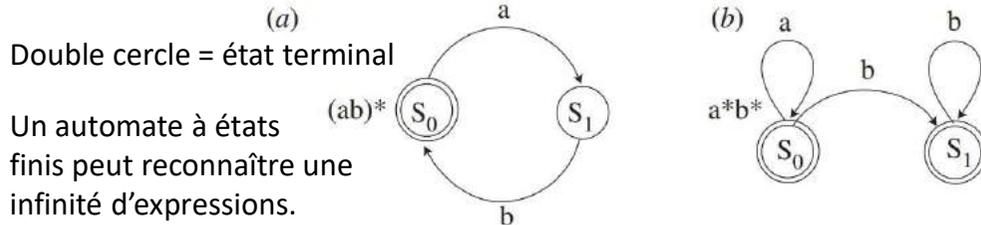
running the function:

```
> ls *.wav filenames
```

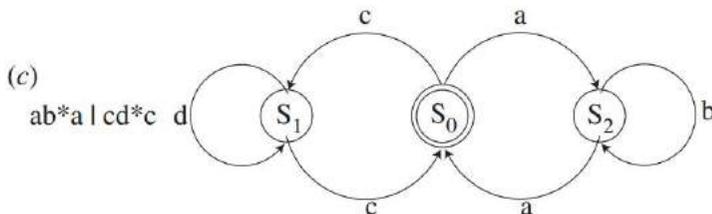
(or the equivalent with dir in DOS) on this set will return the subset

```
> {a.wav, MySong.wav}.
```

Toute expression régulière peut être « reconnue » par un **automate à états finis**.

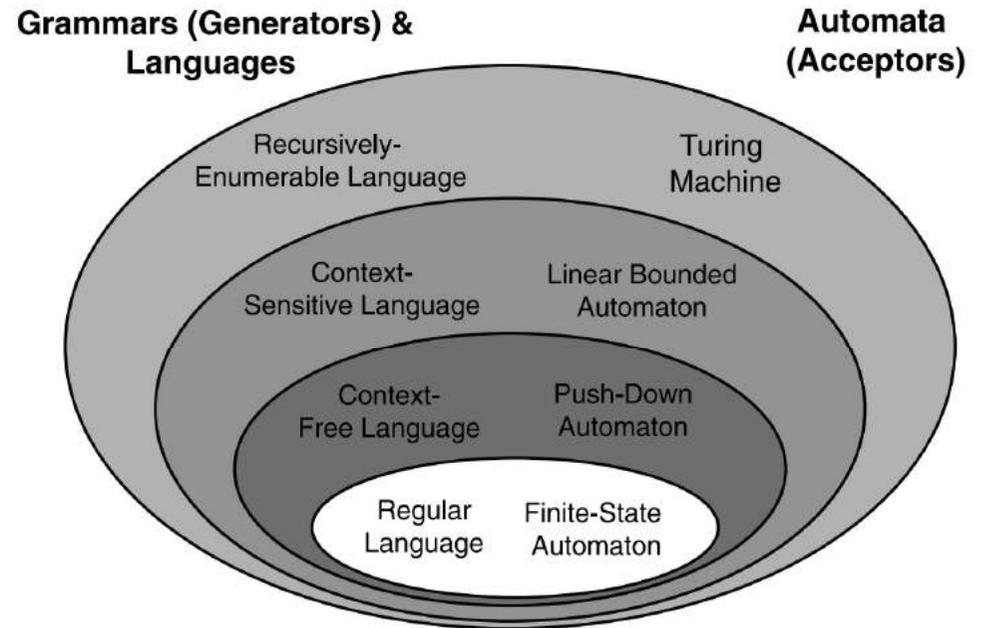


Même certaines dépendances à longue distance peuvent être reconnues.



Certains types d'expressions ne peuvent pas être reconnus, par exemple $ab, aabb, aaabbb\dots = A^n B^n$

Différentes « machines » varient dans leurs capacités computationnelles (en génération comme en reconnaissance):



The Formal Language Hierarchy

Notion de langage « régulier » vs. « supra-régulier ».
 Automate à pile = doté d'une mémoire dont seul le dernier item est accessible.
 Machine de Turing = mémoire infinie (tape) et accessible
 Les langues humaines contiennent des structures supra-régulières.

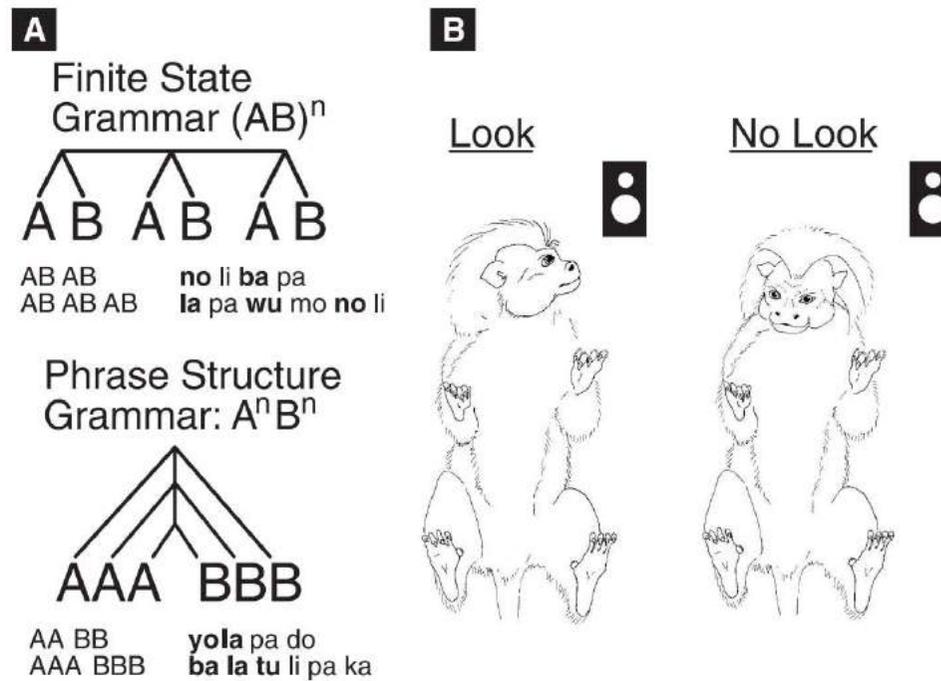
Les singes sont-ils capables d'apprendre un langage supra-régulier?

Fitch, W. T., & Hauser, M. D. (2004). Computational constraints on syntactic processing in a nonhuman primate. *Science*, 303(5656), 377–80.

Contraste entre deux « langages »: $(AB)^n$: langage régulier, reconnue par un automate à états finis.

versus A^nB^n : le plus simple des langages supra-réguliers, engendré par une grammaire indépendante du contexte (CFG). Il ne peut pas être reconnu par un automate à états finis, mais seulement par un automate à pile.

Fig. 1. Stimuli and familiarization-discrimination paradigm. (A) Examples of the stimuli for the FSG and PSG used here. Grammars were matched for length, composition, loudness, and other acoustic features, and testing and evaluation procedures were identical for the two grammars. A and B stimulus classes were spoken by different speakers, a female (denoted by boldface) and male (normal font), and thus differed considerably in pitch, as well as phonetic identity and other acoustic variables. Possible A syllables were {ba di yo tu la mi no wu}. Possible B syllables were {pa li mo nu ka bi do gu}.

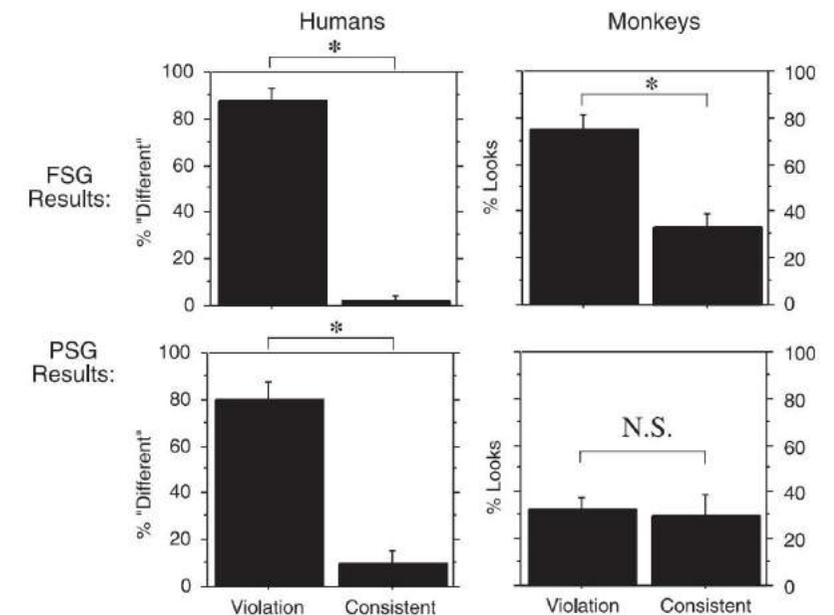


(B) We quantified a cotton-top tamarin's propensity to orient toward a stimuli by evaluating responses to stimuli ("look" or "no look") in videos offline and blind to stimulus identity. The stimuli were either consistent with or violated the rules implicit in a previous set of familiarization strings.

60 séquences de chaque sorte utilisées pour l'habituation

4 conservées comme test de généralisation.

Résultat: les tamarins habitués à AB^n réagissent à l'écoute de A^nB^n , mais l'inverse n'est pas vrai. Les humains réagissent aux deux.



L'imagerie fonctionnelle des deux types de grammaires chez l'homme

Friederici, A. D., Bahlmann, J., Heim, S., Schubotz, R. I., & Anwander, A. (2006). The brain differentiates human and non-human grammars: functional localization and structural connectivity. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 103(7), 2458–63.

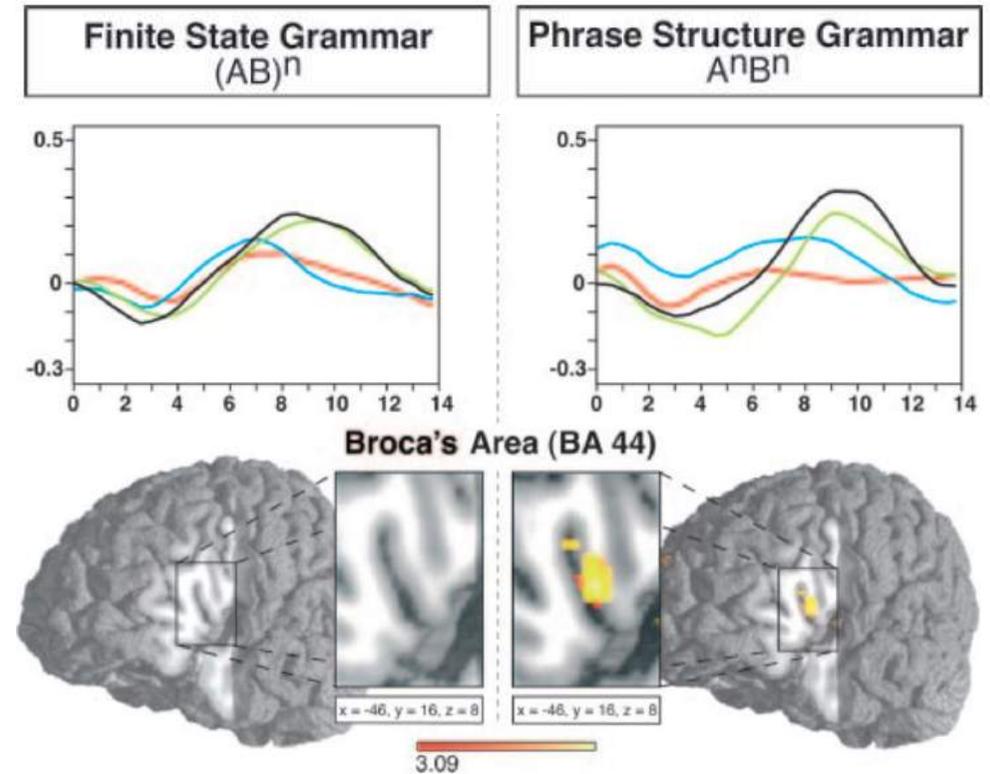
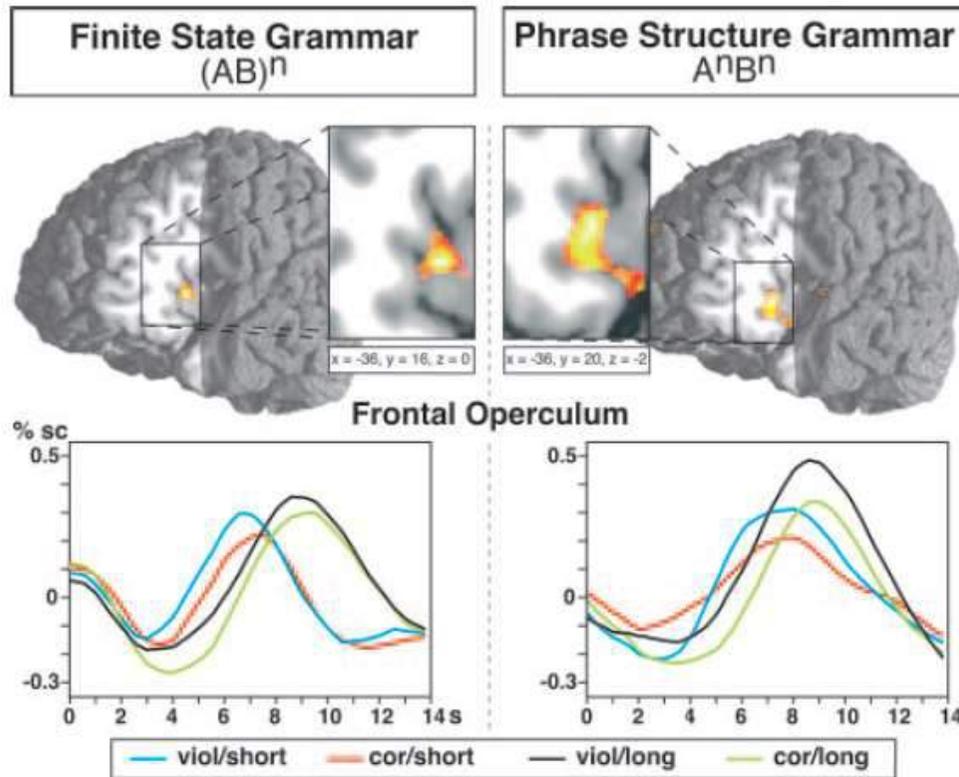
Comparaison de deux groupes de sujets, chacun apprenant l'une des règles (avec des syllabes présentées visuellement).

Les sujets effectuent un jugement de grammaticalité.

On examine les activations évoquées par les violations de la grammaire.

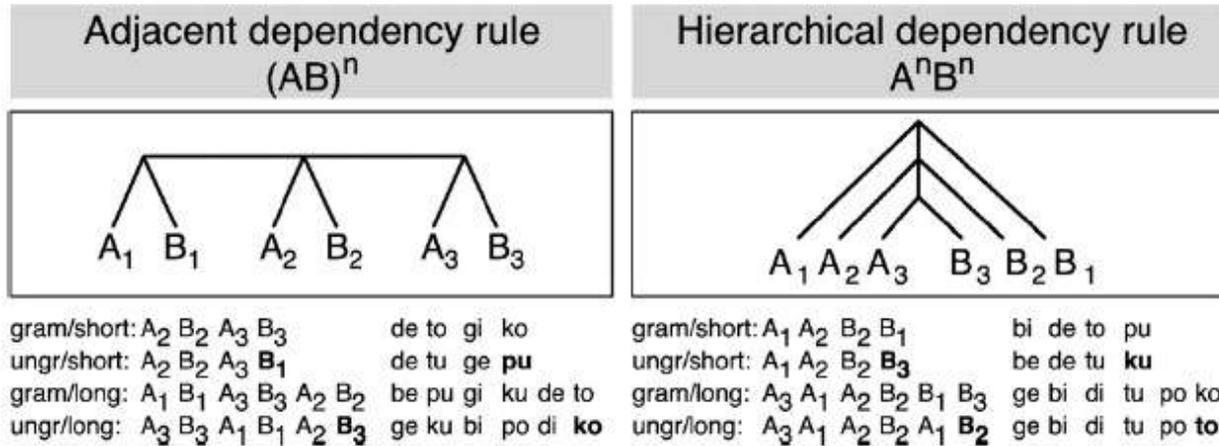
L'operculum frontal [-36 16 0] est activé dans les deux groupes.

L'aire 44 [-46 16 8] uniquement dans le langage supra-régulier



Une version appariée du langage A^nB^n qui oblige à représenter l'enchâssement

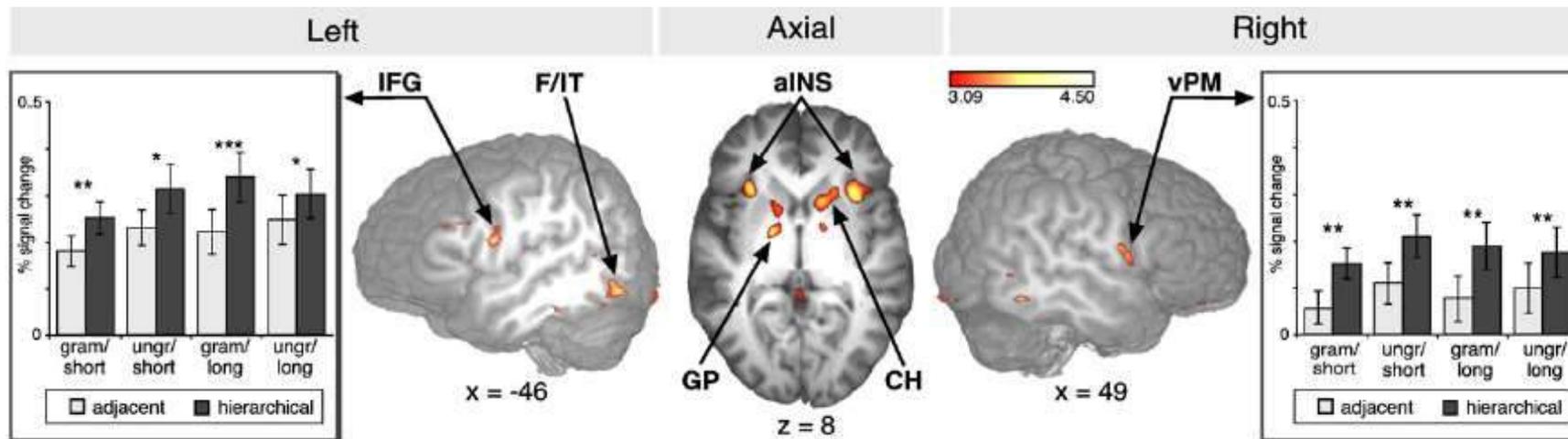
Bahlmann, J., Schubotz, R. I., & Friederici, A. D. (2008). Hierarchical artificial grammar processing engages Broca's area. *Neuroimage*, 42(2), 525–34.



Chaque élément A_i est apparié à un élément B_i dans l'ordre inverse.

“Class A syllables ended with /e/ or /i/ [be, bi, de, di, ge, gi] and class B syllables ended with /o/ or /u/ [po, pu, to, tu, ko, ku].

Dependencies between pairs of A's and B's were coded by the phonetic features [voice] and [place of articulation]: A₁ – B₁ = b – p; A₂ – B₂ = d – t; A₃ – B₃ = g – k “



On trouve une toute petite activation du cortex frontal inférieure gauche, mais plus postérieure qu'auparavant [-46 4 18] et uniquement dans le contraste direct entre les 2 langages – pas d'effet de violation!

Les oiseaux chanteurs comprennent-ils la grammaire A^nB^n ?

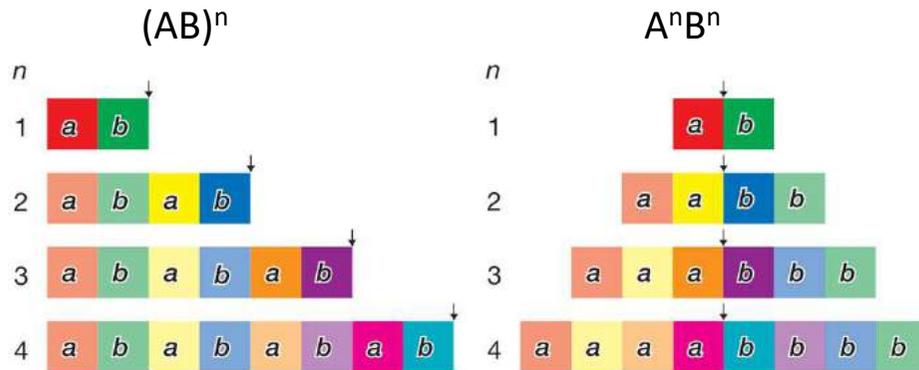
Gentner, T. Q., Fenn, K. M., Margoliash, D., & Nusbaum, H. C. (2006). Recursive syntactic pattern learning by songbirds. *Nature*, 440(7088), 1204–1207. <https://doi.org/10.1038/nature04675>



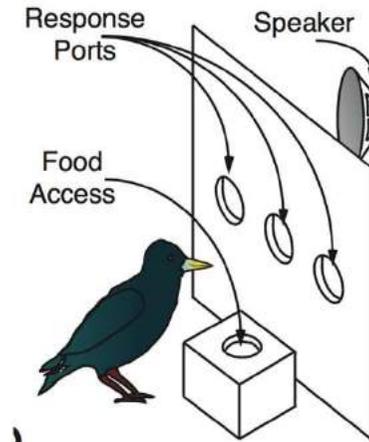
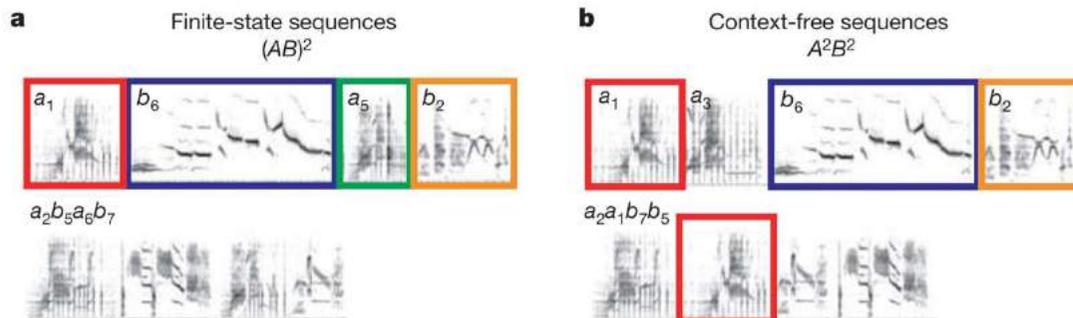
Etourneau sansonnet
(European starling)



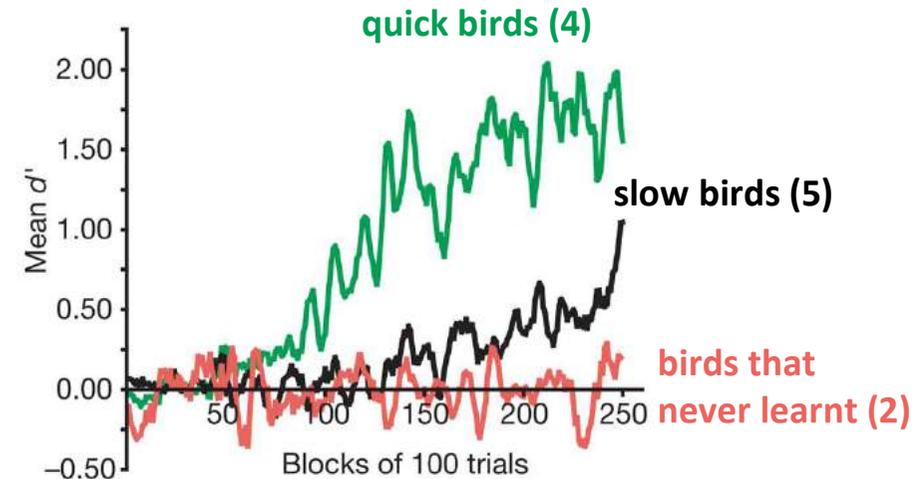
11 oiseaux ont été conditionnés à discriminer deux types de séquences



De longueur 4 ($n=2$)
Combinaisons de 8 sons 'rattle' (classe A) et 8 sons 'marble' (classe B)



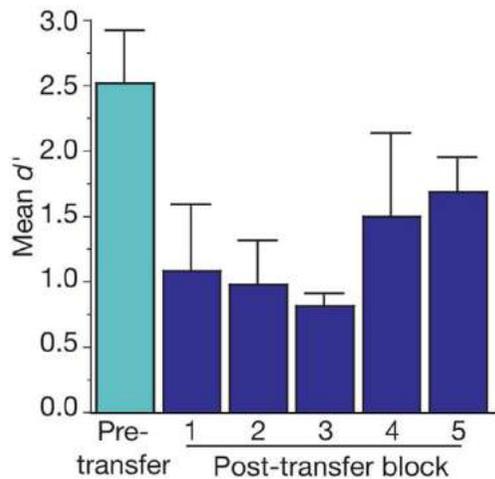
9 oiseaux sur 11
parviennent à classifier 8
séquences versus 8 autres.



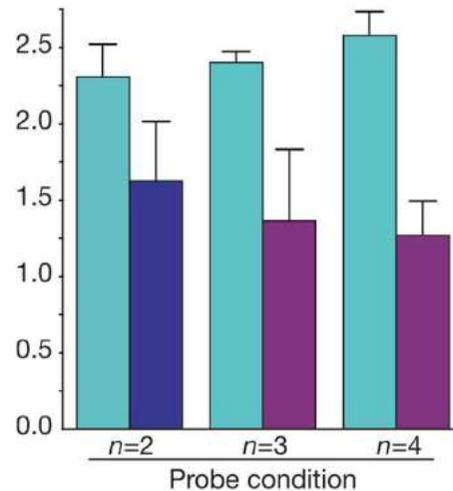
Les oiseaux chanteurs comprennent-ils la grammaire A^nB^n ?

Gentner, T. Q., Fenn, K. M., Margoliash, D., & Nusbaum, H. C. (2006). Recursive syntactic pattern learning by songbirds. *Nature*, 440(7088), 1204–1207. <https://doi.org/10.1038/nature04675>

Les 4 meilleurs oiseaux généralisent à 16 nouvelles séquences de même longueur (dans lesquels ils continuent d'être renforcés; 100 essais/bloc).
Noter tout de même que la performance est bien moins bonne.



Les oiseaux généralisent également à des séquences de longueur plus grande qui suivent la même règle.



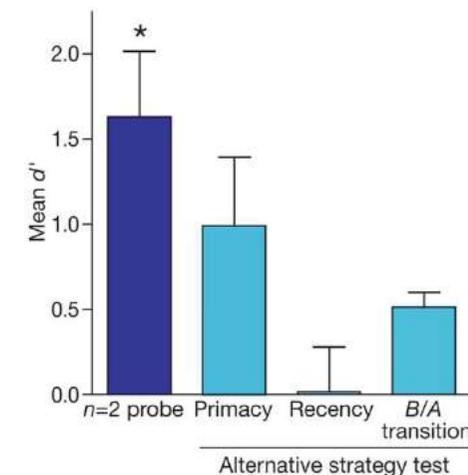
Les oiseaux ont-ils juste appris les séquences $(AB)^n$, ce qui pourrait suffire à les discriminer des autres?
Non car leur comportement diffère lorsqu'on les expose à des séquences qui n'appartiennent à aucune des deux catégories (AAAA, BBBB, ABBA, BAAB): ils ne les traitent ni comme $(AB)^n$ ni comme A^nB^n

De même, ils ne généralisent pas à des séquences A^*B^* où les deux nombres diffèrent.

Les auteurs suggèrent que cela permet de rejeter plusieurs hypothèses alternatives:

- Utilisation du début de la séquence (« primauté »)
- Utilisation de la fin de la séquence (« récence »)
- Utilisation de bigrammes

	A^nB^n Context-free grammar	$(AB)^n$ Finite-state grammar
Primacy	AAAA	ABBA
Recency	BBBB	BAAB
B/A transitions	AAAA	BAAB

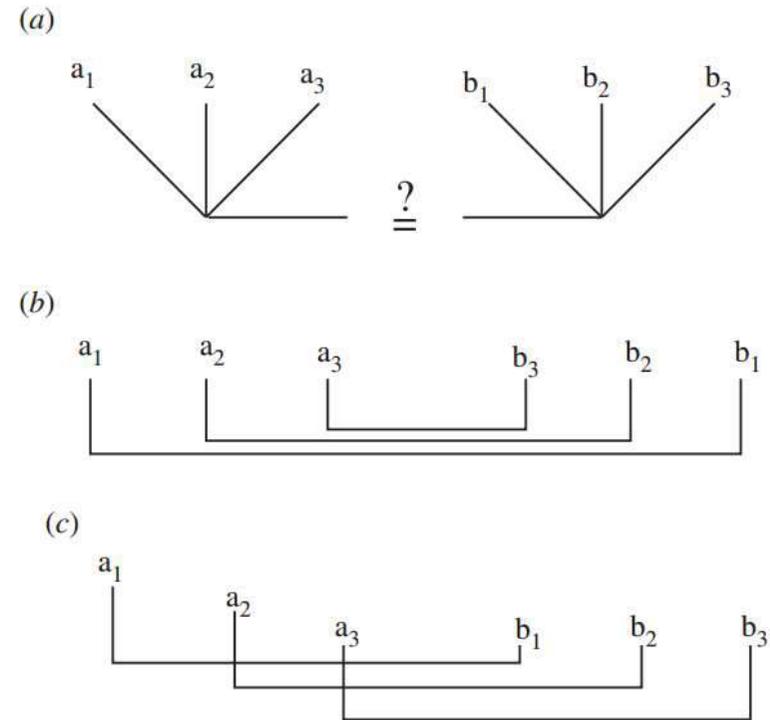


Critiques de l'interprétation de l'expérience de Gentner et al.

Fitch, W. T., & Friederici, A. D. (2012). Artificial grammar learning meets formal language theory: an overview. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 367(1598), 1933–55. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0103>

La grammaire A^nB^n est supra-régulière mais n'implique pas la récursion

- Telle qu'elle est utilisée par Fitch et al. et par Gentner et al, la grammaire A^nB^n n'exige aucun appariement explicite de chaque A avec un B spécifique
- Il existe donc de nombreuses interprétations du résultat observé:
 - Les animaux se contentent-ils de compter les A et les B? C'est toujours une opération supra-régulière, mais qui ne nécessite aucune hiérarchie ou récursion.
 - Ou bien de les représenter sous forme enchâssée (le plus naturel si on dispose d'une pile)
 - Ou bien sous la forme de « dépendances croisées » qui ne peuvent être accomplies par un automate à pile et nécessitent au moins une grammaire sensible au contexte.



La similarité acoustique a pu biaiser les jugements des animaux

- Les stimuli choisis pour représenter les classes A et B ne sont pas arbitraires, mais présentent des ressemblances acoustiques
- En conséquence, les séquences correctes (même nouvelles) présentent plus de similarité acoustiques avec les anciennes que les violations.



Les oiseaux chanteurs comprennent-ils l'enchâssement?

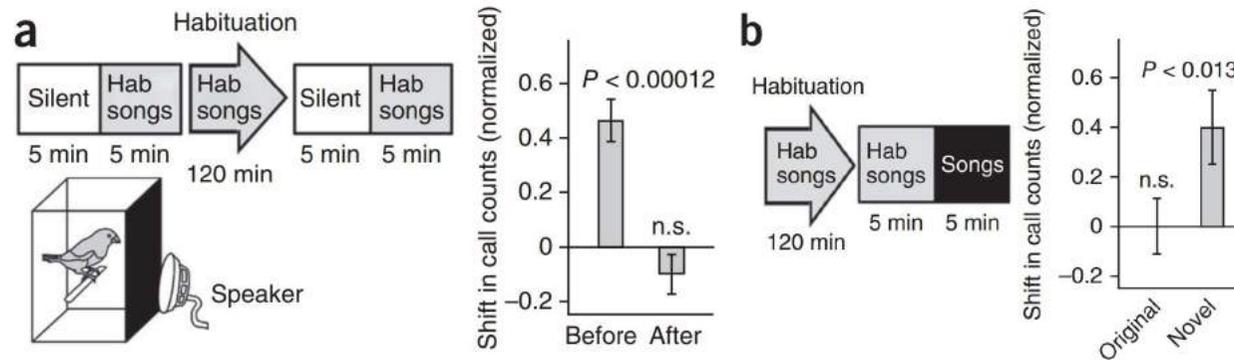
Abe, K., & Watanabe, D. (2011). Songbirds possess the spontaneous ability to discriminate syntactic rules. *Nature Neuroscience*, 14(8), 1067–1074.



Moineau du Japon
(Bengalese Finch)

Méthode d'habituation :
après avoir écouté des chants durant
une longue période d'habituation, les
oiseaux cessent de chanter
Mais ils réagissent de nouveaux
chants.

Utilisation d'une grammaire
« indexée » de type $A_1A_2B_2B_1$



Habituation: Les oiseaux ont d'abord été
exposés à des séquences de type A_1CB_1 ou
 $A_1A_2CB_2B_1$, où chaque classe A et B comprend
4 syllabes naturelles, allouées et appariées
de façon arbitraire

Tests divers:

- Généralisation (n=2 , COR) et extension à
n = 3 (correct embedding, CES)
- Violations « A-F pairing » (AFP), « ACF
sequence disruption », anomalous
embedding (AES et AES2)
- Random: tout est perturbé

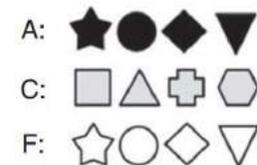
Center-embedding language

$S \rightarrow AP + BP$

$AP \rightarrow A$

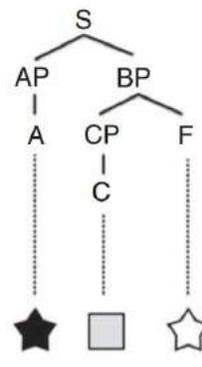
$BP \rightarrow CP + F$

$CP \rightarrow C \text{ or } AP' + BP'$

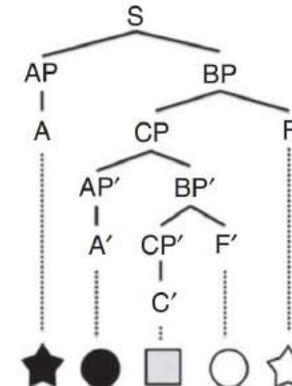


Familiarization strings:

Non-embedded



Embedded



Test strings:

COR: ◆ ★ □ ☆ ◇

AFP: ◆ ★ □ ○ ◇

ACF: ◆ ★ ☆ □ ◇

Random: ◇ □ ☆ ◆ ★

CES: ◆ ★ ● □ ○ ☆ ◇

AES: ◆ ★ ● □ ◇ ○ ☆

AES2: ◆ ◇ ● □ ○ ★ ☆

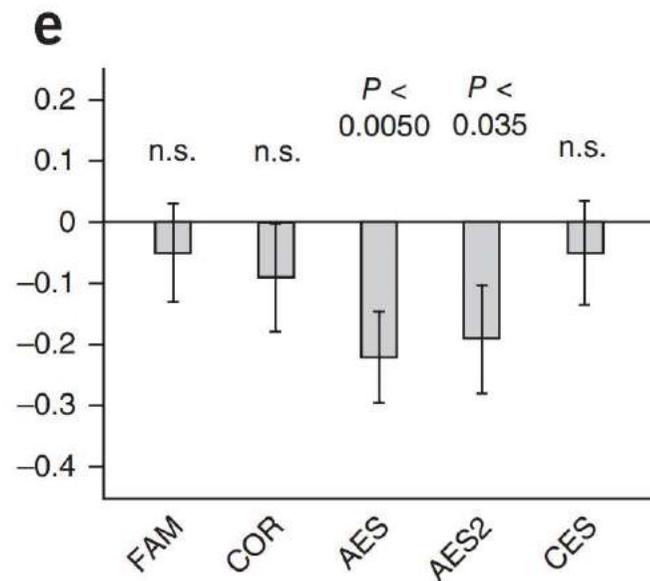
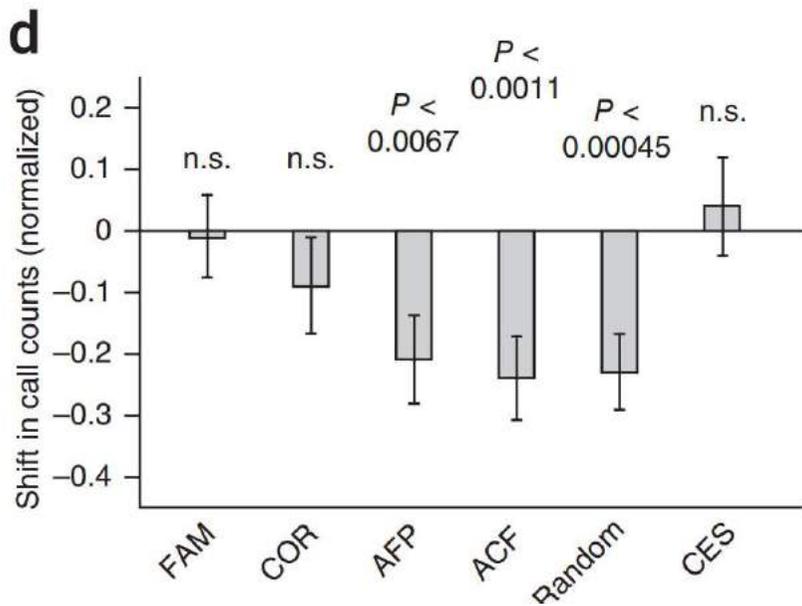
Les oiseaux chanteurs comprennent-ils l'enchâssement?

Abe, K., & Watanabe, D. (2011). Songbirds possess the spontaneous ability to discriminate syntactic rules. *Nature Neuroscience*, 14(8), 1067–1074.



Moineau du Japon (Bengalese Finch)

Les oiseaux généralisent aux extensions de la grammaire apprise, et répondent différemment à toutes les violations. (de façon totalement inexplicée, à présent les oiseaux *cessent* de chanter en réponse aux violations...)



Test strings:

- COR:
- AFP:
- ACF:
- Random:
- CES:
- AES:
- AES2:

“our results cast doubts on what is currently considered to be a unique characteristic of human language”

Une critique sévère de l'article de Abe et Watanabe

Beckers, G. J. L., Bolhuis, J. J., Okanoya, K., & Berwick, R. C. (2012). Birdsong neurolinguistics: songbird context-free grammar claim is premature. *Neuroreport*, 23(3), 139–145. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e32834f1765>

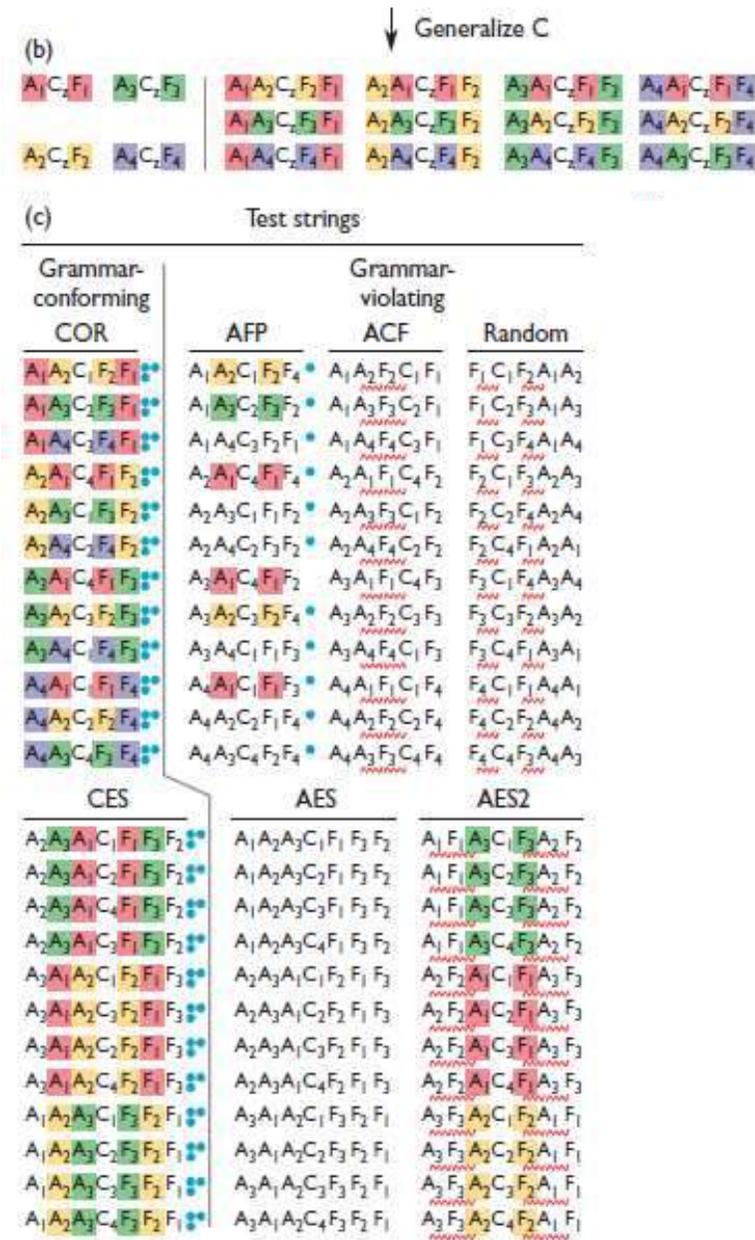
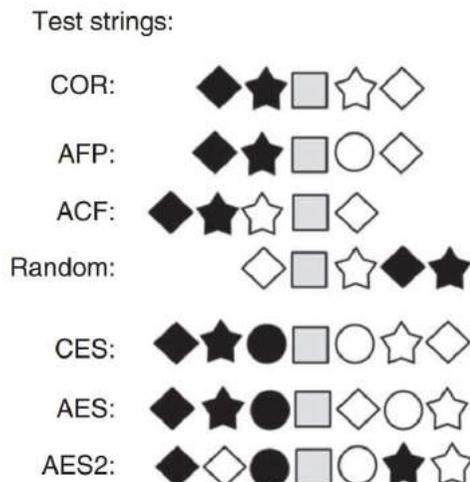
Selon Beckers et al.,

- Toutes les nouvelles conditions grammaticales, qui testent la généralisation, ont une grande ressemblance acoustique avec les stimuli d'habituation
- Et inversement, toutes les conditions où la grammaire est violée diffèrent des séquences d'habituation, à la fois globalement et dans les probabilités de transition.

● Is identical to, or contains, a length-5 familiarization string, allowing for a mismatch in maximally one syllable
 ■ Bigram violation

Ce qu'il faudrait contrôler :

- Conserver une « vraie » réserve de séquences pour la généralisation, bien différentes des autres.
- Vérifier que les séquences de généralisation et de violation ne diffèrent pas en :
 - fréquence absolue
 - fréquence positionnelle
 - probabilité de transition



Revue critique des grammaires artificielles étudiées chez l'animal

Beckers, G. J. L., Bolhuis, J. J., Okanoya, K., & Berwick, R. C. (2012). Birdsong neurolinguistics: songbird context-free grammar claim is premature. *Neuroreport*, 23(3), 139–145.

<https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e32834f1765>

Beckers, G. J. L., Berwick, R. C., Okanoya, K., & Bolhuis, J. J. (2016). What do animals learn in artificial grammar studies? *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*.

<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.12.021>

Fitch, W. T., & Friederici, A. D. (2012). Artificial grammar learning meets formal language theory: an overview. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 367(1598), 1933–55. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0103>

Ten Cate, C. (2017). Assessing the uniqueness of language: Animal grammatical abilities take center stage. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(1), 91–96. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1091-9>

Wilson, B., Marslen-Wilson, W. D., & Petkov, C. I. (2017). Conserved Sequence Processing in Primate Frontal Cortex. *Trends in Neurosciences*, 40(2), 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2016.11.004>

van Heijningen, C. A. A., de Visser, J., Zuidema, W., & ten Cate, C. (2009). Simple rules can explain discrimination of putative recursive syntactic structures by a songbird species. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(48), 20538–20543.

<https://doi.org/10.1073/pnas.0908113106>

Ravignani, A., Westphal-Fitch, G., Aust, U., Schlumpp, M. M., & Fitch, W. T. (2015). More than one way to see it: Individual heuristics in avian visual computation. *Cognition*, 143, 13–24.

<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.05.021>

La similarité acoustique est mal contrôlée.

La maîtrise de la grammaire A^nB^n n'implique pas une capacité de récursion

Les conclusions fondées sur les réponses moyennes sont trompeuses. En fait, chaque oiseau utilise une stratégie qui lui est propre, de bas niveau, sans comprendre la règle. Les kéas entraînés avec A^nB^n se contentent de détecter si la séquence se termine par BB. Ceux entraînés avec $(AB)^n$ ne détectent que la présence de la transition BA. Les pigeons ont des stratégies plus variées mais toujours très simples.

Et chez les primates? La *production* spontanée de séquences A^nB^n

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(1), 180–184.

On commence par apprendre aux babouins des paires A1-B1, A2-B2, etc.

Deux formes s'affichent, et les babouins doivent appuyer dans le bon ordre

Dans la seconde partie, on teste la capacité d'enchâssement:

- On présente d'abord A1 et un distracteur
- Puis A2 et un autre distracteur
- Puis B1, B2 et un distracteur (test 1)
- Ou bien B1, B2, B3 et un distracteur (test 2)
- Les animaux sont récompensés lorsqu'ils touchent A1, puis A2, puis B1 et B2 dans n'importe quel ordre.

Résultat:

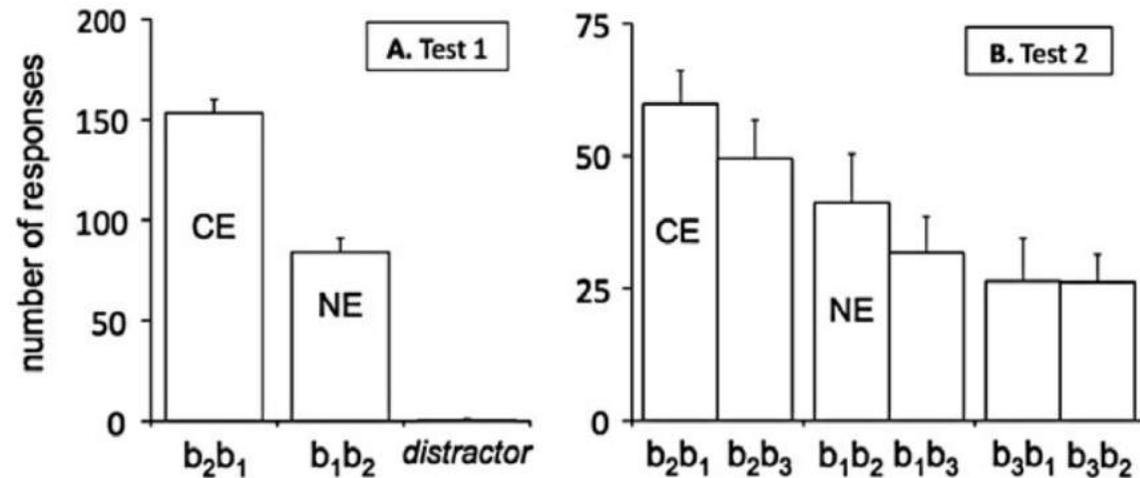
Les animaux choisissent spontanément l'ordre « enchâssé » c'est-à-dire A1 A2 B2 B1

Conclusion:

Les animaux disposent d'une mémoire (pile) d'au moins deux éléments.

L'effet de récence en mémoire induit spontanément les animaux à produire des séquences qui ont l'air enchâssées.

Twelve shapes (e.g., Δ , Φ , ϑ , Γ , Σ , Ω , $*$, \ni , ζ , $\&$, λ) were used to create six arbitrary pairs of stimuli, hereafter noted a_1b_1 , a_2b_2 , ..., a_6b_6 . A different set of 10 neutral shapes served as visual distractors (Υ , \downarrow , ∇ , \times , \square , \blacksquare , \blacktriangleright , \blacktriangleleft , \curvearrowright , \curvearrowleft).



Les babouins comprennent-ils la grammaire 'en miroir' ?

Raphaëlle Malassis, Stanislas Dehaene, Joël Fagot, travaux en cours

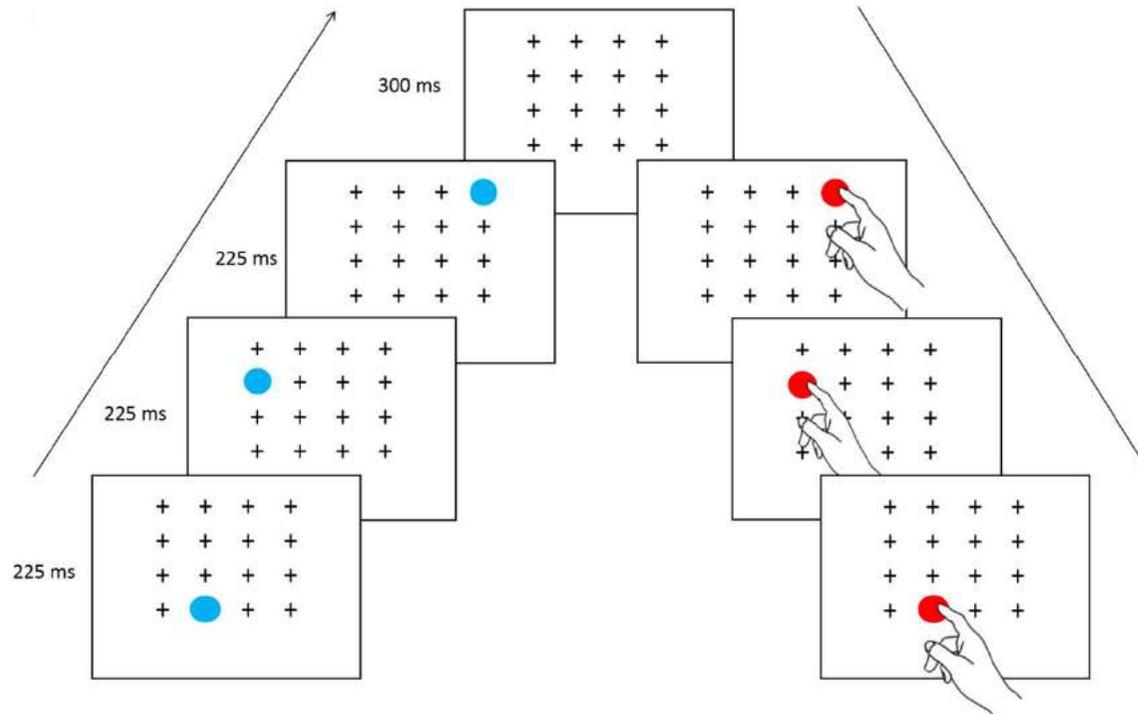
La grammaire en miroir est formée de n'importe quelle séquence, suivi de l'ordre inverse: par exemple ABCDDCBA ou AABA ABAA. Elle est supra-régulière, mais facile à apprendre s'il l'on dispose d'une pile – mais le comptage ne suffit pas.

Les animaux la comprennent-ils ? Ici, utilisation d'une tâche d'**apprentissage implicite**:

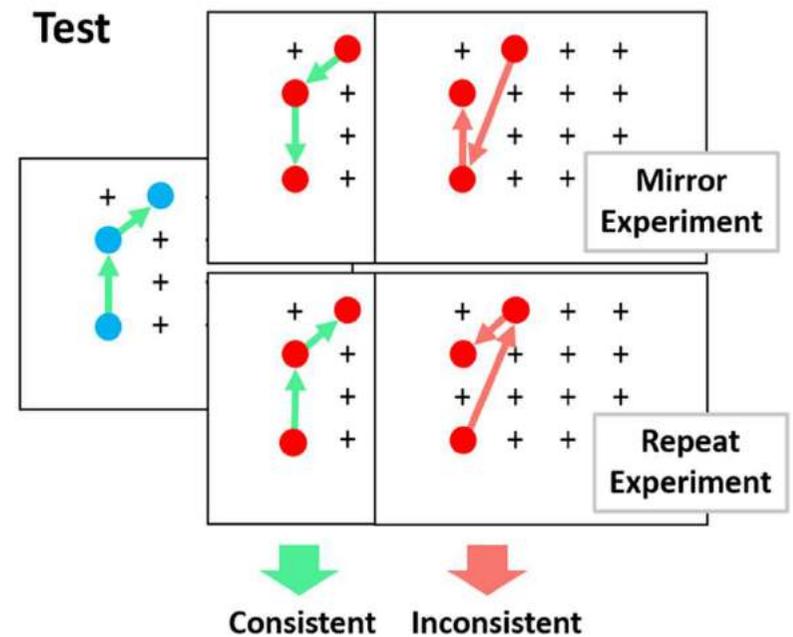
Présentation d'une séquence, suivie d'une seconde que l'animal doit suivre de la main.

Selon les blocs, la seconde séquence est

- (1) presque toujours une répétition de la première;
- (2) presque toujours une répétition en miroir;
- (3) dans certains blocs de contrôle, un mélange homogène des deux



Comme d'habitude, on garde en réserve certaines séquences qui sont présentées soit dans le bon ordre (123) soit dans un ordre incompatible (132)



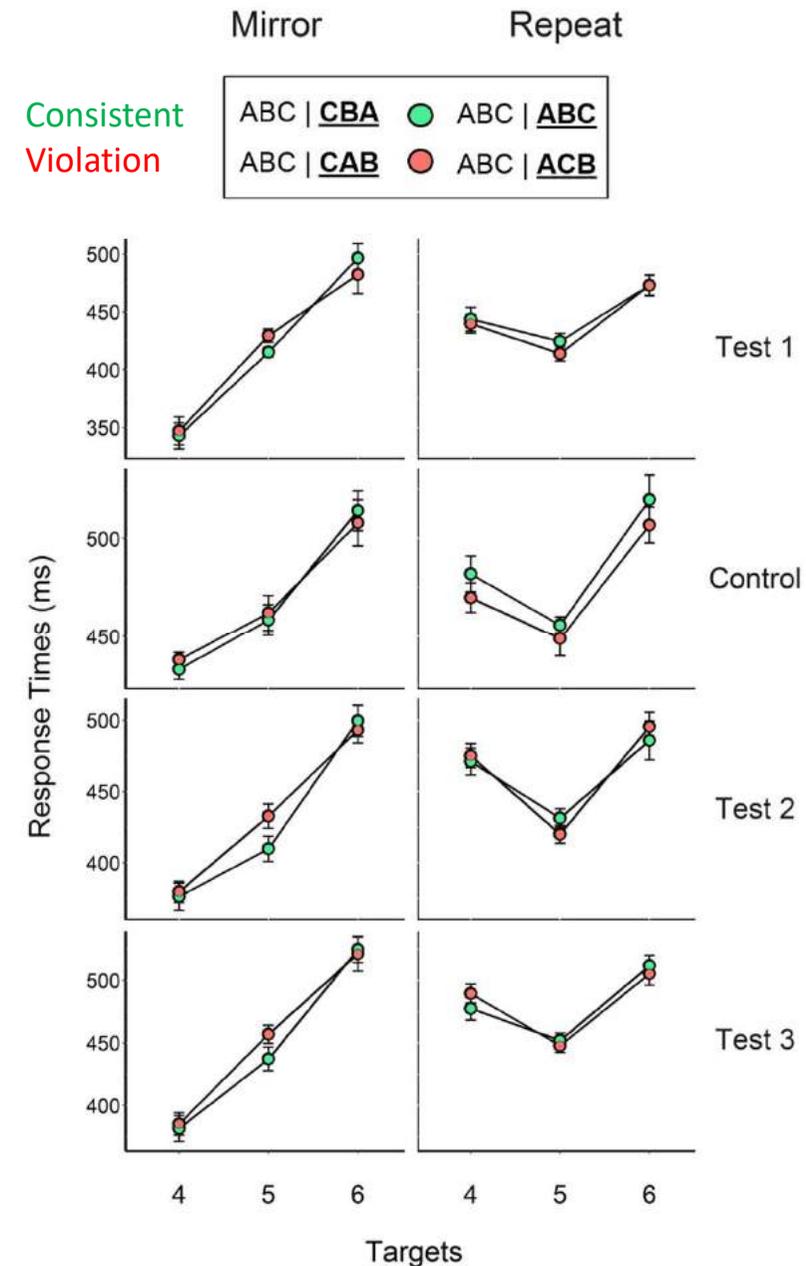
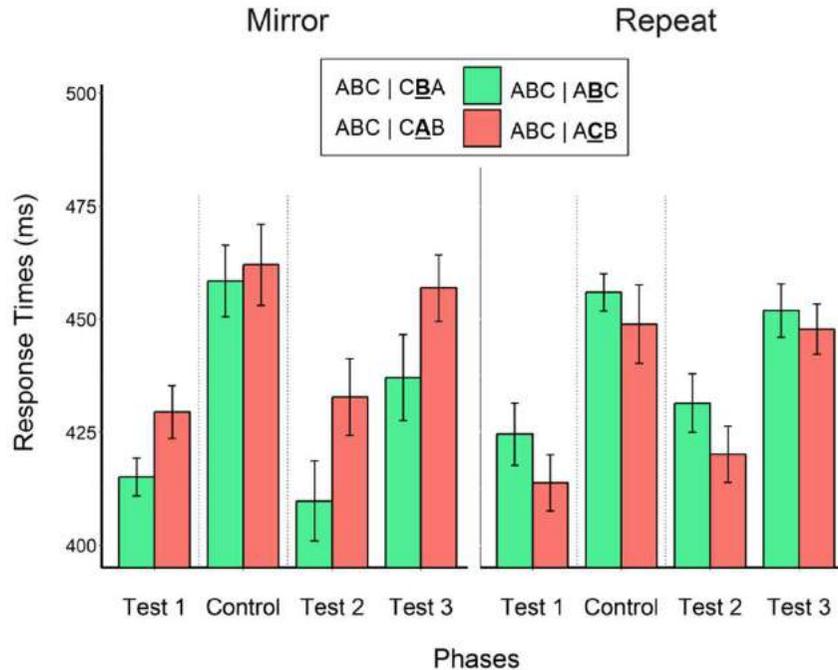
Les babouins comprennent-ils les séquences 'en miroir' ?

Raphaëlle Malassis, Joël Fagot, travaux en cours

Résultats:

- Les temps de réponse varient beaucoup selon le type de bloc et la position (1^{er}, 2nd ou 3^{ème} appui).
- Pas d'effet pour la répétition (petite tendance à un effet de récence).
- Crucialement, les sujets sont plus lents pour le second item lorsque sa position viole la règle de répétition en miroir.

Conclusion: les babouins semblent comprendre (et généraliser) le concept de « séquence en miroir » -- ce qui nécessite, au minimum, une pile (*stack*).



Les singes macaques peuvent-ils *produire* une séquence « en miroir » de mémoire ?

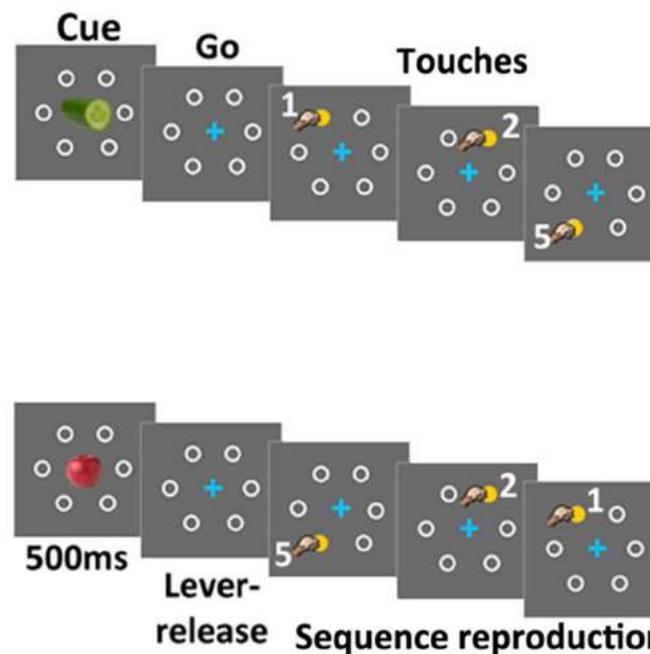
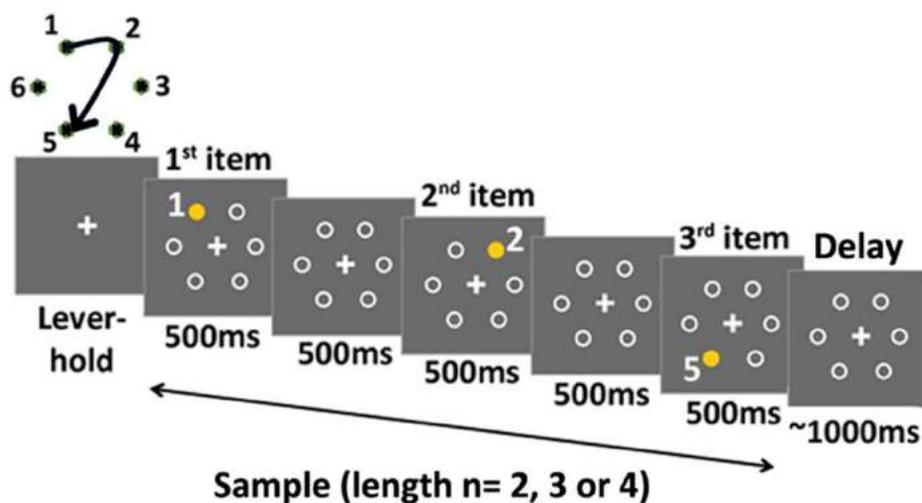
Liping Wang est parvenu à apprendre à des singes à *produire* ce type de séquence dans le domaine spatial, de façon explicite et non plus seulement implicite.

La tâche de production présente de nombreux avantages:

- niveau de hasard très bas
- vérification que l'animal maîtrise l'ensemble de la séquence et pas juste une transition spécifique.



Liping Wang



Repeat



Mirror



Répétition



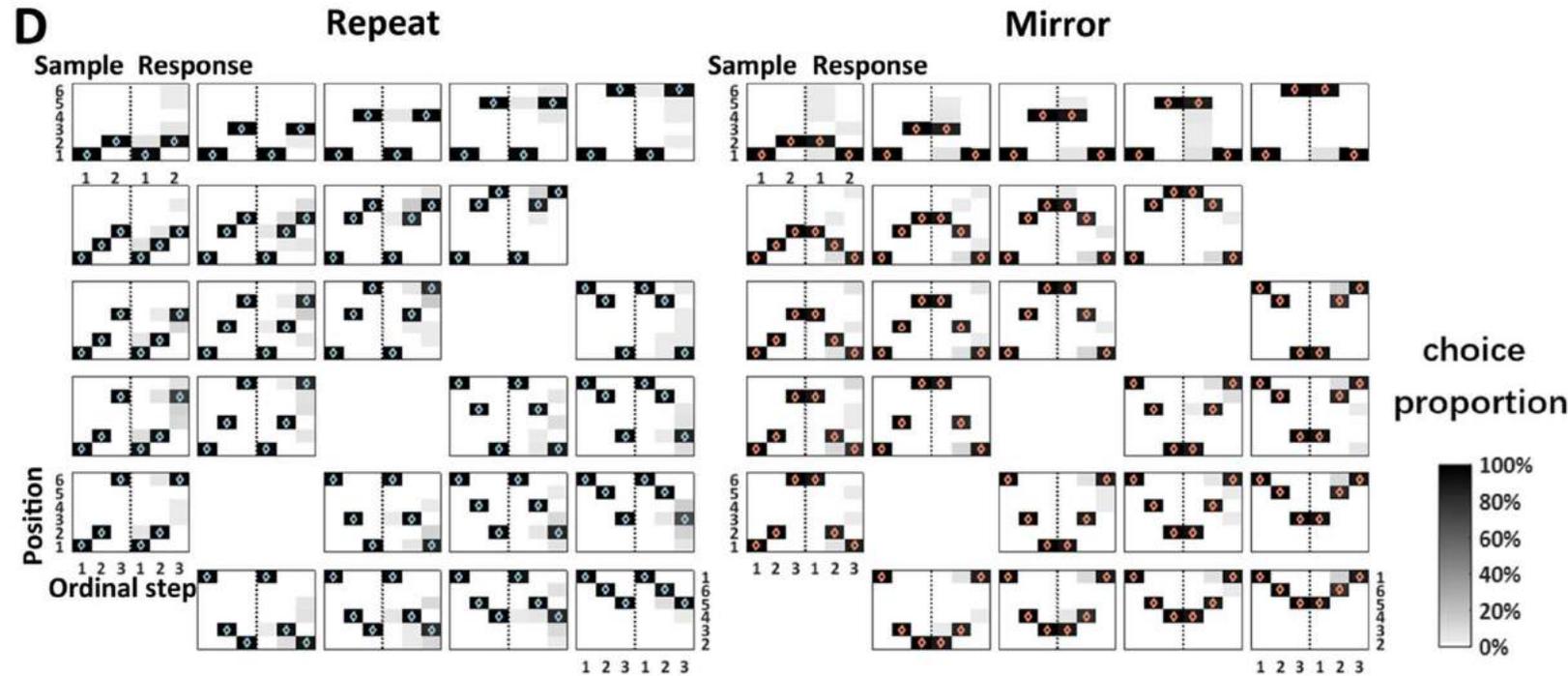
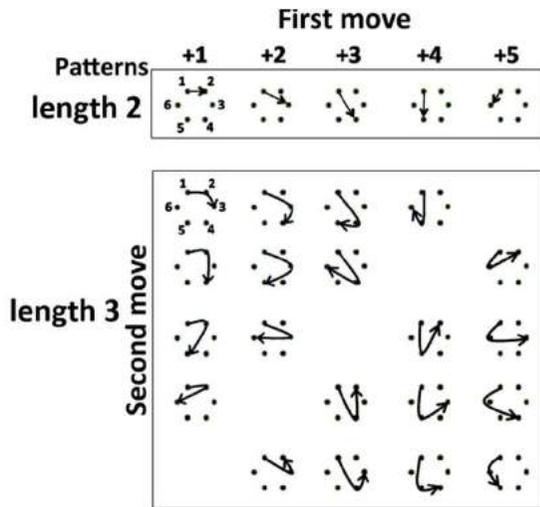
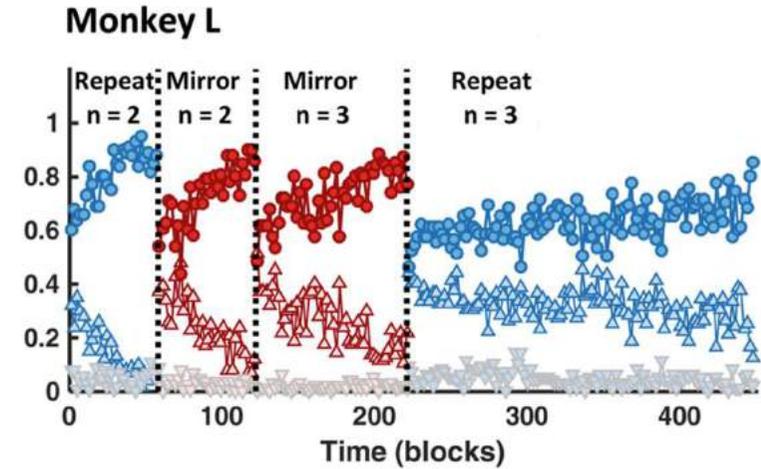
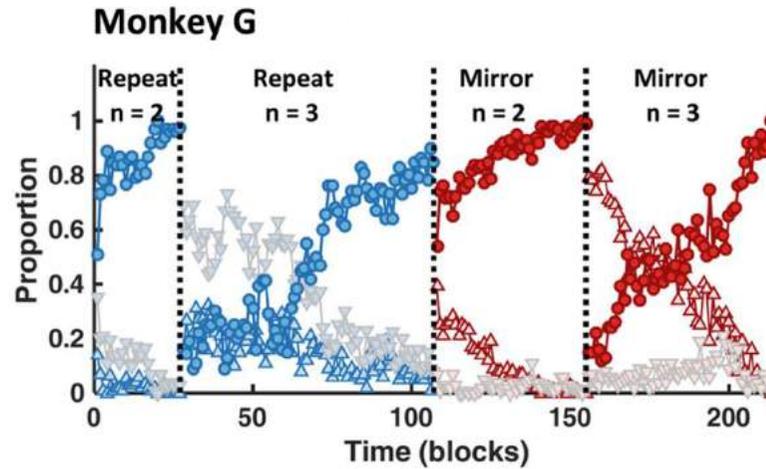
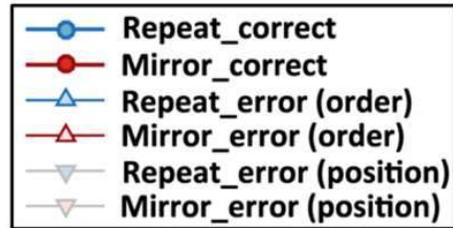
Miroir



Passage aléatoire d'une règle à l'autre



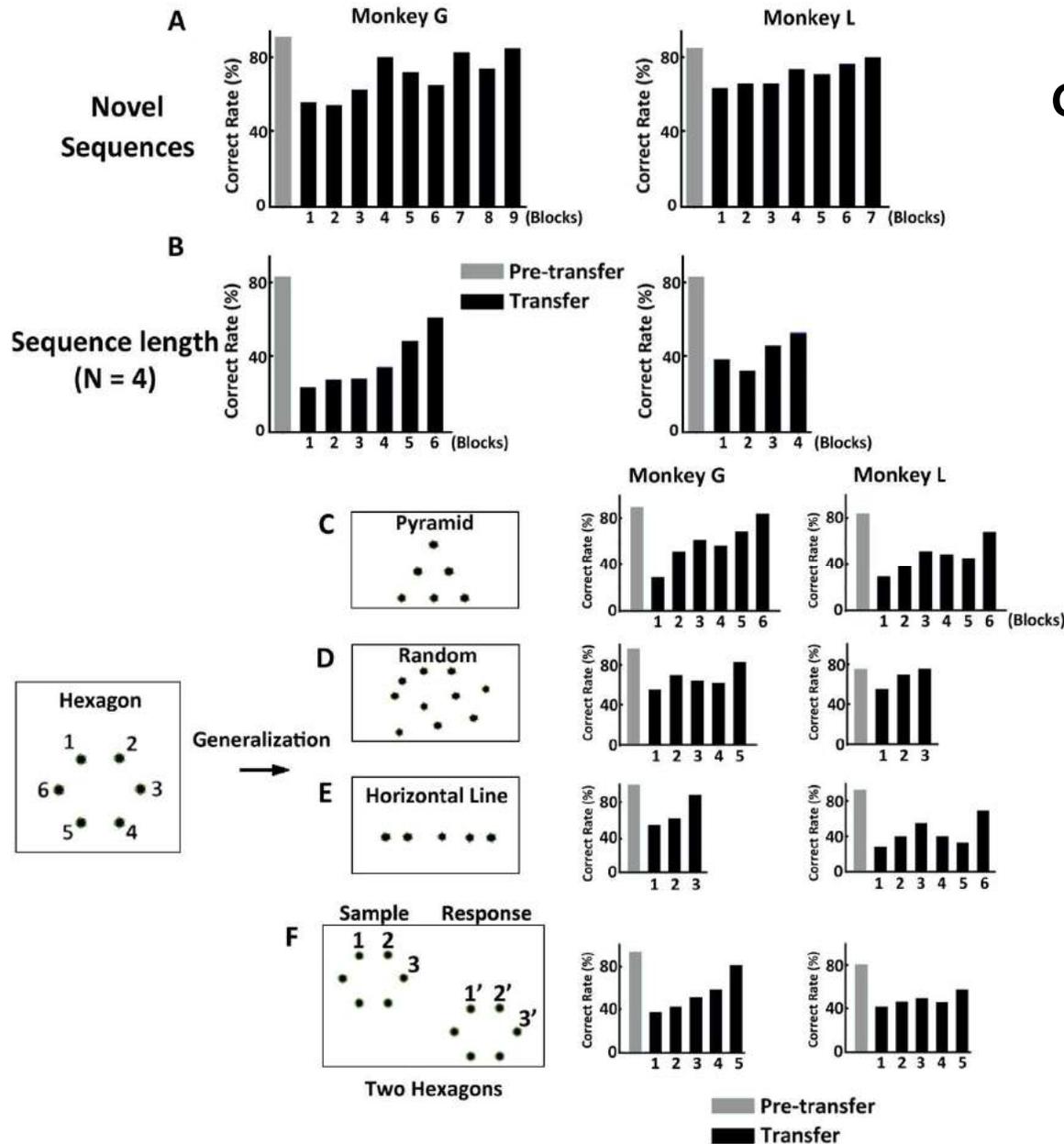
Performance quasi-parfaite avec toutes les séquences possibles



Généralisation



Généralisation à de nouvelles séquences



Les performances des singes ne peuvent pas être imputées à la simple mémorisation de toutes les séquences possibles, ou à d'autres raccourcis – elles impliquent une réelle compréhension du concept de « répétition en miroir ».

Les animaux maîtrisent-ils réellement une « grammaire » avec « enchâssement central » (*center embedding*)? Pas forcément.

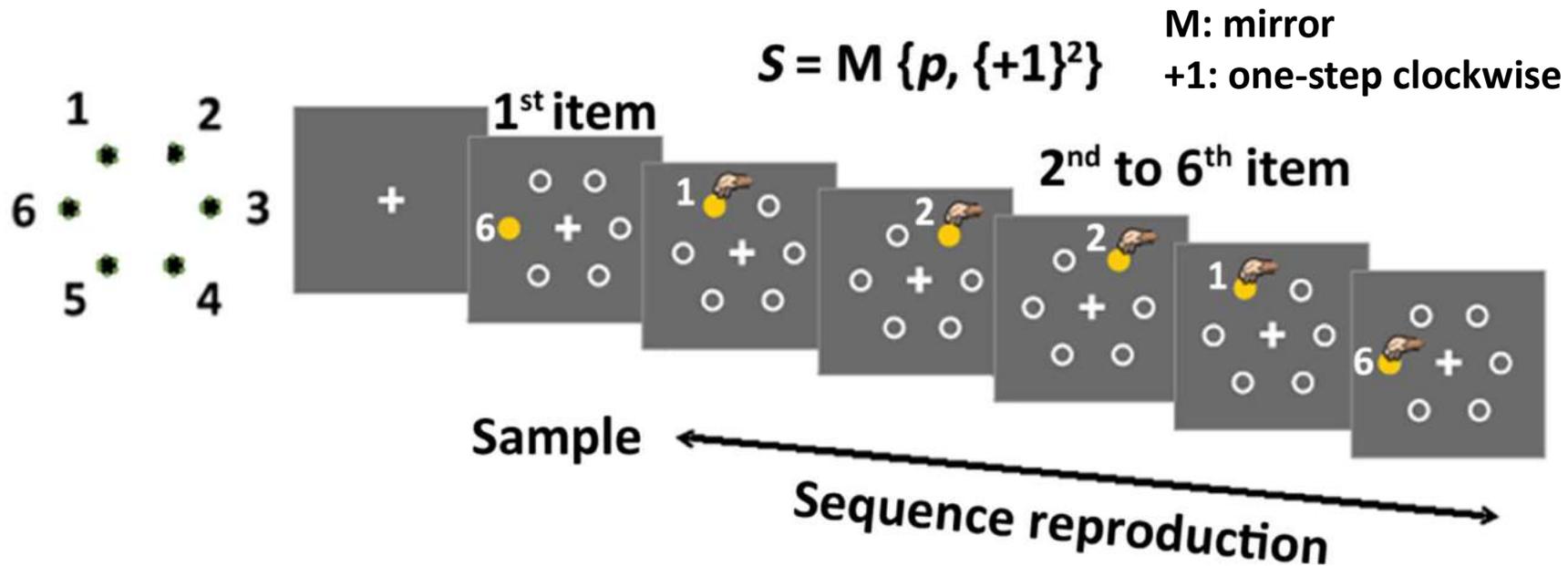
Au minimum, pour produire les séquences, ils ne peuvent se fonder simplement sur un automate à états finis, mais doivent disposer d'un « automate à pile », capable d'enregistrer une séquence, et ensuite de la remémorer dans l'ordre inverse (*last-in-first-out*).

Les singes peuvent-ils enchâsser plusieurs séquences pour former un « programme » ?

On donne aux animaux uniquement le premier élément de la séquence, et ils doivent

1. Produire deux autres éléments consécutifs
2. Renverser toute cette séquence

Par exemple 123|321, 345|543





Pre-generalization



Les singes peuvent-ils enchâsser plusieurs séquences pour former un « programme » ?

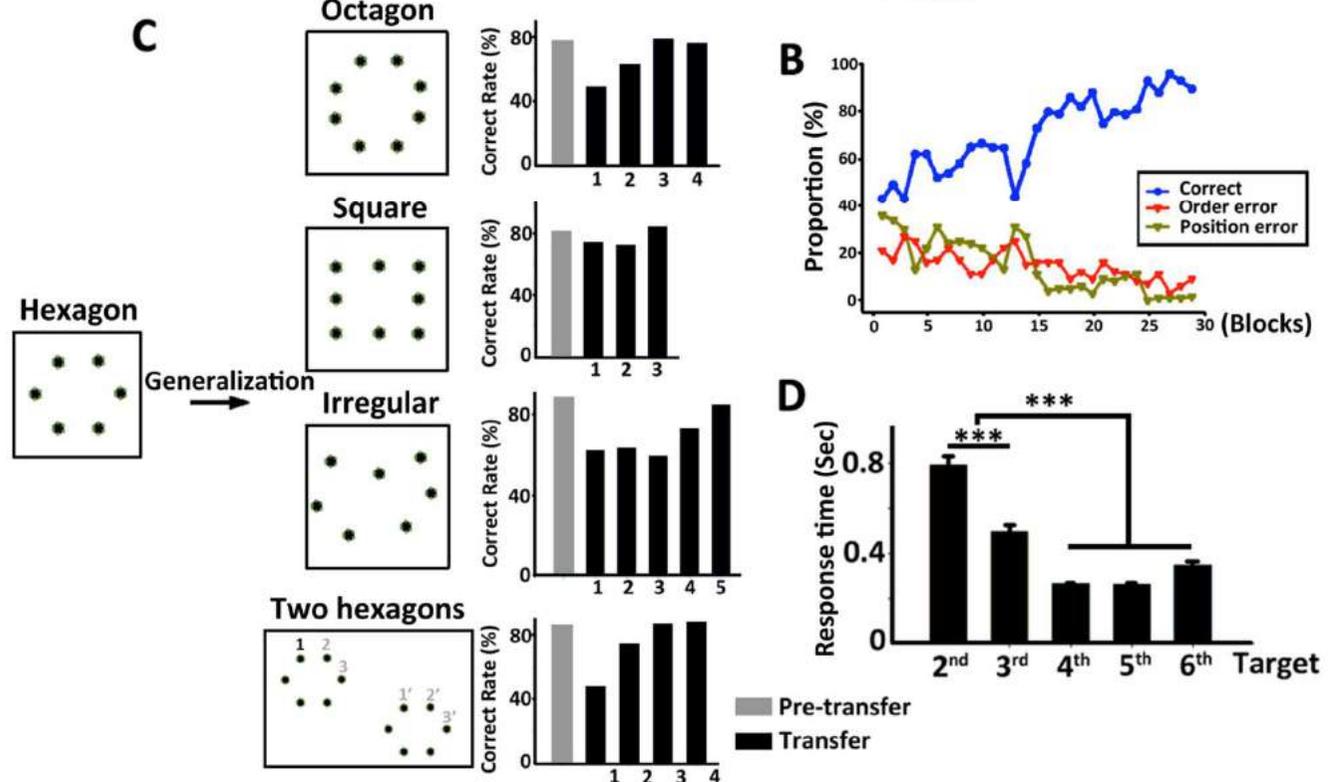
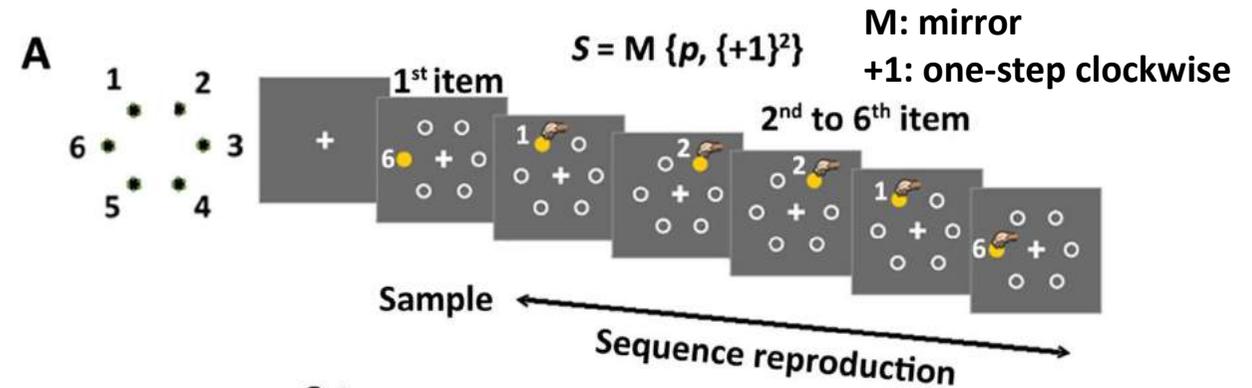
On donne aux animaux uniquement le premier élément de la séquence, et ils doivent

1. Produire deux autres éléments consécutifs
2. Renverser toute cette séquence

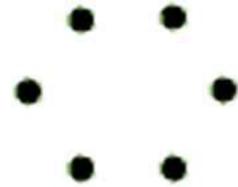
Par exemple 123 | 321, 345 | 543

Les animaux parviennent à apprendre ce « programme » sur l'hexagone (B), et à le généraliser ensuite à des formes nouvelles (C)

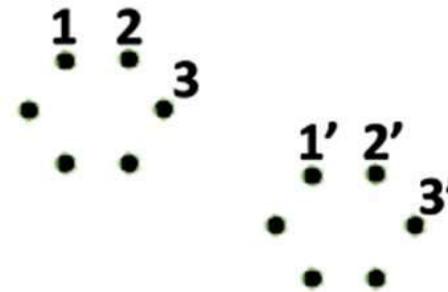
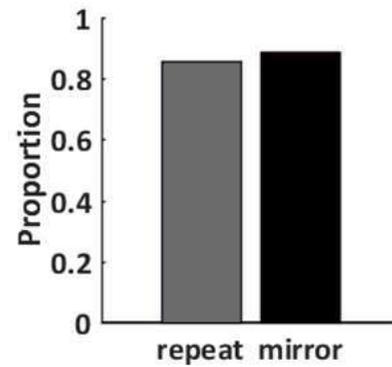
Les temps de réaction (D) suggèrent un traitement en deux étapes.



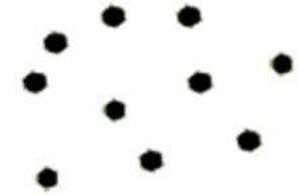
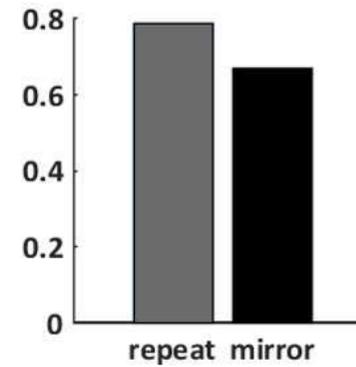
Et chez l'enfant de maternelle (5-6 ans)?



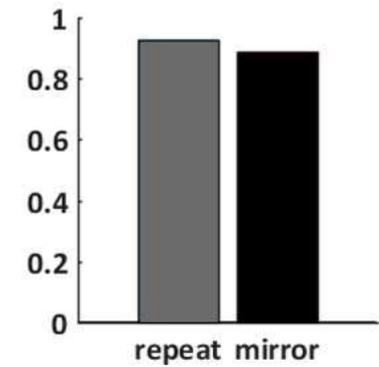
Hexagon



Two Hexagons



Random Positions



Performances excellentes... au bout de 5 à 10 essais d'entraînement, contre 25000 à 50000 chez le singe !

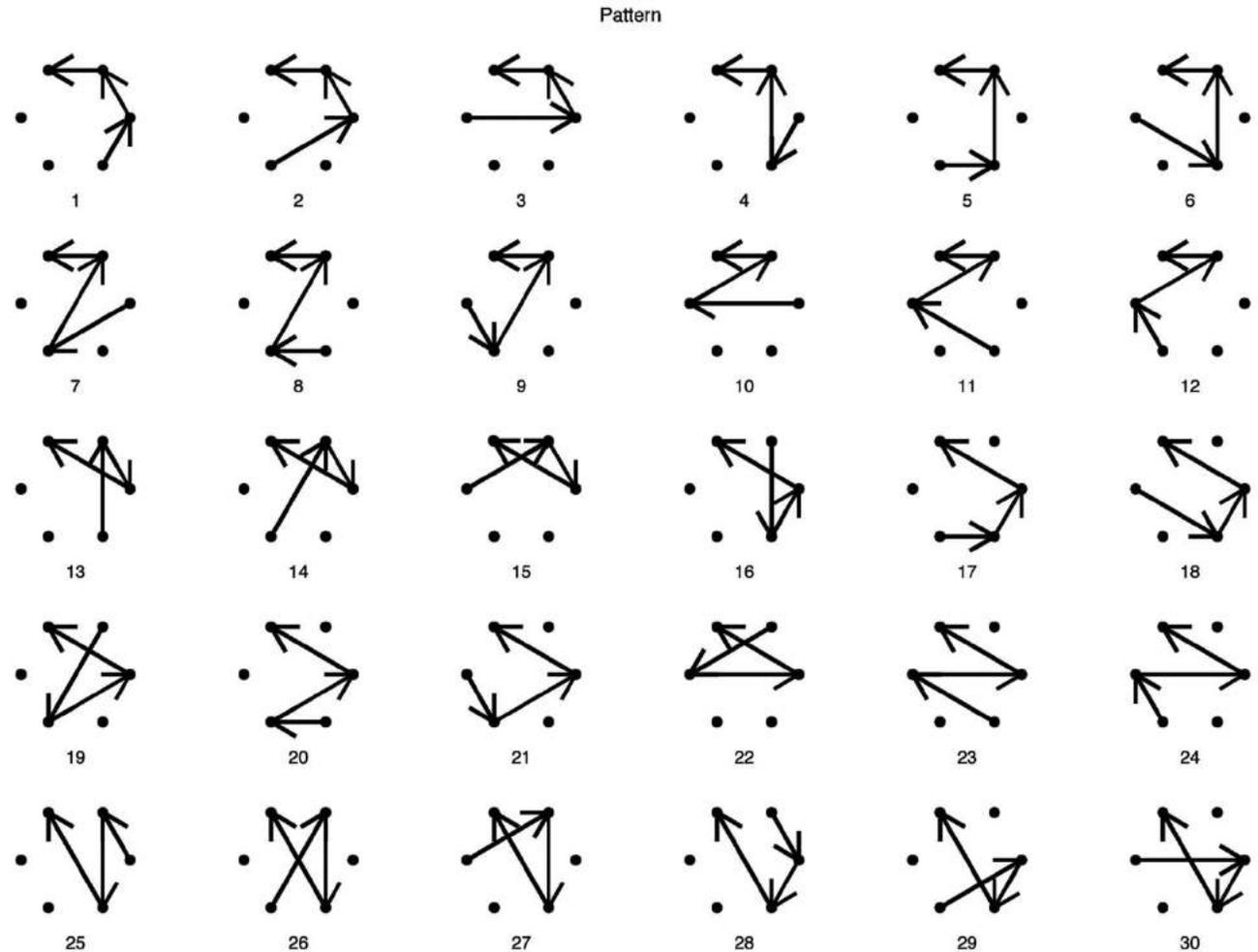
Les enfants et les singes sont-ils capables de “compresser” la séquence?

Amalric, M., Wang, L., Pica, P., Spelke, E. S., Figueira, S., Sigman, M., & Dehaene, S. (2016). The language of geometry: Fast comprehension of geometrical primitives and rules in human adults and preschoolers. *PLoS Computational Biology*.

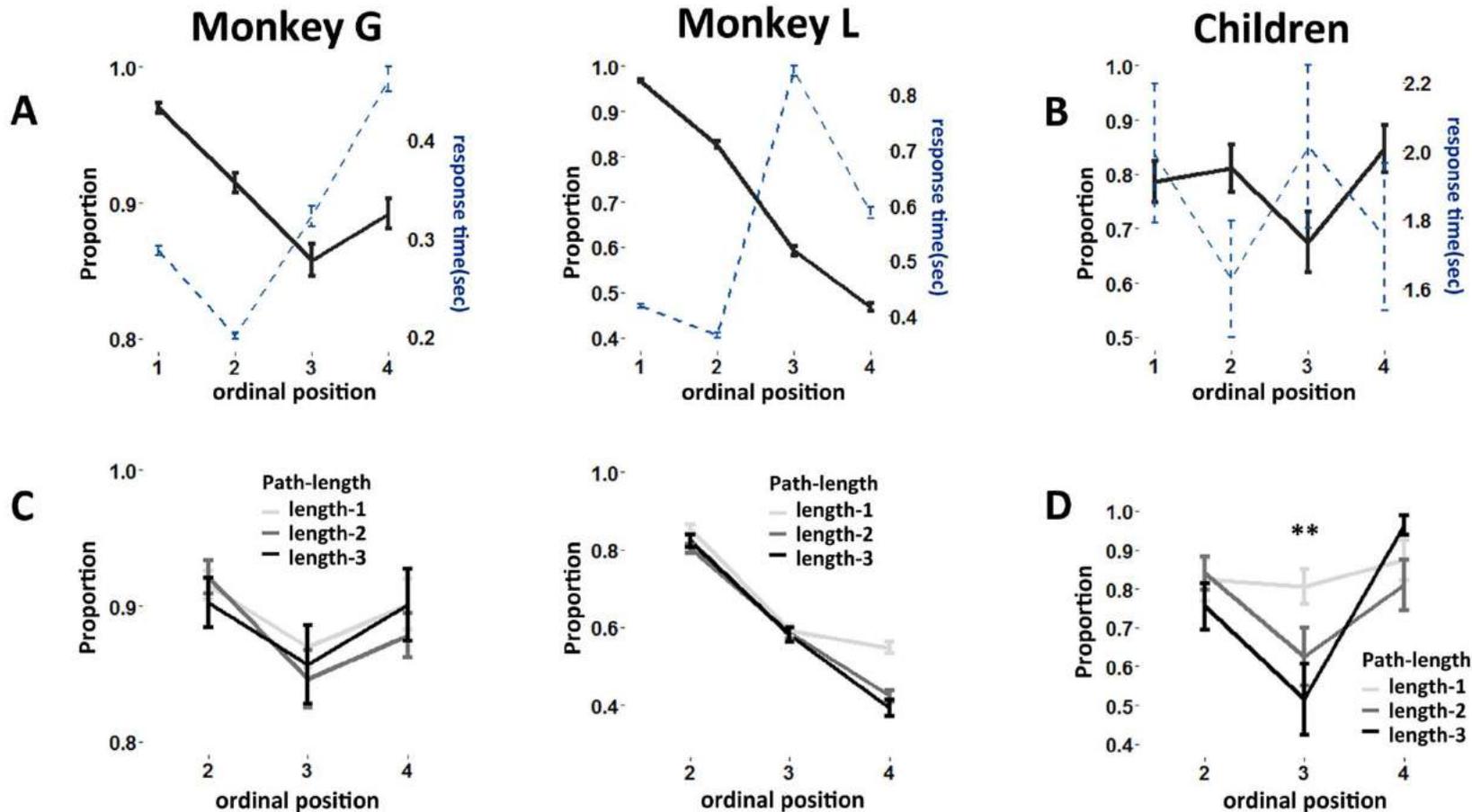
Les enfants et les singes
s'appuient-ils sur des
régularités comme

- La proximité
- La symétrie
- Le groupement par deux

... ?



Les enfants, mais pas les singes, organisent la séquence en mémoire de travail



Les singes montrent un effet de position sérielle: ils ralentissent au fil de la séquence, et font de plus en plus d'erreurs. Les enfants montrent une division en deux groupes de deux items.

Les enfants, contrairement aux singes, sont affectés par la proximité spatiale, particulièrement lors du passage du premier groupe au second groupe.

Conclusions sur l'apprentissage de grammaires artificielles

Il ne semble pas y avoir d'obstacle absolu à l'apprentissage de la grammaire « en miroir » chez le singe macaque.

(Alors que chez l'oiseau, les expériences avec le langage $A_n B_n$ sont pour l'instant totalement inconcluantes.)

Ainsi, le cerveau du singe macaque possède la capacité d'apprendre **un** langage supra-régulier, **une** grammaire indépendante du contexte (mais pas forcément toutes ces grammaires).

Au strict minimum, la résolution de cette tâche nécessite une pile « last-in-first-out » (*stack*).

La singularité de l'espèce humaine pourrait résider dans **la vitesse avec laquelle ce type de règle est découverte.**

Ces résultats sont à rapprocher de découvertes récentes dans le domaine des réseaux de neurones:

- Moyennant un nombre énorme d'essais d'entraînement, un réseau de neurone récurrent peut apprendre des règles grammaticales et des dépendances à longue distance Jusqu'à produire du Shakespeare... ou du Python!
- Les réseaux de neurones fondés sur des arbres apprennent bien plus vite.

Au cours de son évolution, le cerveau humain aurait-il internalisé un réseau de ce type dans l'aire de Broca ?