Limitations perceptives et représentationnelles des computations symboliques mentales

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 20 mai 2005

pour l'obtention du grade de

Docteur de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales

(mention sciences cognitives)

par

Ansgar D. Endress

sous la direction de

Jacques Mehler

Jury :

Gerry ALTMANN

Peter F. DOMINEY (rapporteur)

Emmanuel DUPOUX

Juan SEGUI (rapporteur)

Paris 2005

Laboratoire de Sciences Cognitives et Psycholinguistique

Nothing is particularly hard if you divide it into small jobs.

Henry Ford

Remerciements

Mes plus chaleureux remerciements vont tout d'abord à Jacques Mehler de m'avoir converti et initié aux sciences cognitives et d'avoir assuré la direction de cette thèse sous les meilleures conditions possibles — et même de l'avoir lue et annotée.

Je tiens également à remercier Luca Bonatti et Ghislaine Dehaene-Lambertz sans qui cette thèse n'aurait pas vu le jour, Peter F. Dominey et Juan Segui qui ont accepté le lourd fardeau d'être pré-rapporteurs et Gerry Altmann et Emmanuel Dupoux d'avoir accepté d'être membres du jury.

Je remercie Gennaro Chierchia, Anne Christophe, Emmanuel Dupoux, Lila et Henry Gleitman, Marina Nespor, Janet Pierrehumbert, Mohinish Shukla, Gayaneh Szenkovits, Alessandro Treves et les autres membres du LSCP et du Cognitive Neuroscience Sector de la SISSA pour de nombreuses discussions illuminantes qui m'ont permis de développer les idées proposées ici.

Je remercie Michel Dutat de ses conseils, Susana Franck de son aide et son encouragement, Christophe Pallier de partager tous ses programmes.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien financier de l'École polytechnique et sans la disponibilité des sujets qui ont bien voulu se prêter à ces bizarreries que j'appelais des expériences.

Enfin, je remercie ceux qui s'aventureraient à lire ces pages d'ignorer aimablement les fautes de frappe, de grammaire, de présentation et conceptuelles.

Résumé

Dans cette thèse, nous avons exploré la manipulation des symboles dans le cas des généralisations spontanées chez les adultes. Notre hypothèse de départ était que l'esprit utilise un ensemble d'opérations spécialisées et limitées dont certaines pourraient découler des contraintes du système perceptif.

En partant de l'observation de Marcus, Vijayan, Rao et Vishton (1999) que les jeunes enfants peuvent généraliser les structure ABA et ABB, nous nous sommes demandés si ces généralisations sont diagnostiques d'un mécanisme général d'extraction de règles ou plutôt d'opérations d'un niveau plus bas. Dans la première série d'expériences, nous avons demandé à des adultes humains de généraliser des structures avec répétitions ou des structures « ordinales » sans répétitions ; les structures étaient portées par des notes de piano. Alors que les deux types de structures devraient être traités avec des performances similaires par un mécanisme général d'extraction de règles, nous avons montré que les mécanismes associationnistes devraient traiter les structures *ordinales* mieux que les structures avec répétitions. Contrairement à ces prédictions, les sujets ont généralisé les structures avec répétions facilement mais étaient proches du hasard pour les structures ordinales ; de même, les changements de structure ont évoqué des réponses électrophysiologiques rapides pour les structures avec répétitions mais pas pour les structures ordinales. Nous avons conclu que les répétitions étaient traitées par une opération symbolique spécialisée.

Par la suite, nous nous sommes demandés si cette opération était générale (comme dans un ordinateur) ou plus contrainte par des facteurs perceptifs. Nos résultats montrent que les sujets ont facilement généralisé des structures avec répétitions quand les répétitions se trouvaient en des positions saillantes, en l'occurrence aux extrémités d'une séquence, mais pas quand elles se trouvaient en milieu de séquence ; les sujets ont généralisé la structures ABCDE*FF* mais pas la structure ABC*DD*EF. Des contrôles ont montré que ceci n'était pas le résultat de difficultés psychophysiques

ou attentionnelles. Nous avons conclu que les structures avec répétitions sont généralisées par un mécanisme spécialisé et limité qui dépend fortement des propriétés perceptives des entrées et non pas par un mécanisme général d'extraction de règles ; nous avons appelé de telles opérations des « primitives perceptives ».

Nous nous sommes demandés ensuite si de telles primitives intervenaient aussi dans des computations plus linguistiques. Nos résultats montrent que les sujets peuvent apprendre certaines contraintes phonotactiques aux extrémités de mot mais pas en milieu de mot et que ce-dernier échec ne peut pas être attribué à des difficultés psychophysiques. Les sujets pouvaient cependant apprendre de telles contraintes également en milieu de mot quand elles faisaient appel à des classes de consonnes *naturelles* au lieu des classes arbitraires des autres expériences ; la raison était probablement que les classes naturelles permettaient aux sujets d'utiliser des calculs de similarité au lieu de les forcer d'utiliser des calculs symboliques.

Dans la série d'expériences suivante, nous nous sommes demandés si des généralisations faisant appel à des classes de syllabes pourraient également dépendre des facteurs perceptifs. D'abord, nous avons montré que les sujets peuvent extraire des généralisations faisant appel à des classes de syllabes à partir d'un flux quasi-continu dans une situation inspirée par les travaux de Peña, Bonatti, Nespor et Mehler (2002) ; les sujets ont appris que les syllabes en première et en dernière position dans les mots devaient être des membres de deux classes distincts. La préférence pour ces généralisations était négativement corrélée avec la durée de familiarisation, dont on peut montrer qu'il s'agit d'une signature d'une compétition entre un processus associationniste (par exemple calculant des TPs) et un processus non-associationniste rapide qui calcule les généralisations. Nous avons également montré, entre autres grâces à des simulations avec des réseaux de neurones artificiels, que le calcul des généralisations n'aurait pas pu résulter d'un mécanisme purement associationniste. Les sujets ont néanmoins effectué des calculs statistiques sensibles aux TPs de deuxième ordre en même temps que les calculs non-associationnistes.

Dans la dernière série d'expériences, nous avons montré que de telles

généralisations sont possibles seulement quand les syllabes critiques sont situées aux extrémités des mots mais pas quand elles étaient en milieu de mot ; les calculs statistiques, par contre, étaient possibles également en milieu de mot.

Dans leur ensemble, ces résultats suggèrent que l'esprit pourrait utiliser un ensemble d'opérations spécialisées et limitées dont certaines pourraient découler des propriétés du système perceptif ; de telles « primitives perceptives » pourraient constituer une boîte à outils computationnelle de l'esprit. D'autres expériences ainsi que des considérations méthodologiques et évolutionnistes suggèrent que cette conceptualisation au cas par cas des opérations mentales pourrait être un pré-réquis pour étudier la psychologie de la manipulation des symboles et pourrait avancer une synthèse entre les modèles symboliques et statistiques de l'esprit.

Abstract

We explored the psychological mechanisms of symbol manipulation by studying the constraints on spontaneous generalizations in human adults. We started from the hypothesis that the mind may use a set of specialized and constrained symbolic operations, some of which may derive from the constraints of the perceptual system.

We used Marcus et al.'s (1999) observation that young infants can generalize the structures ABA and ABB to ask whether such generalizations reflect general rule-extraction capacities or rather lower-level type-operations. In one series of experiments, we asked human adults to generalize repetition-based structures or 'ordinal' structures not entailing repetitions, both carried by piano tones. While general rule-extraction mechanisms should generalize both structures equally well, we showed that associationist mechanisms should process the *ordinal* structures better than the repetition-based structures. In contrast to both predictions, participants readily generalized repetition-based structures but performed poorly for the ordinal structures, and structure changes elicited rapid electrophysiological responses for the repetition-based structures but not for the ordinal structures. We concluded that repetition-based structures are processed by a specialized symbolic operation.

In the next series of experiments, we asked whether this operation was a general operator like in a computer or more constrained by perceptual factors. We found that participants could generalize repetition-based structures only when the repetitions were located in salient positions ; participants generalized the structure ABCDE*FF* but not the structure ABC*DD*EF. Control conditions ruled out that this advantage could be due to psychophysical difficulties. We concluded that the operation extracting repetitions-based structures may be highly sensitive to perceptual factors. Together, these results suggest that the generalization of repetition-based structures may not be diagnostic of general symbol-manipulating capacities, but rather of more specialized and constrained operations that strongly depend on the perceptual properties of the input ; we called such

operations 'perceptual primitives'.

We then asked whether lower-level operations like in the previous experiments might also underlie computations that are more related to language. We found that participants can learn some phonotactic constraints in word-edges but not in word-medial positions, and that the latter failure cannot be attributed to psychophysical difficulties. Nevertheless, participants could learn such constraints also in word-medial positions when the constraints entailed *natural* consonant classes rather than arbitrary ones, probably because this allowed participants to resort to similarity-based rather than symbolic computations.

In the next series of experiments, we asked whether category-based generalizations may also depend on perceptual factors. We first showed that human adults can extract category-based generalizations from a quasi-continuous speech stream in a situation inspired by the work of Peña et al. (2002) ; participants learned that syllables in the first and the last position of words had to be members of distinct classes. The preference for these generalizations was negatively correlated with the duration of the familiarization streams, which can be shown to be a signature of an associationist mechanism (computing for example TPs) competing with a rapid non-associationist mechanism computing the generalizations. We also showed, partly by simulations with artificial neural networks, that the generalizations could not have been computed by purely associationist mechanisms ; participants nevertheless performed statistical computations sensitive to second order TPs simultaneously with the non-associationist computations.

In the last series of experiments, we showed that such generalizations were available only when the crucial syllables were located in edge positions but not when they were located in medial positions ; statistical computations, in contrast, were possible also in medial positions.

Together, these results suggest that the mind may use a set of specialized and constrained operations, some of which may derive from the properties of the perceptual system ; such 'perceptual primitives' may act as a mental computational toolbox. Previous data as well as methodologi-

cal and evolutionary considerations suggest that such a piecemeal view of mental computations may be a prerequisite for studying the psychology of symbol manipulation and may contribute to a synthesis between symbolic and statistical models of the mind.

Table des matières

I Introduction **1**

1 Un vieux problème **3**

2 Règles et généralisations **11**

2.1 Que sont les règles ? 11

2.2 L'enjeu de l'existence des règles 17

2.2.1 Peut-on apprendre une langue ? 19

2.2.2 L'argument de la pauvreté du stimulus 22

2.3 Une alternative aux règles 28

2.3.1 Principes de base 28

2.3.2 Apprentissage Hebbien 29

2.3.3 Perceptrons et modèles similaires 31

2.4 Détecter des calculs symboliques 37

2.4.1 Le débat sur la morphologie inflexionnelle 40

3 Systèmes expérimentaux simplifiés **43**

3.1 Capacités statistiques plus ou moins précoces 43

3.2 Capacités symboliques plus ou moins précoces 47

3.3 Un cas d'étude pour des computations symboliques et statistiques 52

4 Généralité des calculs symboliques ou statistiques **57**

4.1 La modularité de l'esprit 58

4.2 Implications pour l'étude des computations particulières . . 61

4.3 Computations perceptives 63

4.3.1 Des répétitions comme computations perceptives . . 64
4.3.2 Positions perceptivement saillantes 65
4.3.3 Facteurs perceptifs et l'acquisition du langage 66
4.3.4 Existent-ils des 'primitives perceptives' ? 68

5 Aperçu des expériences 73
5.1 Une spécialisation pour les répétitions ? 74
5.2 Facteurs perceptifs modulant des généralisations 75
5.3 Facteurs perceptifs et généralisations phonotactiques 75
5.4 PDBs dans des séquences de parole 76

II Expériences 81

6 Un mécanisme spécialisé pour les répétitions ? 83
6.1 Prédictions d'un mécanisme général d'extraction de règles . 84
6.2 Prédictions d'un mécanisme associationniste 87
6.2.1 Simulations avec un perceptron multi-couche 88
6.2.2 Information mutuelle entre les tons et les structures . 89
6.3 Prédictions d'un modèle avec des primitives perceptives . . 91
6.4 Expérience 1 : Généralisation des structures avec répétitions 93
6.4.1 Matériels et méthodes 94
6.4.2 Résultats et discussion 97
6.5 Expérience 2 : Généralisation des structures ordinales 98
6.5.1 Matériels et méthodes 100
6.5.2 Résultats 102
6.5.3 Discussion 105
6.6 Expérience 3 : Réplication de l'expérience 2 106
6.6.1 Matériels et méthodes 106
6.6.2 Résultats et discussion 107
6.7 Discussion intermédiaire 107
6.7.1 Des difficultés psychophysiques ? 108
6.7.2 Pourquoi les structures ordinales sont-elles difficiles à généraliser ? 109

7 Facteurs perceptifs modulant la généralisation des structures avec répétitions 113

7.1 Expérience 4 : Généralisation des répétitions en fin de séquence . . . 115
7.1.1 Matériels et méthodes . . . 117
7.1.2 Résultats et discussion . . . 120
7.2 Expérience 5 : Généralisation des répétitions en milieu de séquence . . . 121
7.2.1 Matériels et méthodes . . . 122
7.2.2 Résultats . . . 122
7.2.3 Discussion . . . 125
7.3 Expérience 6 : Généralisation des répétitions en fin de séquence après exposition simple . . . 127
7.3.1 Matériels et méthodes . . . 127
7.3.2 Résultats et discussion . . . 128
7.4 Expérience 7 : Généralisation des répétitions en milieu de séquence après exposition simple . . . 128
7.4.1 Matériels et méthodes . . . 128
7.4.2 Résultats . . . 129
7.4.3 Discussion . . . 130
7.5 Expérience 8 : Discrimination des répétitions en fin de séquence . . . 131
7.5.1 Matériels et méthodes . . . 132
7.5.2 Résultats et discussion . . . 132
7.6 Expérience 9 : Discrimination des répétitions en milieu de séquence . . . 133
7.6.1 Résultats et discussion . . . 135
7.7 Expérience 10 : Discrimination des répétitions en milieu de séquence sans exposition préalable . . . 137
7.7.1 Matériels et méthodes . . . 138
7.7.2 Résultats . . . 138
7.7.3 Discussion . . . 138
7.8 Discussion intermédiaire . . . 140

7.8.1 Une distinction compétence/performance peut-elle expliquer les résultats ? 145
7.8.2 D'autres propriétés des primitives perceptives 146

8 Effets perceptifs en phonotactique 149
8.1 Régularités phonotactiques 150
8.2 Expérience 11 : Contraintes phonotactiques en PDB 152
8.2.1 Matériels et méthodes 152
8.2.2 Résultats et discussion 154
8.3 Expérience 12 : Contraintes phonotactiques en milieu de mot 158
8.3.1 Matériels et méthodes 158
8.3.2 Résultats et discussion 158
8.4 Expérience 13 : Rôle de la fin de mot 160
8.4.1 Matériels et méthodes 161
8.4.2 Résultats et discussion 163
8.5 Expérience 14 : Rôle du début de mot 164
8.5.1 Matériels et méthodes 164
8.5.2 Résultats 164
8.5.3 Discussion 166
8.6 Expérience 15 : Traitement des consonnes en milieu de mot . 167
8.6.1 Matériels et méthodes 167
8.6.2 Résultats et discussion 168
8.7 Expérience 16 : Contraintes médiales avec classes naturelles 168
8.7.1 Matériels et méthodes 169
8.7.2 Résultats 171
8.7.3 Discussion 172
8.8 Discussion Intermédiaire 174
8.8.1 Les PDBs sont-elles des représentations symboliques ? 175
8.8.2 Processus symboliques ou associationnistes en milieu de mot ? 178
8.8.3 Une autre primitive perceptive ? 178

9 Extraction de classes de syllabes d'un flux de parole continu 181
9.1 Les expériences 183
9.2 Extraction d'une dépendance entre des classes de syllabes . 188
9.2.1 Expérience 17 : Extraction de classes après une familiarisation avec un flux segmenté 188
9.2.2 Expérience 18 : Extraction de classes après une familiarisation avec un flux continu 191
9.3 Mécanismes unique ou à deux voies ? 194
9.3.1 Expérience 19 : Extraction des classes après une familiarisation avec un flux long 195
9.3.2 Expérience 20 : Extraction des classes après une familiarisation avec un flux court 196
9.3.3 Expérience 21 : Extraction de classes après une familiarisation avec un flux court II 197
9.3.4 Discussion 198
9.4 Expérience 22 : Généralisations ou biais perceptif ? 200
9.4.1 Matériels et méthodes 201
9.4.2 Résultats et discussion 203
9.5 La relation entre les règles A_iC_i et la règle des classes 204
9.5.1 Expérience 23 : Règles $\mathrm{A}_i\mathrm{C}_i$ versus règle des classes après une familiarisation segmentée 207
9.5.2 Expérience 24 : Règles $\mathrm{A}_i\mathrm{C}_i$ versus règle des classes après une familiarisation continue I 208
9.5.3 Expérience 25 : Règles $\mathrm{A}_i\mathrm{C}_i$ versus règle des classes après une familiarisation continue II 210
9.5.4 Discussion 210
9.6 Un mécanisme associationniste peut-il expliquer l'acquisition de la règle des classes ? 212
9.6.1 Force associative entre items 213
9.6.2 Expérience 26 : Les silences subissent-ils des computations statistiques ? 213
9.6.3 Expérience 27 : Simulations avec un Simple Recurrent Network 218

9.7 Discussion intermédiaire 227

10 Extraction des classes en PDB et milieu de mot 231

10.1 Expérience 28 : Généralisations en PDB 232

10.1.1 Matériels et Méthodes 232

10.1.2 Résultats et discussion 235

10.2 Expérience 29 : Généralisations en milieu de mot 236

10.2.1 Matériels et méthodes 236

10.2.2 Résultats 238

10.2.3 Discussion 238

10.3 Expérience 30 : Généralisations après une familiarisation avec un flux continu 241

10.3.1 Matériels et méthodes 241

10.3.2 Résultats 241

10.3.3 Discussion 243

10.4 Expérience 31 : Associations en milieu de mot 243

10.4.1 Matériels et méthodes 244

10.4.2 Résultats et discussion 244

10.5 Discussion intermédiaire 246

10.5.1 La nature des dépendances apprises 247

10.5.2 Un mécanisme associationniste peut-il expliquer les généralisations ? 251

10.5.3 Les généralisations ne sont-elles « que » de biais perceptifs ? 254

III Discussion Générale 259

11 Résumé des travaux présentés 265

11.1 Arguments pour des primitives perceptives 267

11.2 Facteurs perceptifs modulant des généralisations 268

11.3 Facteurs perceptifs et généralisations phonotactiques 269

11.4 PDBs dans des séquences de parole 270

12 Primitives perceptives 273
12.1 Deux exemples de primitives perceptives 274
12.1.1 Une primitive détectant les répétitions 274
12.1.2 Une primitive détectant les PDBs 278
12.2 L'esprit est-il un ordinateur ? 279
12.3 Quelques applications des primitives perceptives 282
12.3.1 Le cas de l'OCP 282
12.3.2 Le cas des PDBs 283

13 Primitives perceptives et computations statistiques 285
13.1 Doit-on opposer les calculs statistiques et symboliques ? . . . 286
13.2 Apprentissage avec des primitives perceptives 291

14 Primitives perceptives et facultés centrales — une boîte à outils computationnelle ? 293
14.1 L'objet étudié 294
14.2 Niveaux de représentation des primitives perceptives 297
14.3 Critères d'évaluation 299
14.3.1 Primitives perceptives et productivité 299
14.3.2 Primitives perceptives et compositionalité 299
14.3.3 Primitives perceptives et catégories 301
14.3.4 Primitives perceptives et systématicité 302
14.4 Puissance des combinaisons de composants simples 303
14.5 Primitives perceptives de la faculté du langage 304
14.6 Un argument méthodologique 306
14.7 Evolution des primitives perceptives 307
14.8 Conclusion 308

IV Annexe 311

A Details for the simulations in chapter 6 313
A.1 Architecture and Training 313
A.2 Simulation 1 314

A.3 Simulation 2 314
A.4 Simulation with tones arranged on a ring 314

B Details about the simulations with an SRN 317
B.1 Architecture 317
B.2 Material 317
B.3 Training 318
B.4 Test 318
B.5 Evaluation 319
B.6 Baselines 320

Bibliographie 321

Liste des abbréviations

ANOVA ..... *Analyse de variance*
BHM ..... *Bas-Haut-Milieu*
EPS ..... *Effet de Position Sérielle*
FC ..... *Fréquence caractéristique*
IM ..... *Information mutuelle*
IRMf ..... *Imagerie par Résonance Magnétique Fonctionnelle*
LAD ..... *Language Acquisition Device*
MHB ..... *Milieu-Haut-Bas*
MMN ..... *Mismatch Negativity*
OCP ..... *Obligatory Contour Principle*
OT ..... *Théorie de l'optimalité*
PDB ..... *Position de Bord*
RB ..... *Repetition Blindness*
SLI ..... *Specific Language Impairment*
SRN ..... *Simple Recurrent Network*
TP ..... *Probabilité de transition*

Première partie

Introduction

Chaque homme sait une quantité prodigieuse
de choses qu'il ignore qu'il sait.

Mauvaises pensées et autres
Paul Valéry

Chapitre 1

Un vieux problème

Le langage est reconnu depuis longtemps comme une faculté unique de l'homme. Descartes (1637/1999) remarqua « qu'il n'y a point d'hommes si hébétés et si stupides, sans en excepter même les insensés, qu'ils ne soient capables d'arranger ensemble diverses paroles, et d'en composer un discours par lequel ils fassent entendre leurs pensées ; et qu'au contraire il n'y a point d'autre animal, tant parfait et tant heureusement né qu'il puisse être, qui fasse le semblable. » Certains pionniers de la psycholinguistique pensèrent même que le langage était entièrement inné, et cherchèrent à découvrir la 'langue originale' que les enfants devraient sans doute finir par parler s'ils n'étaient pas exposés à une autre langue. Hérodote d'Halicarnasse décrit une expérience du roi égyptien Psammetichos qui désirait savoir si la culture égyptienne ou phrygienne était plus ancienne. Il confia deux enfants à un berger avec l'instruction de ne les laisser entendre aucune parole humaine. Comme le veut l'histoire, le premier mot prononcé fut 'bekos', le mot phrygien pour pain, et les égyptiens furent obligés d'accepter que la culture phrygienne était plus ancienne. Cependant, Salimbene degli Adami rapporte que ce résultat n'a pas pu être reproduit plus récemment par Frédéric II de Hohenstauffen au XIIIème siècle.

Des études contemporaines ont montré que la question si le langage est innée connaît une réponse plus complexe. En effet, les enfants qui ne sont exposés à une langue que tardivement après avoir été isolés ne peuvent l'apprendre que de manière rudimentaire (voir par exemple E. R. Brown, 1958; de La Condamine, 1755; Curtiss, 1977, 1989; Ritter von Feuerbach, 1832/2000; Guyon, 1613; Itard, 1806, 1801). Ces études concernaient les rares cas d'enfants abusés ou 'sauvages', privés de toute interaction linguistique. Quand ils ont été découverts, ils ignoraient entièrement leur langue maternelle ; même après une réhabilitation, leur maîtrise de la langue n'a jamais atteint des niveaux normaux (voir par exemple Curtiss, 1977). Des cas moins spectaculaires viennent d'enfants normaux qui ont été isolés dans un environnement sourd (voir par exemple E. R. Brown, 1958) ou d'enfants dont des déficits auditifs n'ont été diagnostiqués qu'à l'âge adulte (voir par exemple Curtiss, 1989). Tandis que les enfants découverts suffisamment tôt peuvent encore récupérer le langage, une exposition trop tardive conduit à des déficits linguistiques.

D'autre part, si les enfants sont dans un environnement où aucune langue n'est parlée, ils peuvent créer des nouvelles langues avec toutes les propriétés structurales des autres langues humaines (voir par exemple H. Feldman, Goldin-Meadow & Gleitman, 1978; Goldin-Meadow, 1982; Goldin-Meadow & Mylander, 1998; Senghas & Coppola, 2001; Senghas, Kita & Ozyürek, 2004). Les enfants dans une école pour enfants sourds au Nicaragua (où il n'existait pas de langue de signe) ont par exemple spontanément développé une langue de signe (Senghas & Coppola, 2001; Senghas et al., 2004)[1].

Le rôle de l'expérience linguistique précoce a été étudié plus systématiquement avec deux populations : Les enfants sourds-muets congé-

[1] A toutes fins utiles, il convient de noter que les langues de signe sont des langues humaines avec les même propriétés structurales que les autres langues humaines (voir par exemple Klima & Bellugi, 1979).

nitaux exposés à une langue de signe à des âges variables (pour une revue voir Newport, 1990), et les enfants apprenant une deuxième langue (voir par exemple Flege, Yeni-Komshian & Liu, 1999; Flege, MacKay & Meador, 1999; Johnson & Newport, 1989, 1991). Pour résumer ces données, le meilleur prédicteur de la compétence finale dans une langue est l'âge d'acquisition pour les aspects structuraux comme la morphologie, la syntaxe ou la phonologie ; les aspects 'sémantiques'[2], par contre, dépendent plutôt de l'expérience accumulée avec une langue (mais voir par exemple Bialystok, 1997 pour une conclusion opposée).

Ces données confirment l'hypothèse de Lenneberg (1967) que l'acquisition du langage, au moins dans ses aspects structuraux comme la syntaxe et la phonologie, est déterminée par des facteurs biologiques, et qu'elle ne peut réussir qu'à l'intérieur d'une *période critique* prenant fin pendant la puberté[3]. Cependant, l'existence d'une période critique n'implique pas une transition abrupte entre une phase plastique et une phase cristallisée, mais plutôt que la capacité d'apprendre diminue graduellement avec beaucoup de variabilité inter-individuelle (voir par exemple Newport & Neville, 2001).

Depuis que Lenneberg (1967) a introduit ce concept dans le contexte du langage, l'existence d'une période critique fut considérée comme un argument fort en faveur d'une base biologique innée du langage. En effet, de nombreux systèmes neurobiologiques ne peuvent se mettre en place qu'avant un certain âge. Des exemples incluent le développement des colonnes de dominance oculaire (Hubel & Wiesel, 1970 ; voir également Banks, Aslin & Letson, 1975; Fagiolini, Pizzorusso, Berardi, Domenici & Maffei,

[2]La sémantique dans de telles expériences est essentiellement limitée au sens des mots de contenu ; ces études ne concernent pas les problèmes sémantiques en linguistique comme le sens du mot 'ou' dans différents contextes sententiels.

[3]Si on le souhaite, on peut également trouver des arguments évolutionnistes pour l'existence d'une période critique (Komarova & Nowak, 2001). Un apprentissage prolongé augmente sa fiabilité mais une phase d'apprentissage a un coût en termes de fitness ; avec ces hypothèses, il existe un optimum.

1994; Issa, Trachtenberg, Chapman, Zahs & Stryker, 1999 pour d'autres animaux), la calibration de la localisation auditive chez les oiseaux (voir par exemple Brainard & Knudsen, 1998; Knudsen & Knudsen, 1990) et le chant d'oiseaux (pour des revues, voir par exemple Brainard & Doupe, 2002; Brenowitz, Margoliash & Nordeen, 1997; Doupe & Kuhl, 1999; Marler, 1997).

Par conséquent, même s'il y a des manipulations pour influencer la durée de la période critique ou rétablir de la plasticité (pour quelques-unes unes de ces manipulations, voir par exemple Brainard & Doupe, 2000; Linkenhoker & Knudsen, 2002; Pizzorusso et al., 2002), il semble raisonnable de conclure que la période critique dans l'acquisition du langage montre que cette forme d'apprentissage est une séquence développementale relativement indépendant des facteurs environnementaux. Or, Newport (1990) en proposa une explication différente. Elle observa que les adultes apprenant une seconde langue mémorisent souvent des combinaisons de mots sans les analyser en leurs composants ; ils peuvent mémoriser un grand nombre de phrases entières au lieu de les décomposer en leurs constituants. Les enfants, par contre, sont forcés à une telle décomposition — car leurs capacités de mémoire plus limitées les empêchent de mémoriser des longues phrases entières. Par conséquent, les limitations cognitives des enfants leur aideraient d'apprendre une langue correctement ; c'est la célèbre hypothèse 'less is more'. L'acquisition du langage ne reposerait donc pas sur des mécanismes spécifiques et innés mais sur des mécanismes généraux guidés par des limitations de traitement.

Cependant, même si les limitations cognitives peuvent être utiles pour l'acquisition du langage, elles ne sont probablement pas suffisantes, car elles ne ressoudent pas les problèmes d'apprentissage présentés dans la section 2.2[4].

[4]L'essence de ces problèmes est qu'un nombre fini d'exemples est compatible avec une infinité de régularités. Si l'enfant entend par exemple des phrases transitives comme 'le cygne aime le lac', 'le cygne mord le promeneur', 'le cygne vole le sandwich' etc. (et

L'hypothèse que les limitations cognitives peuvent faciliter l'apprentissage d'une langue a été étudiée par des simulations avec un réseau de neurones artificiels. Elman (1993) a simulé l'apprentissage de l'accord verbal dans les phrases relatives enchâssées. Le réseau apprenait ces accords mieux quand des limitations de mémoire ont été simulées. Cependant, les phrases que le réseau a 'entendues' étaient exclusivement des phrases simplifiées avec phrases relatives multiples, et les résultats ont été présentés d'une manière purement qualitative. Il n'est donc pas claire si ces résultats peuvent être reproduits avec un matériel plus réaliste et des méthodes plus rigoureuses. En effet, avec le même type de modèle, Rohde et Plaut (1999) sont arrivé à la conclusion que les limitations cognitives rendent l'apprentissage plus *difficile*. Même si l'on admet que les résultats de Elman (1993) sont reproductibles, un problème plus important est que le réseau ne sait apprendre que l'ordre des mots (comme chat, chien, garçon etc., mais pas l'ordre de leurs catégories comme nom, verbe etc.) et de leurs terminaisons. Par conséquent, un tel modèle échouerait forcément dans des langues avec un ordre de mots plus variable et une conjugaison plus complexe qu'en anglais. Il reste donc encore à déterminer si de tels modèles peuvent effectivement être pertinents pour l'étude de l'acquisition du langage.

L'hypothèse que le langage ne repose pas sur des capacités innées n'est pas récente. Déjà au 17ème siècle, les penseurs empiristes maintirent qu'il était appris par des associations entre idées. Locke (1690/2004) par exemple réfute dans son 'Essay Concerning Human Understanding' l'existence des idées innées ; tout apprentissage se ferait par association d'idées. Or, alors que les empiristes voient le langage comme une collection de paires de

s'il a déjà appris la notion de verbe), on peut se demander ce qui empêcherait l'enfant de conclure que le verbe doit être suivi par le mot 'le', et de considérer des contre-exemples comme des exceptions. Ceci est uniquement une seule de l'infinité des généralisations compatibles avec ces exemples ; des limitations cognitives comme des limitations de mémoire de travail ne sauraient pas aider l'enfant de choisir la *bonne* généralisation.

sons et d'idées, Abu Hayyan at-Tawhidi remarqua déjà au dixième siècle que « nous pouvons accepter les phrases qui n'ont pas été entendues auparavant. Ceci montre que les conventions du langage sont de deux sortes : il y a les conventions lexicales qui gouvernent l'utilisation des mots individuels et les conventions syntactiques qui gouvernent l'utilisation des expressions composées » (cité par Hodges, 2004). Ou, dans les termes de von Humboldt (1836), le langage est fondamentalement une *procédure* ('Verfahren') — et non pas un édifice statique comme une collection d'associations entre des mots ou des phrases et les idées correspondantes. von Humboldt (1836) souligna cet aspect créatif du langage en affirmant qu'il ne s'agit pas d'une œuvre (ergon) mais bien d'une activité (energia ; expressions grecques dans l'original). Il proposa que 'toutes les langues sont égales dans leur procédure intellectuelle' (§11) et que cette procédure 'doit faire un usage infini de moyens finis.' En d'autres termes, il maintint que le langage ne constitue pas une simple liste d'associations entre des mots et des concepts, mais qu'un locuteur peut créer une infinité de phrases à partir des mots et des règles grammaticales en nombre fini — et ceci grâce à une procédure largement commune à toutes les langues.

Tandis que des chercheurs dans la tradition de Lenneberg (1967) tirèrent la conclusion que l'acquisition du langage doit reposer sur des mécanismes biologiques innés en observant les limitations du (re-) apprentissage du langage, von Humboldt (1836) arriva à la même conclusion en considérant son usage. Comme on verra plus loin, Chomsky (1957, 1959, 1965) y arriva par des considérations computationnelles. Il proposa que les enfants apprennent à parler grâce à un 'Language Acquisition Device' (LAD) inné, et spécifiquement linguistique. Une grammaire avec un nombre fini de règles peut générer[5] l'infinité des phrases possibles d'une langue, tandis que le lexique mental ne contient qu'un nombre fini de mots. Grâce à la distinction entre la grammaire générative et les mots

[5]Selon Chomsky, 'générer' est la traduction la plus direct du terme 'erzeugen' utilisé par von Humboldt. Il est intéressant de noter que ce terme est utilisé en mathématiques dans un sens similaire à celui envisagé par Chomsky.

qu'elle emploie, on peut étudier la nature de ces composants du langage, et si elles sont innées ou apprises ; de cette manière, on peut répondre aux interrogations qui préoccupaient déjà les empiristes :

1. Quelle est la nature des capacités computationnelles du langage ?
   a Des mécanismes associatifs, pourraient-ils être suffisants ou faut-il postuler des processus d'une autre nature ?
   b S'agit-il de processus généraux ou spécialisés, par exemple pour des computations linguistiques ?
2. Ces capacités, sont-elles innées ?
3. Est-ce que ces capacités sont spécifiques à l'homme ?

C'est surtout sur la première de ces questions sur laquelle les travaux présentés dans cette thèse portent, quoiqu'en choisissant des cas d'étude simples dont le rapport au langage reste à déterminer. Je montrerai cependant que la réponse à la première question contient également des éléments de réponse à la deuxième question.

En conclusion, on peut se poser la question comment on apprend le langage. Est-ce que cet apprentissage repose sur des prédispositions innées ou est-ce que les associations entre les idées pourraient-elles être suffisantes ? Le concept des procédures que l'on emploie a émergé comme central pour répondre à ces questions. Si l'apprentissage du langage est caractérisé par une procédure computationnelle indépendante des mots particuliers auxquels elle s'applique, elle est probablement innée. En revanche, si tout ce qui doit être appris sont les associations entre les idées, de telles prédispositions ne sont probablement pas nécessaires. Par conséquent, il est important de comprendre les moyens computationnels utilisés par cet apprentissage afin de comprendre les prédispositions de l'esprit.

All science is either physics or stamp collecting.

Ernest Rutherford

Chapitre 2

Règles et généralisations

2.1 Que sont les règles ?

Von Humboldt proposa que le langage puisse être appris grâce à une 'procédure intellectuelle' commune à toutes les langues. Une telle procédure doit être indépendante de la connaissance des mots — car des locuteurs d'une langue savent que même des phrases dépourvues de sens comme 'colorless green ideas sleep furiously' peuvent être grammaticales (Chomsky, 1957). Il semble donc que l'on peut appliquer un savoir grammatical à tous les mots. La capacité de l'esprit d'appliquer une procédure — les connaissances grammaticales — aux arguments arbitraires ressemble à la capacité d'un ordinateur d'appliquer une fonction aux valeurs arbitraires de ses arguments ; par exemple, un ordinateur peut appliquer la fonction 'additionne 1' à n'importe quelle valeur stockée en mémoire.

L'indépendance des procédures et de leurs arguments est une caractéristique importante de ce que l'on appelle les systèmes *symboliques*. Gallistel (2001) en donne l'explication suivante :

> « A representation, mental or otherwise, is a system of symbols. The system of symbols is isomorphic to another system

> (the represented system) so that conclusions drawn through the processing of the symbols in the representing system constitute valid inferences about the represented system. Isomorphic means 'having the same form.' The form in question is mathematical form, the forms of the equations specifying the relations among the symbols and among the things that the symbols represent. [...] A symbolic system contains three distinct contrivances — symbols, rules that govern the manipulation of those symbols, and measuring processes. The measuring processes relate the numerical values of the symbols to the [quantities] to which they refer. [...] Brains — both human and animal — are process control computers contrived by evolution through natural selection. They assess their environment through sensory or perceptual processes ; they symbolize the results of these assessments by values stored in memory ; they manipulate those values by means of the relevant mental operations (the operations of perception and thought) ; and they use the results (percepts, inferences and deductions) to control behavior. »

L'exemple d'une opération de comparaison permet d'éclairer ces concepts. Une fonction de comparaison $\mathcal{COMP}$ peut avoir la forme

$$\mathcal{COMP}\left(o_1, o_2\right) = \begin{cases} \text{VRAI} & \text{si } o_1 \text{ et } o_2 \text{ sont identiques} \\ \text{FAUX} & \text{si } o_1 \text{ et } o_2 \text{ sont différents} \end{cases} \tag{2.1}$$

où les *variables* o_1 et o_2 peuvent être remplacées par deux objets arbitraires auxquels on peut appliquer cette opération. Dans cet exemple, l'opération correspond à ce que Gallistel (2001) appelle la règle manipulant les symboles, les variables correspondent aux symboles et ce qu'il appelle les processus de mesure correspond à la relation entre les objets particuliers et les variables. Si l'on veut comparer deux nombres, on appliquera l'opération aux représentations de ces nombres. Si l'on veut com-

parer deux couleurs, on appliquera l'opération aux représentations appropriées. Il est important de noter que les variables ne sont pas elles-mêmes les objets auxquels l'opération est appliquée, mais *gardent la place* pour les deux objets que l'on veut comparer. Les objets sont situés dans l'environnement, et l'on utilise des mécanismes perceptifs ('de mesure') pour former des représentations des objets auxquels on peut appliquer l'opération ; ces mécanismes déterminent les valeurs des variables. Indépendamment de si l'on compare un patch bleu à un patch rouge ou un patch jaune à un patch vert, ce que l'on calcule est la *relation* entre deux couleurs c_1 et c_2 ; des processus de 'mesure' perceptifs déterminent les valeurs que c_1 et c_2 vont prendre. Cette indépendance entre les variables et les objets particuliers qu'elles représentent est la raison pour laquelle on peut comparer deux objets arbitraires et savoir ensuite s'ils sont identiques ou pas.

L'exemple de l'opération de comparaison permet également d'introduire de la terminologie qui s'avérera utile pour la suite de cette thèse. Si l'on entend un mot particulier de manière répétée, on s'y habitue, par exemple en devenant moins réactif. D'autre coté, il est possible de considérer une répétition *en soi*. On sait par exemple que l'écho 'répète' n'importe quel son ; par conséquent, le concept d'écho est indépendant des sons particuliers qui sont répétés. J'appellerai la répétition d'un objet particulier une répétition d'un *token*, tandis que la notion d'une répétition en soi sera appelée une répétition de *type*[1].

Il est important de remarquer que les opérations ou relations symboliques ne sont pas perceptibles dans l'environnement. Ceci est probablement plus évident en considérant des relations causales. Comment peut-on savoir qu'une boule de billard heurtée par une autre boule se met en mouvement *à cause* de la collision ? Tout ce que l'on peut observer est que l'une des boules s'arrête et l'autre se met en marche sans aucun délai, et peut-être que tous les heurts entre deux boules de masse similaire res-

[1]Pour éviter des malcompréhensions, il convient de noter que cet usage des termes 'type' et 'token' est différent de leur usage dans le domaine de l'analyse de corpus.

pectent ce pattern d'événements. La relation de causalité n'est pas contenue dans les stimuli ; c'est l'observateur qui doit la reconstruire (voir par exemple Hume, 1739/2003). Ceci ne veut évidemment pas dire qu'il n'y a aucun lien de causalité entre les deux événements dans l'environnement ; ce lien existe à moins que les lois de la physique soient entièrement fausses — mais il n'est pas observable. C'est l'esprit de l'observateur qui reconstruit ce lien entre les représentations des deux événements qui *existe* bien dans l'environnement mais qui n'est pas observable. Si l'on revient à une relation d'identité, deux objets perceptivement identiques sont bien au moins similaire pour qu'ils soient perçus comme identiques mais rien ne les *identifie* comme identiques ; c'est donc l'esprit qui construit cette relation entre les représentations des deux objets.

La capacité d'appliquer les opérations aux objets arbitraires a donné lieu à l'hypothèse que l'esprit humain est analogue à un ordinateur (voir par exemple Block, 1995; Fodor, 1975; Marcus, 2001; Pylyshyn, 1984). L'esprit serait doté d'opérations qu'il appliquerait aux variables qui sont en revanche remplacées par leurs valeurs. Cette analogie ainsi que la discussion jusqu'ici suggèrent que l'esprit doit représenter (i) les opérations (comme $\mathcal{COMP}$), (ii) les variables (comme o_1 et o_2) et (iii) les objets concrets.

Même s'il est à première vue plausible que l'esprit représente ces trois composants séparément (en effet certains auteurs ont adopté précisément cette position, voir par exemple Marcus, 2001), il s'agit d'une hypothèse forte, et la situation risque d'être plus complexe qu'une analogie avec un ordinateur ne le suggère.

Dans une machine de Turing, par exemple, on peut considérer ce qui est stocké sur la bande comme le contenu des variables, et les opérations comme les actions de la tête d'écriture. De cette manière, les variables sont séparées des opérations. Or, quel est le contenu sémantique des variables ? Si l'on compare deux couleurs, on ne connaît pas seulement le résultat, en première approximation booléen, de cette comparaison, mais on sait éga-

lement ce que l'on compare (par exemple deux couleurs et non pas deux poids). Si les opérations, les variables et les objets concrets étaient représentées indépendamment comme dans une machine de Turing, ceci ne serait pas possible : Imaginons d'être des ordinateurs et de charger deux fichiers d'image de format différent mais représentant la même image et un fichier de son. Pour l'ordinateur, les images et les sons sont simplement des 'vecteurs' de données. Or, les variables dont les valeurs sont les contenus des fichiers d'image ont des valeurs différentes mais représentent pourtant la même image — alors qu'en principe, elles pourraient parfaitement bien représenter un son[2]. Pour qu'une image soit affichée sur l'écran et non pas sur la carte son, l'ordinateur doit savoir *a priori* ce que les valeurs représentent, par exemple en les traitant *a priori* comme images dans un format particulier.

Ces considérations suggèrent que l'information nécessaire pour évaluer le contenu des variables et pour les manipuler *correctement* doit être stockée indépendamment des opérations mais avec elles. En d'autres termes, les opérations ainsi que les variables contiennent des aspects du contenu sémantique de ce que les variables représentent ; les variables, leur contenu et les opérations qui s'appliquent ne peuvent donc pas être complètement indépendants.

De même, que peut vouloir dire que l'esprit représente les objets concrets quand il fait du calcul symbolique ? Les objets concrets se trouvent bien à l'extérieur de l'esprit et, d'un point de vue purement formel, il n'est pas nécessaire de savoir ce que l'on compare pour connaître le résultat de la comparaison — qui est simplement booléen. Or, comme on l'a discuté ci-dessus, on sait aussi *ce que* l'on compare en plus du résultat de la comparaison ; il faut donc une représentation des objets externes qui interagisse

[2]Beaucoup de formats ont des en-têtes, des tailles typiques différentes etc., mais j'ignorerai ces détails parce qu'ils ne changent pas l'argument : Imaginons simplement que les formats n'ont pas d'en-tête et que les fichiers d'image sont relativement 'grands' tandis que le fichier de son est relativement 'petit'.

avec les représentations des opérations et/ou des variables.

Ces considérations suggèrent qu'une analogie stricte avec le fonctionnement d'un ordinateur (voir par exemple Marcus, 2001) ne décrit pas correctement les computations de l'esprit ; il est donc préférable de considérer des modèles plus généraux qui laissent ouvert le rapport entre les variables, les opérations et les objets de l'environnement (Gallistel, 2001). En effet, comme on verra plus loin, la proposition de Gallistel (2001) que les processus perceptifs sont des processus de mesure qui déterminent les valeurs des variables spécifiques à des computations particulières est une solution possible aux problèmes esquissés ci-dessus.

Tandis que les trois composants — les représentations des opérations, les variables associées et les objets particuliers pour lesquels les variables gardent la place — sont suffisants pour décrire les computations comme des comparaisons, d'autres computations montrent que la nécessité d'un composant supplémentaire : les classes d'équivalence (voir par exemple Gómez & Gerken, 2000). Par exemple, la phrase 'Un x a des ailes' peut uniquement être comprise si x est remplacé par un token d'une *catégorie* appropriée. Si x est un substantif, on peut savoir si la phrase est vraie (comme pour x $\equiv$ perroquet) ou fausse (comme pour x $\equiv$ cochon) ; si x est un verbe ou un bruit blanche, la phrase n'est simplement pas interprétable. En d'autres termes, la phrase 'un x a des ailes' est uniquement définie pour les x d'une certaine catégorie. Des définitions d'opérations comme (2.1) doivent donc être augmentées par des précisions sur la catégorie à laquelle doivent appartenir les tokens qui peuvent prendre la place des variables comme o_1 et o_2[3].

[3]Il y a une tradition issue de l'intelligence artificielle (Anderson, 1993) et de l'apprentissage des grammaires artificielles (voir par exemple Reber, 1967) de considérer les instructions 'IF... THEN' comme exemples typiques des processus symboliques. Or, on peut se demander si les instructions 'IF... THEN' requièrent vraiment du traitement symbolique ; de telles instructions peuvent être implémentées par exemple comme associations asymétriques ou comme chaînes stimulus-réponse. Des animaux obéissent par exemple aux règles comme « S'il y a un prédateur en proximité, exécute l'action appropriée »Ċette

2.2 L'enjeu de l'existence des règles

La question si l'esprit humain fait appel aux calculs symboliques est considérée comme centrale pour pouvoir espérer comprendre l'esprit humain, mais pour quelle raison ? La réponse est probablement que l'existence des règles — si elle peut être affirmée — implique automatiquement que l'esprit humain n'est pas une *tabula rasa*, mais qu'il est né avec une machinerie permettant de représenter les règles. Comme les règles vont par définition au-delà des exemples rencontrés — en effet, ils représentent spécifiquement ce qui n'est pas observable dans les stimuli, l'information contenue dans les exemples rencontrés n'est pas suffisant pour apprendre les règles.

Cet argument a été présenté de différentes manières. Goodman (1955) demande par exemple comment on peut savoir qu'un objet est vert et non pas 'veu', c'est-à-dire vert quand on l'inspecte et bleue après un temps t[4]. Wittgenstein (1953) utilise l'exemple de l'étudiant anormal qui, en apprenant la règle 'additionne 2 à x', semble avoir appris cette règle jusqu'à 1000 puisqu'il produit la suite 2, 4, 6, ... Or, la règle qu'il a réellement apprise est 'additionne 2 pour des nombres inférieurs à 1000 ; sinon, additionne 4' ; par conséquent, il continue la suite avec les nombres 1004, 1008, 1012, ... Qu'est-ce qui empêche un étudiant normal d'apprendre cette règle anormale — étant donné que toutes les deux règles sont compatibles avec les exemples présentés ? Certes, on pourrait proposer une notion de complexité d'une règle, qui favoriserait la règle 'normale' par rapport à la règle anormale, mais d'où viendrait cette métrique de complexité — si l'esprit

réaction est indépendante de si le prédateur est à coté d'un arbre, sur un rocher ou encore sur une pelouse. L'instruction 'IF... THEN' est donc généralisée dans plusieurs contextes. Cependant, le seul traitement symbolique dans de telles réactions est probablement la reconnaissance du prédateur. Bien que les chaînes stimulus-réponse puissent être d'une complexité considérable, elles sont inflexible et ne peuvent pas expliquer le langage (voir par exemple Chomsky, 1957; G. A. Miller & Chomsky, 1963). Par conséquent, les instructions 'IF... THEN' ne sont ni nécessaires ni suffisantes pour du traitement symbolique.

[4]Dans l'original, la nouvelle 'couleur' est *grue*, une contraction de *green* et *blue*.

est une tabula rasa ? C'est précisément le problème de l'induction (Hume, 1739/2003) :

> « There is no object, which implies the existence of any other if we consider these objects in themselves, and never look beyond the ideas which we form of them. Such an inference would amount to knowledge, and would imply the absolute contradiction and impossibility of conceiving any thing different. But as all distinct ideas are separable, 'tis evident there can be no impossibility of that kind. »

En d'autres termes, le problème de l'induction est que n'importe quel ensemble fini d'exemples est compatible avec une infinité de règles. Ceci peut être illustré en imaginant que l'on dispose de N points de données (des paires (x,y)), et l'on souhaite trouver une fonction qui passe par tous ces points. Pour cela, on peut utiliser les polynômes d'un dégrée d'au moins N-1, et donc une infinité de polynômes — sans même considérer d'autres classes de fonctions. Par conséquent, on peut choisir une infinité de fonctions qui passent à travers ces points. Ce fait est illustré dans la figure 2.1. Dans cette figure, des polynômes de degré 1, 2, 3 et 4 passent par les points (1,1) et (2,2) ; on pourrait continuer cette figure avec une infinité d'autres solutions. Par contre, la solution la plus 'naturelle' pour relier les deux points est probablement de les relier par une ligne droite. Or, « a completely unbiased mechanism of inductive learning (...) simply cannot have any notion of 'naturalness.' For such a mechanism, any solution compatible with the data is as good as any other » (Morgan, 1986, p. 16). Il faut donc être équipé des contraintes et biais qui déterminent les solutions admissibles.

D'une manière similaire, si l'esprit humain peut généraliser au-delà des exemples en utilisant des règles, il doit être équipé de contraintes innées définissant les règles admissibles afin de pouvoir choisir entre l'infinité de solutions possibles. Sans de telles contraintes, il ne saurait simplement pas choisir la règle appropriée. La réponse à la question si l'es-

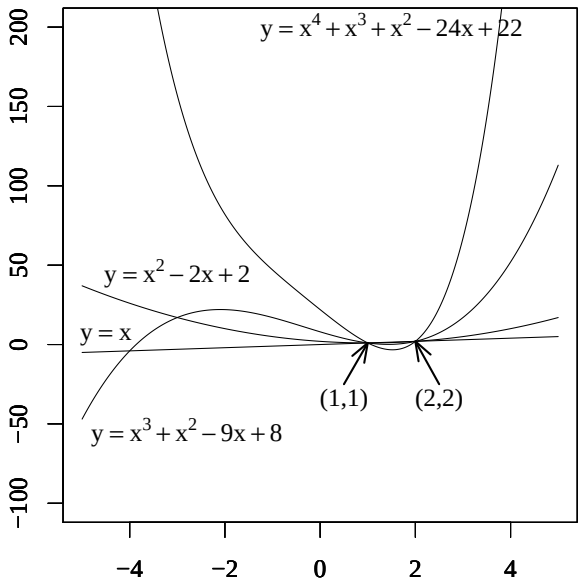


FIG. 2.1 – On peut illustrer le problème de l'induction avec les interpolations possibles entre des points de données. Une infinité de fonctions peut passer par un nombre fini de points arbitrairement choisis. Ici, des polynômes de degré 1, 2, 3 et 4 passent par les points (1,1) et (2,2).

prit humain sait traiter les règles implique donc la réponse à la question s'il contient des prédispositions innées qui déterminent les règles admissibles. Dans l'exemple des fonctions, cette contrainte déterminerait quelle fonction est la solution attendue.

2.2.1 Peut-on apprendre une langue ?

Dans le contexte de l'acquisition du langage, on peut étudier ce problème de manière plus formelle. Ceci est l'objet de la théorie de l'apprénabilité[5]. Dans ces formalisations, un 'apprenti', idéalisé comme une fonction d'apprentissage, vit dans un 'environnement' où il entend des 'textes', c'est-à-dire des ensembles de phrases. L'apprenti prend les textes comme arguments, et produit une 'grammaire' qui génère l'ensemble des phrases qui constitue une 'langue.' Afin d'évaluer si l'apprenti a appris une langue,

[5]J'utiliserai l'adjectif 'apprénable' pour traduire l'expression 'learnable.'

il faut également définir un critère d'apprentissage.

Avec ces concepts, il est possible d'étudier les propriétés que doivent avoir l'apprenti, l'environnement et la langue-cible pour que l'acquisition du langage puisse réussir. Gold (1967) initia cette stratégie de recherche en montrant qu'il est impossible d'apprendre même des grammaires simples si l'apprenti n'a pas accès à de 'l'évidence négative.' L'évidence négative est l'ensemble des indices dont l'apprenti peut déduire que certaines de ses hypothèses sont fausses ; elle pourrait par exemple exister sous forme de corrections ses erreurs. Même si cette idéalisation de l'apprenti et de son environnement est extrêmement appauvrie, elle permet d'affirmer des conditions très générales sous lesquelles une langue naturelle peut être apprise ; comme la plupart des théories cognitives ont été décrites en des termes très généraux, de telles conditions générales sont d'une utilité non négligeable pour évaluer la viabilité d'une théorie cognitive donnée.

Comment peut-on réconcilier le résultat de Gold (1967) avec le fait que les enfants apprennent généralement à parler ? Si le langage était largement inné (Chomsky, 1957; von Humboldt, 1836), tout problème d'apprentissage serait éliminé. D'autre coté, si l'on peut démontrer l'existence de l'évidence négative dans l'environnement, l'enfant pourrait également apprendre à parler peut-être avec une fonction d'apprentissage relativement peu spécifique. Par conséquent, nombre d'auteurs ont essayé de démontrer l'existence de ce genre d'information dans l'environnement de l'enfant.

Alors que les enfants ne semblent pas être systématiquement corrigés et les parents comprennent également les phrases agrammaticales (R. Brown & Hanlon, 1970, mais voir Hirsh-Pasek, Treiman & Schneiderman, 1984), les enfants pourraient utiliser des indices plus subtils comme les répétitions de leurs phrases agrammaticales (cf. Marcus, 1993 pour une revue). Or, comme ce type d'évidence négative n'est pas systématique, l'enfant ne peut pas utiliser cet indice avec certitude (Marcus, 1993). Contrai-

rement à ce qu'affirme Marcus (1993), ceci n'implique cependant pas que l'enfant ne pourrait pas l'utiliser du tout, parce que les implications de cette situation devraient d'abord être évaluées dans le cadre de la théorie de l'apprénabilité. D'autre coté, même si nombre d'auteurs proposent que de l'évidence négative est disponible dans l'environnement de l'enfant (voir par exemple Chouinard & Clark, 2003; Demetras, Post & Snow, 1986; Hirsh-Pasek et al., 1984; Moerk, 1991; Morgan & Travis, 1989; Penner, 1987; Saxton, Kulcsar, Marshall & Rupra, 1998), les analyses de corpus se prêtent mal aux études quantitatives à cause de leur faible densité (voir par exemple Gleitman, Newport & Gleitman, 1984), et on ne sait donc pas ni si l'évidence négative est disponible, ni quelles sont les conditions auxquelles l'évidence négative doit satisfaire pour permettre *théoriquement* l'apprentissage d'une langue. Par conséquent, il semble raisonnable de conclure que son rôle n'est pas compris[6].

Même si l'on accepte que l'évidence négative n'est pas disponible dans l'environnement, certaines classes de grammaires peuvent être apprises à partir seulement de l'évidence positive (Angluin, 1980), et l'on peut démontrer sous certaines conditions un 'nativisme fort' (Osherson, Stob & Weinstein, 1984) : Sous ces conditions[7], il n'y a qu'un nombre fini de langues cibles que l'apprenti devrait pouvoir identifier, et une langue est évidemment apprénable.

Ces résultats montrent que les implications des résultats inspirés par la théorie de l'apprénabilité pour l'acquisition du langage chez des vrais enfants (et non pas des fonctions d'apprentissage) sont plus qu'incertains. De plus, un résultat qu'un ensemble de langues est apprénable peut avoir

[6]Indépendamment de si l'évidence négative est disponible et de si elle est suffisante pour inférer une langue, il faut également que l'enfant *l'utilise*. Or, ceci ne semble pas être le cas (voir par exemple Penner, 1995).

[7]Les conditions sont que l'apprenti converge vers une grammaire également pour les textes bruités (mais pas nécessairement vers la grammaire correcte), qu'il prenne en compte uniquement un nombre fini des dernières phrases entendues et qu'il préfère les grammaires simples aux grammaires complexes (dans un sens que l'on peut définir).

un aspect trompeur : Trouver des conditions sous lesquelles un ensemble de langues est apprénable n'implique aucunement que *n'importe quelle* fonction d'apprentissage ferait l'affaire, mais seulement qu'il *existe* une fonction d'apprentissage qui conduirait à un apprentissage d'une langue. Manifestement, la fonction d'apprentissage qui associe n'importe quel ensemble de phrases à la langue qui ne contient que le mot 'diantre' ne permet pas d'apprendre les langues naturelles — même si cette fonction est bien une fonction d'apprentissage possible et la langue contenant uniquement le mot 'diantre' est également une langue (formellement) possible. Par conséquent, ces résultats confirment qu'il est nécessaire que l'apprenti soit doté de prédispositions innées appropriées afin d'apprendre les règles d'une langue.

2.2.2 L'argument de la pauvreté du stimulus

Nous avons vu deux illustrations de l'observation que la possibilité d'une représentation mentale des règles implique l'existence de contraintes — innées — pour inférer les 'bonnes' règles. D'abord, le problème de l'induction (Hume, 1739/2003; Goodman, 1955; Wittgenstein, 1953) montre que n'importe quel ensemble fini d'exemples est compatible avec une infinité de généralisations. Ensuite, si un apprenti doit apprendre les règles d'une langue, il doit impérativement être équipé d'une fonction d'apprentissage qui lui permet d'apprendre la langue en question. Maintenant, je décrirai un troisième argument pour la nécessité de prédispositions innées ; cet argument est connu sous le nom de l'argument de la pauvreté du stimulus (Chomsky, 1965, 1975). Pullum et Scholz (2002) en fournissent une reconstruction claire :

A. Human infants learn their first languages either by data-driven learning or by innately-primed learning. (Disjunctive premise ; by assumption.)

B. If human infants acquire their first languages via data-driven learning, then they can never learn anything for which they lack crucial evidence. (By definition of data-driven learning.)

C. But infants do in fact learn things for which they lack crucial evidence. (Empirical premise.)

D. Thus human infants do not learn their first languages by means of data-driven learning. (From (b) and (c), modus tollens.)

E. Conclusion : human infants learn their first languages by means of innately-primed learning. (From (a) and (d), disjunctive syllogism.)

Il convient de rajouter que ce que Pullum et Scholz (2002) appellent 'innately-primed learning' est généralement considéré d'être un mécanisme spécifiquement linguistique et dédié à l'acquisition du langage, par exemple un 'Language Acquisition Device.'

Cet argument est généralement illustré avec la dépendance structurale et les conditions de coréférence pronominale[8]. Considérons les exemples suivants pour la dépendance structurale :

(2.1) The man is tall.

(2.2) Is the man tall ?

(2.3) The man who is in the kitchen is tall.

(2.4) *Is the man who in the kitchen is tall ?

(2.5) Is the man who is in the kitchen tall ?

Comment un enfant pourrait-il apprendre que (2.5) est grammatical mais pas (2.4) ? Une hypothèse plausible que l'enfant pourrait entretenir est qu'une question se forme en mettant le premier auxiliaire rencontré en début de phrase ; cette hypothèse conduit à l'erreur (2.4). Afin d'arriver à la question correcte (2.5), l'enfant doit savoir que c'est l'auxiliaire de la proposition *principale* qu'il faut mettre en début de phrase. En d'autres termes, la réponse correcte implique une connaissance de la structure de

[8]Ces conditions sont connues sous le nom de 'condition C' : Un nom propre ou une description définie ne peuvent pas être corréférentiels avec un élément dont le nœud sœur le contient, c'est-à-dire quand il est en quelque sorte plus bas dans l'arbre syntactique.

la phrase — même si cette structure n'est pas perceptible dans l'environnement de l'enfant — et une connaissance des règles qui s'appliquent à ces structures. Déjà les enfants de trois ans semblent maîtrisent cette régularité (Crain & Nakayama, 1987).

Selon l'argument de la pauvreté du stimulus, on serait amené à postuler un mécanisme d'apprentissage inné et spécifiquement linguistique si ce type de régularité ne peut pas être appris à partir de l'information disponible dans l'environnement. Par conséquent, les détracteurs de l'argument de la pauvreté du stimulus ont tenté de prouver que l'enfant dispose de l'information dans son environnement lui permettant d'inférer ces régularités (voir par exemple Crain & Pietroski, 2001; Legate & Yang, 2002; Laurence & Margolis, 2001; Pullum & Scholz, 2002 pour des contributions dans ce débat). Or, ces auteurs se contentent en général ou bien de spéculer ce que l'environnement de l'enfant pourrait 'plausiblement' contenir ou bien d'utiliser les corpus de parole dirigée aux enfants comme sources de données quantitatives en omettant toute évaluation statistique et en ignorant qu'il est bien connu que les études quantitatives sont très problématiques avec ce genre de données (cf. par exemple Gleitman et al., 1984 pour plus de détails). Il convient donc d'être assez pessimiste quant à la capacité de considérations a priori ou d'études de corpus de valider ou invalider l'argument de la pauvreté du stimulus.

Une expérience récente commence à étudier empiriquement l'argument de la pauvreté du stimulus (Lidz, Gleitman & Gleitman, 2003 ; voir également Lidz & Gleitman, 2004)[9]. Considérons les exemples suivants en français :

(2.6) Jean dort.

(2.7) Jean voit Marie.

[9]Une autre expérience a été proposée par Lidz, Waxman et Freedman (2003). Or, on peut avoir l'impression que la logique de cette expérience présuppose que les enfants de 18 mois aboutissent aux mêmes hypothèses que les linguistes après leur doctorat ; il existe donc maintes interprétations alternatives de leurs données.

(2.8) Jean ouvre la porte.

En (2.6), 'Jean' est le sujet d'une phrase *intransitive* car *un* agent suffit pour dormir ; en (2.7), 'Jean' est le sujet et 'Marie' l'objet d'une phrase *transitive* puisqu'il faut quelqu'un qui voit et quelqu'un qui est vu. Le sens de (2.8) est plus subtil. (2.8) signifie que Jean fait en sorte que la porte soit ouverte. C'est ce que l'on appelle un prédicat *causatif*, et il est différent d'un prédicat transitif : en (2.7), Jean n'est pas la cause que Marie voit quelque chose mais Jean commet un acte dont Marie est la victime. En français, le suffixe '-iser' comme en 'Jean carbonise Marie' peut exprimer un sens causatif.

En kannada, une langue dravidienne parlée dans le sud-ouest de l'inde, le sens causatif est exprimé par un suffixe verbal spécial. Ce suffixe exprime toujours un sens causatif mais il y a également des verbes qui ont un sens causatif sans en porter le suffixe (voir Lidz, Gleitman & Gleitman, 2003 et les références dans cet article). Lidz, Gleitman et Gleitman (2003) ont étudié comment les enfants parlant le kannada traitent le sens causatif. Ils se sont demandé si les enfants l'apprennent grâce à un mécanisme inné qui 'sait' que les prédicats avec deux arguments peuvent avoir un sens causatif ou grâce à un mécanisme d'induction général qui apprendrait le sens causatif en analysant les phrases auxquelles l'enfant est confronté dans son environnement. La première de ces deux hypothèses prédit que les enfants devraient accepter un sens causatif également en absence de morphologie causative — même si les phrases correspondantes peuvent être agrammaticales en kannada. La deuxième hypothèse prédit que les enfants devraient accepter un sens causatif uniquement en présence de morphologie causative — puisque le suffixe causatif est un bon indicateur d'un sens causatif. Alors que les adultes parlant le kannada ont accepté le sens causatif plus pour les phrases avec une morphologie causative que pour les phrases sans une telle morphologie, les enfants ont interprété les phrases avec deux arguments comme causatives — indépendamment de si le suffixe causatif était présent. Lidz, Gleitman et Gleitman (2003) en ont

conclu que les enfants utilisent une stratégie innée pour apprendre le sens causatif — sinon ils auraient utilisé l'indice 'le plus fiable' qu'est le suffixe causatif.

Or, Lidz, Gleitman et Gleitman (2003) considèrent que la morphologie causative est un indice fiable pour un sens causatif parce que la probabilité conditionnelle d'un sens causatif est élevée quand le suffixe causatif est présent. Par contre, ils n'évaluent pas la probabilité conditionnelle inverse, celle d'une morphologie causative quand le sens est causatif. Pourtant, cette probabilité conditionnelle permettrait aux enfants d'apprendre que les phrases sans morphologie causative peuvent avoir un sens causatif : Si l'on sait que rencontrer un pitbull est le prédicteur le plus fiable d'être mordu, on n'ignorera pour autant pas que d'autres chiens peuvent également mordre — ce qu'on devrait faire en suivant le raisonnement de Lidz, Gleitman et Gleitman (2003) car on devrait ignorer qu'il y a une certaine probabilité d'être mordu également quand le meilleur indicateur n'est pas présent. En effet, en reconnaissant que « transitivity is a probabilistic cue to causativity » (p. 157), Lidz, Gleitman et Gleitman (2003) admettent que la probabilité conditionnelle inverse véhicule de l'information qui pourrait indiquer aux enfants que les prédicats avec deux arguments peuvent avoir un sens causatif —indépendamment de la présence du suffixe causatif. En effet, n'importe quel mécanisme sensible aux corrélations saurait utiliser cette information. Par conséquent, les enfants auraient pu apprendre qu'une phrase avec deux arguments peut avoir un sens causatif — indépendamment de la morphologie causative — à partir d'une analyse de leur environnement.

La complexité du langage soulève la question de savoir s'il est possible d'obtenir des éléments de réponse à la question ce qu'apporte l'enfant et ce qu'apporte l'environnement à l'acquisition du langage à partir de phénomènes aussi complexes que les règles syntactiques, et si ces recherches ne devraient pas être complétées par l'étude de systèmes expérimentaux radicalement simplifiés ; le rapport de tels systèmes avec le langage est in-

certain, mais on peut au moins contrôler l'information véhiculée par l'environnement.

D'autre coté, j'ai présenté l'argument de la pauvreté du stimulus comme un argument *logique* pour décider entre deux scénarios de l'acquisition du langage et c'est en effet dans cette forme qu'il est généralement discuté. Or, on peut le considérer également comme un argument sur le système *biologique* qu'est le langage ; il semble que c'est de cette manière que cet argument ait été envisagé par Chomsky lui-même. De ce point de vue, il semble effectivement assez peu probable que des capacités complexes comme le langage n'aient pas de base innée forte (pour des arguments similaires, voir par exemple Gallistel, 1990, 2000).

En conclusion, le problème de l'induction, les travaux sur l'apprénabilité et sur l'argument de la pauvreté du stimulus montrent que si l'enfant apprend des règles, les mécanismes d'induction correspondants doivent être complétés par des contraintes innées déterminant les généralisations admissibles ; en absence de telles contraintes, un mécanisme symbolique ne saurait pas apprendre les règles appropriées. Par conséquent, l'enjeu de la question si l'esprit humain fait appel à des calculs symboliques est de savoir s'il est doté de prédispositions représentationnelles innées.

Afin de pouvoir chercher les moyens pour tester les prédictions de l'hypothèse que l'esprit humain a accès à des opérations symboliques, il faut déterminer les hypothèses alternatives possibles. Ensuite, on peut contraster les prédictions respectives des deux théories. L'alternative au traitement symbolique est proposée par le connexionisme, la version contemporaine de l'empirisme. Je donnerai une brève description de cette théorie, et reviendrai ensuite sur la question comment on pourrait confirmer ou réfuter l'existence de calculs symboliques dans l'esprit humain.

2.3 Une alternative aux règles

La réponse à la question si l'esprit humain est capable de calcul symbolique implique la réponse à la question s'il est contraint par des prédispositions innées ; par conséquent, il est important de trouver une théorie alternative viable contre laquelle le nativisme peut être testé. Ce rôle est actuellement joué par le connexionisme. En effet, Elman et al. (1996) constatent une « tendency in the last decade for many researchers to seek younger and younger competencies in infants and to jump to the conclusion that they must therefore be innate. » Selon eux, « the simulations demonstrate that, although this is a possible conclusion, it is far from a necessary one » (p. 158). Dans l'idéal, le connexionisme serait une *ligne de base* avec des hypothèses minimales contre laquelle on devrait comparer les conclusions nativistes, et on ne saurait pas sous-estimer l'importance d'une telle approche. La pratique actuelle du connexionisme est cependant assez éloignée de cet idéal. Je présenterai maintenant quelques concepts de base de ces modèles ; cette présentation sera incomplète et fort informelle, car l'objectif des travaux présentés dans cette thèse est d'étudier des mécanismes psychologiques et non pas des programmes informatiques.

2.3.1 Principes de base

Le principe fondateur du connexionisme est l'associationnisme : on forme des liens entre les stimuli que l'on rencontre ensemble. Par exemple, si l'on présente régulièrement des sons aux chiens avant de leur donner de la nourriture, les chiens commencent à saliver en réponse aux sons même si l'on leur ne donne pas de nourriture (Pavlov, 1927). Cependant, les coïncidences entre deux stimuli ne sont ni nécessaires ni suffisantes pour la formation des associations. Elles ne sont pas nécessaires parce que les animaux peuvent apprendre des associations entre *l'absence* d'un stimulus et la présence d'un autre (par exemple qu'un son ne prédit jamais de la nourriture si l'animal rencontre le son ailleurs ; voir par exemple Rescorla, 1969). Elles ne sont pas suffisantes non plus car les associations existantes

peuvent empêcher la formation de nouvelles associations ; par exemple, si l'animal a déjà appris que le son prédit la nourriture, il n'apprendra pas une association entre une lumière et la nourriture, car la lumière n'apporte aucune information supplémentaire par rapport au son (voir par exemple Kamin, 1969; Rescorla, 1968; Wagner, Logan, Haberlandt & Price, 1968). Par conséquent, Rescorla et Wagner (1972) ont proposé une théorie de la formation de ce genre d'associations où l'apprentissage dépend de la nouvelle information qu'un stimulus apporte pour une 'prédiction' par rapport aux associations déjà formées (pour une critique de ces modèles associationnistes et un modèle bâti sur le traitement d'information, voir Gallistel & Gibbon, 2000).

Ce que tous les modèles associationist ont en commun est qu'ils sont limités à exploiter certaines formes de coïncidences, et souvent d'interpoler ce qu'ils ont appris grâce à des mesures de similarité. Des représentations explicites d'opérations ou de variables ne sont donc pas nécessaires, car toute information est véhiculée par les stimuli eux-même, leurs coïncidences et leur similarité respective. Ce sont donc des modèles fondamentalement différents des modèles présentés jusqu'ici.

2.3.2 Apprentissage Hebbien

Un des premiers algorithmes exploitant les coïncidences fut proposé par Hebb (1949). Dans l'apprentissage Hebbien, un ensemble de neurones formels est interconnecté par des 'synapses' avec des efficacités différentes. L'efficacité synaptique de la connexion entre deux neurones change en fonction de si les neurones sont actifs ensemble ; elle est augmentée si les neurones sont actifs simultanément, et ne change pas sinon. Si l'on désigne l'efficacité synaptique entre les neurones i et j au moment t par $W_{ij}(t)$ et les sorties des neurones i et j par $\xi_i(t)$ et $\xi_j(t)$, respectivement, le changement de l'efficacité synaptique est donné par :

$$\Delta W_{ij} = W_{ij}(t+1) - W_{ij}(t) = \eta \xi_i(t) \xi_j(t) \tag{2.2}$$

On voit que W_{ij} est essentiellement la corrélation entre les sorties des neurones i et j. L'apprentissage Hebbien semble biologiquement réaliste, car la potentialisation à long terme y ressemble (voir par exemple Paulsen & Sejnowski, 2000)[10]. Il peut être utilisé pour stocker des patterns en mémoire ; une fois que les patterns sont stockés, ils peuvent être lus même lors d'une présentation incomplète. L'apprentissage Hebbien peut également être utilisé pour apprendre des *séquences* ; dans ce cas, les patterns sont des séquences au lieu d'être des 'traits' simultanément présentés.

L'apprentissage d'un pattern non-séquentiel est illustré dans la figure 2.2. Dans cet exemple, chaque neurone code pour un 'pixel' dans un espace bidimensionnel. Un pattern que l'on pourrait stocker est la diagonale. Comme l'équation (2.2) montre, les connexions entre les éléments de la diagonale seront renforcées dans ce cas. Par conséquent, si l'on présente uniquement deux éléments de la diagonale, le troisième sera également activé. La figure 2.2 permet également de voir une limitation de l'apprentissage Hebbien : Si l'on tente de stocker plusieurs patterns chevauchants, les mémoires se mélangeront, et les patterns appris plus tôt disparaîtront. Par exemple, si l'on essaye de stocker en plus du pattern de la figure 2.2 un deuxième pattern qui contient les deux premiers éléments de la diagonale et un pixel hors de la diagonale, les deux patterns vont forcément interférer (cf. par exemple Amit, 1989; French, 1999; von der Malsburg, 1981; McCloskey & Cohen, 1989).

[10] Il convient de noter que l'importance de la potentialisation à long terme (LTP) pour des phénomènes de mémoire est discutée. Alors qu'un parallélisme entre la LTP et des phénomènes de mémoire a été observé fréquemment (pour la première démonstration, voir Morris, Anderson, Lynch & Baudry, 1986), d'autres auteurs ont disputé que ce parallélisme implique que la LTP est 'le' mécanisme de mémoire (voir par exemple Eichenbaum, 1996; Martin, Grimwood & Morris, 2000; Shors & Matzel, 1997).

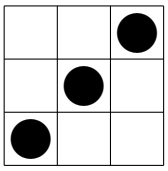


FIG. 2.2 – Exemple pour l'apprentissage Hebbien. Chaque neurone code pour un point dans un espace bidimensionnel ; le pattern présenté ici active la diagonale.

2.3.3 Perceptrons et modèles similaires

Un des avantages majeurs de l'apprentissage Hebbien est qu'il est *non-supervisé* ; en d'autres termes, il ne nécessite pas de professeur externe. Cet avantage n'est pas partagé par la plupart des modèles qui sont pour le moment les plus populaires. Le précurseur de ces modèles est le *perceptron* (Rosenblatt, 1957, 1958). Le perceptron est un neurone formel avec un nombre fini d'entrées et une sortie ; il doit apprendre à associer une valeur cible aux stimuli qu'il perçoit. Le principe du perceptron est illustré dans la figure 2.3. Chaque neurone d'entrée transmet au neurone de sortie son activité pondérée par l'efficacité de la connexion entre le neurone en question et le neurone de sortie. Si la sortie du premier neurone d'entrée est par exemple 0.8, et l'efficacité synaptique de son lien au neurone de sortie est 0.5, l'entrée correspondante du neurone de sortie est $0.8 \cdot 0.5 = 0.4$. Le neurone de sortie transforme la somme pondérée de ses entrées avec une fonction non-linéaire[11] ; la somme transformée est la sortie du perceptron.

Comment un tel système peut-il apprendre ? La tâche d'un perceptron est d'associer des valeurs-cibles à des stimuli. En d'autres termes, un perceptron peut classifier les stimuli dans deux (ou plusieurs) catégories. Lorsque l'on présente un stimulus au perceptron, ce-dernier calcule une sortie, mais celle-ci ne correspond en général pas à la valeur correcte. On optimise ensuite les poids synaptiques entre les neurones d'entrée et le neurone de sortie pour minimiser la différence entre la sortie souhaitée

[11] En général, la somme contient un terme de biais, mais on l'ignorera pour simplifier l'exposition.

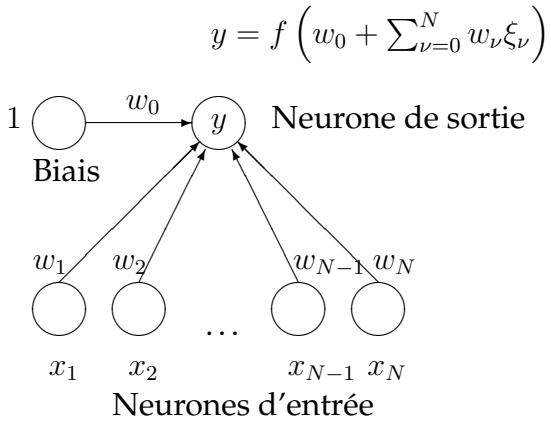


FIG. 2.3 – Un perceptron est un neurone formel. Les neurones d'entrée sont connectés à un neurone de sortie ; ce-dernier prend la somme de ses afférences pondérée par leurs poids synaptiques et la transforme avec une fonction non-linéaire, en général une fonction logistique ou une fonction-seuil (f dans la figure).

(c'est-à-dire la valeur cible) et la sortie que le perceptron a réellement calculé.

Si la sortie y du perceptron est donnée par

$$y = f\left(w_0 + \sum_{\nu=0}^{N} w_\nu \xi_\nu\right) \tag{2.3}$$

avec une fonction d'activation f différentiable et si la sortie cible est y_0, on peut définir une fonction d'erreur $E = 0.5\,(y - y_0)^2$. En minimisant cette fonction par rapport aux poids, on obtient :

$$\partial_{w_\mu} E = (y - y_0)\, f'\left(w_0 + \sum_{\nu=0}^{N} w_\nu \xi_\nu\right) \xi_\mu \equiv \delta_\mu \xi_\mu \tag{2.4}$$

Pour minimiser la fonction d'erreur, on change les poids synaptiques

en suivant la formule suivante :

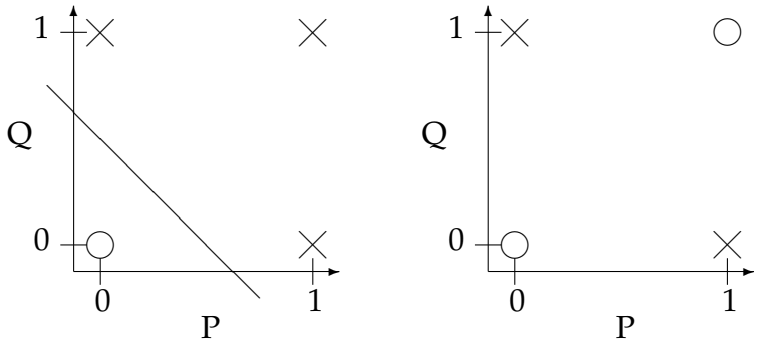
$$w_\mu(t+1) = w_\mu(t) - \eta\delta_\mu\xi_\mu \tag{2.5}$$

où η est une constante positive. L'équation 2.5 montre que le changement d'un poids est proportionnel à l'activation de l'unité d'entrée correspondante. Par conséquent, si son activation est 0, le poids correspondant ne changera pas.

On peut prouver que cette procédure converge dans un nombre fini de pas vers une solution — si une solution existe (Rosenblatt, 1957). Or, Minsky et Papert (1969) montrèrent que des solutions existent uniquement pour les problèmes de classification *linéairement séparables*. En d'autres termes, on doit pouvoir tracer un hyper-plane qui sépare les exemples des deux catégories (cf. figure 2.4).

La découverte qu'un perceptron ne peut pas apprendre les problèmes non linéairement séparables implique qu'il est incapable d'apprendre des problèmes aussi simples que le 'ou' exclusif (cf. figure 2.4). Par conséquent, ce résultat a donné un coup d'arrêt aux recherches sur les réseaux de neurones formels. Cependant, il était connu que la limitation de ne pouvoir traiter que les problèmes linéairement séparables ne s'appliquaient pas aux perceptrons avec plusieurs 'couches' de neurones (cf. figure 2.5). Contrairement au perceptron, ces réseaux contiennent des couches de neurones supplémentaires, baptisées des couches 'cachées', entre les neurones d'entrée et les neurones de sortie. Rumelhart, Hinton et Williams (1986) développèrent un mécanisme d'apprentissage pour de tels systèmes, le célèbre algorithme de rétro-propagation. Grâce à cet algorithme, la recherche sur les réseaux connexionnistes en sciences cognitives prit un nouvel essor.

Le principe de l'algorithme de rétro-propagation est similaire à celui de la procédure de convergence du perceptron : On change les poids des



(a) Ou inclusif (b) Ou exclusif

FIG. 2.4 – Illustration de la séparabilité linéaire. On veut classes les points en deux catégories. Les membres des deux catégories sont désignés par des croix et des cercles, respectivement. (a) 'P $\text{ou}_{\text{inclusif}}$ Q' est vrai si au moins un de P et Q sont vrais. On peut tracer une ligne (c'est-à-dire un hyperplan en deux dimensions) séparant les points pour lesquels 'P $\text{ou}_{\text{inclusif}}$ Q' est vrai (croix) des points pour lesquels 'P $\text{ou}_{\text{inclusif}}$ Q' est faux (cercles). Par conséquent, l'ou inclusif est linéairement séparable. (b) 'P $\text{ou}_{\text{exclusif}}$ Q' est vrai si exactement un de P et Q est vrai et faux autrement. Il est impossible de trouver une ligne séparant les points pour lesquels 'P $\text{ou}_{\text{exclusif}}$ Q' est vrai (croix) des points pour lesquels 'P $\text{ou}_{\text{exclusif}}$ Q' est faux (cercles). Par conséquent, l'ou exclusif n'est pas linéairement séparable, et ne peut pas être appris par un perceptron.

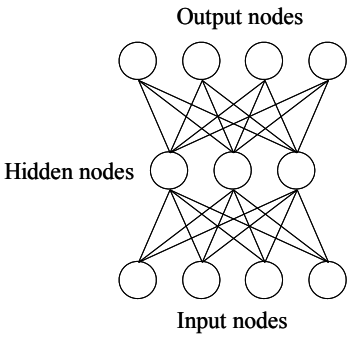


FIG. 2.5 – Réseau de neurones avec une couche cachée.

connexions pour minimiser l'erreur. Le nom de rétro-propagation vient du fait qu'il est computationnellement plus efficace de calculer d'abord les changements des poids entre la dernière couche cachée et les neurones de sortie et à la fin les changements entre les neurones d'entrée et la première couche cachée. Avec la procédure d'apprentissage, les perceptrons à plusieurs couches héritent également un inconvénient : Ils subissent également l'oubli catastrophique (French, 1999; McCloskey & Cohen, 1989) ; en d'autres termes, les nouveaux exemples peuvent interférer avec les exemples appris auparavant.

Si l'on équipe un tel réseau de plusieurs neurones de sortie, il peut apprendre des éléments des systèmes inflexionnels. Dans la première démonstration de cette capacité, Rumelhart et McClelland (1986) demandèrent à leur modèle d'associer les formes des verbes anglais du présent aux formes du passé ; le succès du modèle pava le chemin à l'essor de la modélisation connexionniste que l'on observe à ce jour. Sans discuter les multiples défauts de cette classe de modèles (voir par exemple Fodor & Pylyshyn, 1988; Marcus, 1998a, 1998b; Pinker & Prince, 1988; Pinker, 1991; Pinker & Ullman, 2002), je me contenterai d'une observation par rapport aux équations d'apprentissage. Comme dans le cas du perceptron, un réseau multicouche apprend en minimisant l'erreur de sa sortie par rapport aux poids des connexions synaptiques. Or, le changement des poids synaptiques est proportionnel à l'activité du neurone dont émane une connexion (cf. équation 2.5). Comme un produit est 0 quand un des facteurs est 0, les connexions émanant des neurones inactifs ne changeront donc jamais (Marcus, 1998b). De tels réseaux ne peuvent donc pas généraliser dans les régions de l'espace des stimuli où ils n'ont jamais 'vu' d'exemples. Marcus (1998b) a conclu que les réseaux de neurones ne peuvent pas généraliser au-delà des exemples qu'ils ont vus. Or, cette conclusion dépend évidemment de l'hypothèse que représenter les stimuli en vecteurs binaires orthonormaux[12] est le format de représentation de

[12]Un ensemble de vecteurs est orthonormal si les vecteurs sont de 'longueur' 1 et s'ils sont orthogonaux par paires.

l'esprit — et non pas seulement une facilité technique des réseaux de neurones contemporains.

Les modèles présentés jusqu'ici associent les entrées aux sorties ; les entrées sont des patterns présentés simultanément. Or, le langage véhicule l'information dans une série temporelle ; les réseaux doivent donc pouvoir représenter les séquences, ce qui est d'une difficulté notoire (voir par exemple Mozer, 1993). La solution le plus couramment utilisée est de rajouter des neurones 'de copie' comme dans le 'Simple Recurrent Network' (SRN) de la figure 2.6 (Elman, 1990). Dans un SRN, les neurones d'entrée sont connectés à une couche de neurones cachée qui est en revanche connectée aux neurones de sortie. La couche cachée copie également ses activations dans une couche de 'contexte', qui est en revanche connectée à la couche cachée. Comme résultat, la couche cachée reçoit deux entrées : le stimulus actuel des neurones d'entrée et une copie de son activation de la couche de contexte. Comme la couche cachée d'un SRN garde une trace de son activité antérieure, le réseau est sensible aux informations temporelles. Même s'il y a encore une grande variété d'autres modèles, je ne les discuterai pas car les modèles utilisant la rétro-propagation, en particulier le SRN, sont très nettement les modèles les plus populaires. Des variations de ce modèle ont été utilisées pour simuler par exemple des aspects de l'acquisition de la grammaire (voir par exemple Elman, 1990, 1993; Rohde & Plaut, 1999), des aspects de la compétence linguistique (voir par exemple Christiansen & Curtin, 1999), l'apprentissage de règles simples (voir par exemple Altmann, 2002) ou encore l'apprentissage des langues formelles (voir par exemple Rodriguez, Wiles & Elman, 1999; Rodriguez, 2001).

En conclusion, différents chercheurs proposent que les mécanismes associationnistes pourraient être une alternative à la manipulation de symboles. Il existe une grande diversité de tels modèles ; certains peuvent mémoriser des patterns, d'autres classifier des exemples et encore d'autres peuvent apprendre des séquences. Ce que tous ces modèles ont en com-

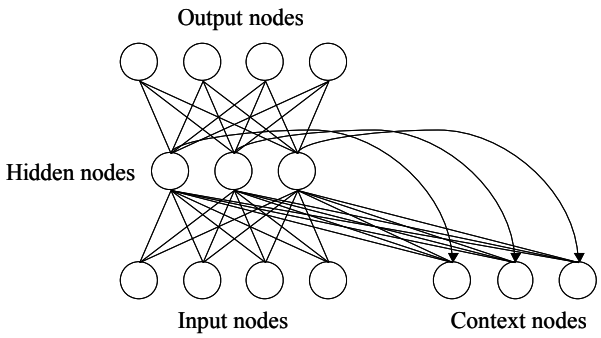


FIG. 2.6 – Simple Recurrent Network. L'activation de la couche cachée est à chaque instant copiée dans la couche de contexte ; la couche de contexte fournit en revanche des entrées à la couche cachée. Ces connexions *récurrentes* sont la raison pour laquelle le réseau peut apprendre des séries temporelles.

mun est qu'ils sont exclusivement sensibles à certaines formes de 'coïncidences' entre des stimuli et qu'ils peuvent interpoler (ou généraliser) grâce à la similarité entre les stimuli. Pour de tels modèles, toute information est véhiculée par les stimuli eux-même et ils n'apportent rien à une tâche d'apprentissage — sauf leur sensitivité aux coïncidences et leur capacité à interpoler grâce à des mesures de similarité. Grâce aux hypothèses minimales qu'incorporent ces modèles, ils peuvent servir de ligne de base quand une capacité est considérée comme innée.

2.4 Détecter des calculs symboliques

Faut-il des mécanismes symboliques pour expliquer les computations sous-jacentes au langage ou les mécanismes associatifs sont-ils suffisants ? On a vu que les considérations a priori ou théoriques sont peu prometteuses pour apporter une réponse à cette question ; même les arguments qui font référence à des propriétés formelles des modèles associationnistes contemporains font en réalité des hypothèses arbitraires (voir par exemple Marcus, 1998b). Par conséquent, il est probablement impossible d'affirmer l'existence de computations symboliques à partir de ces considérations

très générales. Il faut donc utiliser des cas d'étude spécifiques pour aborder cette question.

Brièvement après la publication du premier modèle connexionniste du *past-tense* (Rumelhart & McClelland, 1986), Fodor et Pylyshyn (1988) publièrent une critique fondamentale des approches purement statistiques en synthétisant des propriétés cruciales de la cognition humaine :

1. **Productivité de la pensée.** On peut produire un nombre illimité de nouvelles pensées ou phrases ; on a rencontré cet argument déjà lors de la discussion des capacités sous-jacentes au langage (Chomsky, 1957; von Humboldt, 1836).

2. **Systematicité.** La systematicité reflète le fait que « the ability to produce/understand some of the sentences is intrinsically connected to the ability to produce/understand certain of the others. » Par exemple, si l'on peut comprendre la phrase 'Jean aime Marie', on peut également comprendre la phase 'Marie aime Jean'.

3. **Compositionalité.** La compositionalité a deux aspect interdépendants. Le premier peut se résumer dans les mots de Fodor et Pylyshyn (1988) : « Insofar as a language is systematic, a lexical item must make approximately the same semantic contribution to each expression in which it occurs. It is, for example, only insofar as 'the', 'girl', 'loves' and 'John' make the same semantic contribution to 'John loves the girl' that they make to 'the girl loves John' that understanding the one sentence implies understanding the other. » Le deuxième aspect de la compositionalité est ce que Hauser, Chomsky et Fitch (2002) ont élevé au rang de la propriété fondamentale du langage, quoique sous le nom 'récursivité' : Le langage (et probablement la pensée) ont une grammaire combinatoire. En d'autres termes, les constituants (qui peuvent être évalués sémantiquement) peuvent avoir des constituants (que l'on peut également évaluer sémantiquement). Dans la phrase 'le chat mange la souris blanche' (voir figure 2.7 pour une structure simplifiée), par exemple, 'le chat', 'la souris blanche' et 'mange la

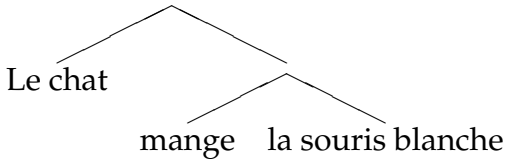


FIG. 2.7 – Structure simplifiée illustrant un aspect de la compositionalité. Les constituants 'le chat', 'la souris blanche' et 'mange la souris blanche' sont combinés par les règles syntactiques dans une structure qui peut être un autre constituant.

souris blanche' sont des constituants qui sont combinés par les règles syntactiques dans une structure qui peut elle-même être un constituant, par exemple en 'Jean voit que le chat mange la souris blanche.'

4. **Cohérence Inférentielle.** Fodor et Pylyshyn (1988) constatent que « the idea that organisms should exhibit similar cognitive capacities in respect of logically similar inferences is so natural that it may seem unavoidable. But, on the contrary : there's nothing in principle to preclude a kind of cognitive model in which inferences that are quite similar from the logician's point of view are nevertheless computed by quite different mechanisms ; or in which some inferences of a given logical type are computed and other inferences of the same logical type are not. » La cohérence inférentielle est précisément l'idée que des capacités cognitives similaires sont responsables pour des inférences logiquement similaires.

Fodor et Pylyshyn (1988) ont défini des propriétés *qualitatives* que doit avoir tout modèle cognitif. Dans la mesure où les modèles connexionnistes sont des modèles cognitifs, ils doivent donc refléter ces propriétés — ou expliquer pourquoi la cognition humaine semble les respecter si elle ne les a pas vraiment. Même si l'on n'accepte pas que les considérations de Fodor et Pylyshyn (1988) auraient pu clore le débat sur l'existence des représentations mentales symboliques, elles auraient pu servir de guide pour l'étude de la question si l'esprit est doté d'opérations symboliques, par exemple en testant systématiquement si les réseaux connexionnistes ou les modèles

symboliques respectent ces propriétés.

2.4.1 Le débat sur la morphologie inflexionnelle

Le cas d'étude le plus souvent choisi pour contraster les prédictions des modèles symboliques et associatifs est la morphologie inflexionnelle, en particulier le *past-tense* anglais. La plupart des verbes anglais sont réguliers. Alors qu'on peut décrire la formation d'une inflexion régulière comme une application d'une règle à une variable ('rajoute le morphème /-ed/ à X', où X est la racine d'un verbe régulier), les connexionnistes ont tenté de l'expliquer avec des calculs généraux associationnistes.

Les modèles de la morphologie inflexionnelle se repartent en trois classes. Certains modèles proposent que tous les mots sont entièrement décomposés dans leurs morphèmes constituants (voir par exemple Allen & Badecker, 1999; Halle & Mohanan, 1985; Kiparsky, 1982; Taft & Forster, 1975), d'autres que l'inflexion résulte exclusivement de computations statistiques (voir par exemple Hahn & Nakisa, 2000; Hare, Elman & Daugherty, 1995; Joanisse & Seidenberg, 1999; MacWhinney & Leinbach, 1991; Plunkett & Marchman, 1993; Plunkett & Nakisa, 1997; Rumelhart & McClelland, 1986) et encore d'autres que l'inflexion régulière repose sur des règles tandis que l'inflexion irrégulière requiert des mécanismes associatifs (voir par exemple Baayen, Dijkstra & Schreuder, 1997; Clahsen, Aveledo & Roca, 1992; Clahsen, 1999; Marcus et al., 1992; Marcus, Brinkmann, Clahsen, Wiese & Pinker, 1995; Marslen-Wilson & Tyler, 1997, 1998; Pinker, 1991, 1999; Pinker & Prince, 1988) ; l'étendue du débat actuel peut être appréciée en consultant les revues et points de vue dans un numéro récent de Trends in Cognitive Sciences (voir Pinker & Ullman, 2002 et les réponses à cet article).

Les différents modèles de la morphologie inflexionnelle ont été étudiés dans une variété de langues et avec de nombreuses techniques comportementales et physiologiques, incluant l'amorçage cross-modal (voir par

exemple Marslen-Wilson, Tyler, Waksler & Older, 1994), la production élicitée (voir par exemple J. Kim, Pinker, Prince & Prasada, 1991), l'études d'erreurs (voir par exemple Stemberger, 2002), des violations pour des mots réguliers et irrégulier dans des expériences d'imagerie cérébrale (voir par exemple Penke et al., 1997) et dans des études neuropsychologiques (voir par exemple Marslen-Wilson & Tyler, 1997; M. T. Ullman et al., 1997). Cependant, les résultats obtenus dans ce domaine sont conflictuels. Un résultat classique de l'amorçage cross-modal est que les mots fléchis réguliers s'amorcent tandis que ceci n'est pas le cas pour les mots irréguliers. Par exemple, 'walked' amorce 'walk', mais 'gave' n'amorce pas 'give'. Alors que ces résultats ont été interprétés comme preuve que l'inflexion régulière et l'inflexion irrégulière reposent sur des mécanismes qualitativement différents, Allen et Badecker (2002) ont montré que ces résultats pourraient être un artefact de la similarité orthographique entre les amorces et les cibles. Un autre domaine conflictuel est l'effet des lésions cérébrales sur le traitement de mots réguliers et irréguliers. Tandis que Marslen-Wilson et Tyler (1997) ont démontré une double-dissociation entre le traitement des verbes réguliers et irréguliers (voir également Marslen-Wilson & Tyler, 1998; Tyler, Randall & Marslen-Wilson, 2002 ; M. T. Ullman et al., 1997; M. T. Ullman, 2001 pour des travaux sur des maladies neurodégénératives), Joanisse et Seidenberg (1999) ont montré que des 'lésions' des sous-systèmes phonologiques ou sémantiques d'un réseaux connexionniste peuvent également produire une telle dissociation. En réponse, Tyler et al. (2002) ont observé que le modèle de Joanisse et Seidenberg (1999) prédit des corrélations entre les déficits phonologiques et des problèmes spécifiques pour le traitement du passé régulier, et ont trouvé des patients qui ne présentent pas de telles corrélations[13].

[13]Il est peut-être possible de trouver des patients qui présentent les corrélations prédites par Joanisse et Seidenberg (1999). Or, comme leur modèle propose une relation *causale* entre les déficits phonologiques ou sémantiques et les problèmes pour les conjugaisons régulières et irrégulières, déjà l'existence des patients de Tyler et al. (2002) réfute leur modèle.

On pourrait allonger la liste des résultats disputés dans le domaine de la morphologie inflexionnelle ad libitum ; il apparaît que la complexité intrinsèque de ces computations linguistiques rend difficile voire impossible d'exclure définitivement des explications alternatives, et d'affirmer le rôle des computations symboliques pour la morphologie. Comme l'apprénabilité ou l'argument de la pauvreté du stimulus, la morphologie illustre le besoin d'utiliser des systèmes expérimentaux radicalement simplifiés afin de pouvoir analyser les propriétés des computations statistiques et symboliques. Une fois de tels systèmes simplifiés sont compris, on peut espérer appliquer ces connaissances aux computations linguistiques.

RÉSUMÉ

Différents auteurs ont proposé que l'esprit est capable de manipuler des symboles ; les symboles *représentent* des entités externes à l'esprit et peuvent être manipuler grâce à des règles. Cette capacité expliquerait pourquoi on peut généraliser, par exemple en produisant de nouvelles phrases. Or, le problème de l'induction, la théorie de l'apprénabilité des langues ainsi que l'argument de la pauvreté du stimulus montrent que si l'esprit peut manipuler des symboles, il doit être équipé d'importantes contraintes innées qui le guident vers les généralisations *acceptables*. La question de l'existence des règles mentales est donc fondamentale pour une compréhension du fonctionnement de l'esprit.

Les modèles associationnistes pourraient être une alternative à la manipulation des symboles. De tels modèles sont exclusivement sensibles à certaines formes de coïncidences et à la similarité entre les items. Ce sont donc des modèles avec des hypothèses représentationnelles minimales qui doivent être réfutés avant qu'on puisse affirmer l'existence d'une opération symbolique dans l'esprit.

Les modèles symboliques et associationnistes sont généralement comparés dans le domaine de la morphologie inflexionnelle, mais aucun consensus sur les mécanismes sous-jacents n'a émergé. Une autre approche, moins fréquemment rencontrée mais plus prometteuse, est de dériver des prédictions *qualitatives* des mécanismes symboliques et associationnistes (Fodor & Pylyshyn, 1988; Gallistel, 1990; Gallistel & Gibbon, 2000) ; c'est cette approche que je suivrai avec les travaux présentés ici.

The most savage controversies are those about matters as to which there is no good evidence either way.

An Outline of Intellectual Rubbish
Betrand Russell

Chapitre 3

Systèmes expérimentaux simplifiés

Les arguments pour ou contre les représentations mentales symboliques présentés jusqu'ici ont utilisé des expériences sur des computations linguistiques ou encore des considérations linguistiques. Or, la complexité du langage a rendu difficile d'imaginer des expériences pour lesquelles on ne pourrait pas trouver des explications alternatives. Pour éviter ces problèmes, d'autres chercheurs ont développé des systèmes expérimentaux fort simplifiés qui permettent d'étudier les computations statistiques et symboliques. La simplicité de ces expériences a également permis d'étudier les capacités des très jeunes enfants et même des animaux non-humain — ce qui est une *conditio sine qua non* pour pouvoir espérer approcher la question ce qui est inné aux enfants humains. Dans ce chapitre, je présenterai quelques-unes de ces expériences.

3.1 Capacités statistiques plus ou moins précoces

L'étude des computations symboliques et statistiques a reçu un nouvel élan grâce au développement de la technique de l'apprentissage de

langues artificielles (Aslin, Saffran & Newport, 1998; Hauser, Newport & Aslin, 2001; Saffran, Aslin & Newport, 1996; Saffran, Newport & Aslin, 1996). Cette technique permet de contrôler exactement les informations dont disposent les sujets, et par conséquent d'analyser les processus en jeu. Ces expériences ont été utilisées pour démontrer que les sujets sont sensibles aux *probabilités de transition* (TPs). Les TPs sont les probabilités conditionnelles de rencontrer un élément dans une séquence sachant l'élément précédent. Si les éléments sont des syllabes σ_i dans un signal de parole, on a :

$$TP\left(\sigma_i \rightarrow \sigma_{i+1}\right) = P\left(\sigma_{i+1} \left| \sigma_i \right.\right) = \frac{P\left(\sigma_i \sigma_{i+1}\right)}{P\left(\sigma_i\right)} \tag{3.1}$$

Dans la pratique, les probabilités sont estimées par les fréquences correspondantes. La probabilité de transition entre σ_i et σ_{i+1} est donc la fréquence de la sous-séquence $\sigma_i \sigma_{i+1}$ normalisée par la fréquence de la syllabe σ_i.

La motivation historique de considérer les TPs était qu'elles pourraient permettre aux apprentis de découper un signal de parole continu en des morceaux correspondant aux mots. En effet, les enfants sont confrontés à des signaux de parole continus, et n'ont pas accès à des indices fiable indiquant les frontières des mots. Par conséquent, avant même de pouvoir commencer à apprendre les mots, les enfants doivent *découper* le signal en ses mots constituants ; ce découpage est connu sous le nom de *segmentation*. Considérons les exemples suivants :

(3.1) Je suis $\boxed{\text{mala}}$de dort.

(3.2) C'est $\boxed{\text{ma chaise}}$.

Dans les deux exemples, on rencontre la syllabe /ma/ (dans les boîtes). Comment peut-on savoir si /ma/ et la syllabe suivante appartiennent au même mot ? C'est là que des calculs de TP pourraient être utiles : La probabilité conditionnelle d'aller de /ma/ vers /la/ est plus grande que celle

d'aller de /ma/ vers /ʃɛz/ parce que /ma/ peut être suivie par beaucoup de mots différents qui commencent avec des syllabes différentes. Par conséquent, un enfant pourrait utiliser les TPs comme indication où se trouvent les frontières des mots — s'il est sensible aux TPs. Même si des études computationnelles plus récentes ont montré que les TPs ne sont pas suffisantes pour extraire les mots d'un signal continu (Yang, 2004 ; voir également Brent & Cartwright, 1996 pour la conclusion que d'autres indices que les co-occurrences des syllabes ou des phonèmes pourraient être utiles pour segmenter un signal continu), on considérera les calculs des TPs quand-même parce qu'ils permettent d'étudier une capacité computationnelle statistique bien documentée, et parce qu'ils pourraient néanmoins être *un* indice utilisé pour segmenter de la parole.

Grâce à la technique de l'apprentissage de langues artificielles, on sait maintenant que non seulement les adultes humains mais également les enfants de huit mois et les singes sont sensibles aux TPs entre syllabes adjacentes (Aslin et al., 1998; Hauser et al., 2001; Saffran, Newport & Aslin, 1996; Saffran, Aslin & Newport, 1996). Dans ces expériences, les sujets ont d'abord entendu une séquence de syllabes continue. Cette séquence était une concaténation de quatre pseudo-mots trisyllabiques ; les TPs entre les syllabes à l'intérieur des mots était plus élevées que les TP entre les syllabes traversant une frontière de mot.

Pendant la phase de test, les sujets devaient choisir entre deux alternatives[1]. Une alternative était un mot défini par des TPs relativement élevées. L'autre alternative était un 'mot partiel' ; de tels items sont apparus dans la séquence de parole mais coupaient une frontière de mots. Si 'dutaba' et 'tutibu' sont des mots, on peut former des mots partiels en prenant ou bien la dernière syllabe d'un mot et les deux premières de l'autre (comme dans 'ba | tuti' dans l'exemple (3.3)) ou bien les deux dernières syllabes

[1]Pour les enfants et les singes, les 'choix' correspondaient aux différences de temps du regard et du nombre d'orientations vers un son, mais on ignorera les différences méthodologiques entre les différentes populations.

d'un mot et la première de l'autre (comme dans 'taba | tu' dans l'exemple (3.4)). De cette manière, les items entre lesquels les sujets devaient choisir étaient tous les deux apparus dans la séquence, mais les TPs à l'intérieur des mots était plus élevée que celle à l'intérieur des mots partiels ; les sujets ont choisi les items avec les TPs plus élevées.

(3.3) duta ba | tuti bu

(3.4) du taba | tu tibu

Or, comme la fréquence de tous les mots était identique, les mots étaient plus fréquents que les mots partiels. Par conséquent, les sujets auraient pu être sensibles uniquement à la fréquence des items, et non pas aux TPs entre les syllabes qui les composaient. Aslin et al. (1998) ont remédié à ce problème en créant une nouvelle séquence de parole. Cette séquence était de nouveau une concaténation de quatre mots. Contrairement aux expériences précédentes, la fréquence de ces mots n'était pas la même, mais deux mots apparaissaient deux fois plus fréquemment que les deux autres. Le résultat de cette manipulation était que la fréquence des mots 'rares' était la même que la fréquence des mots partiels formés à partir des mots fréquents. Par conséquent, les mots rares et les mots partiels différaient exclusivement dans les TPs entre leurs syllabes constituantes, et toute préférence ne peut être attribuée qu'à une sensitivité aux TPs. En effet, les sujets ont toujours préféré les mots par rapport aux mots partiels.

Alors que la motivation historique des expériences sur la sensitivité aux TPs était qu'elles pourraient être utiles pour segmenter un signal de parole continu, il est peu probable que la sensitivité aux TPs est spécifique au langage ; des capacités similaire ont été observées pour les tons purs (Saffran, Johnson, Aslin & Newport, 1999) ou des formes visuels (Fiser & Aslin, 2001, 2002a, 2002b), et des animaux non-linguistiques peuvent également segmenter un signal de parole en exploitant des TPs (Hauser et al., 2001).

3.2 Capacités symboliques plus ou moins précoces

On a vu que les arguments sur l'existence des règles à partir de considérations très générales ou fortement liées aux computations linguistiques ont été mises en doute systématiquement ; il fallait donc des systèmes expérimentaux très simplifiés pour éviter ces problèmes. Dans le cas des computations statistiques, Aslin et collaborateurs ont développé un tel système expérimental avec l'apprentissage des langues artificielles (Aslin et al., 1998; Fiser & Aslin, 2001, 2002a, 2002b; Hauser et al., 2001; Saffran, Newport & Aslin, 1996; Saffran, Aslin & Newport, 1996; Saffran et al., 1999). Peut-on trouver un système similaire pour des computations symboliques ?

Un tel système expérimental a été imaginé par Marcus et al. (1999). Ils se sont demandés si les enfants de sept mois peuvent généraliser les structures avec répétitions. Plus précisément, ils ont familiarisé un group d'enfants avec des 'phrases' avec la structure ABA et un autre groupe d'enfants avec des phrases avec la structure ABB. 'A' et 'B' représentent des syllabes CV ; une phrase ABA possible était par exemple 'wo — fe — wo.' Pendant la phase de test, Marcus et al. (1999) ont mesuré le temps de regard des enfants et pour des phrases consistantes avec des nouvelles syllabes (par exemple avec des phrases ABB si les enfants ont été familiarisés avec des phrases ABB) et pour les phrases inconsistantes avec des nouvelles syllabes (par exemple pour des phrases ABA si les enfants ont été familiarisés avec des phrases ABB). Les enfants ont regardé plus les phrases inconsistantes que les phrases consistantes. Dans une expérience contrôle, d'autres enfants ont été familiarisés avec des phrases avec les structures AAB ou ABB. La raison de cette expérience était que les enfants dans l'expérience précédente auraient pu discriminer les deux structures ABA et ABB en constatant simplement la présence ou absence d'une répétition. Comme dans l'expérience précédente, les enfants ont regardé plus les phrases inconsistantes que les phrases consistantes. En d'autres termes, ils ont généralisé les structure aux nouveaux exemples.

Pour apprécier la puissance de cette expérience, on doit faire appel à la distinction entre une répétition d'un token et une répétition de type introduite dans la section 2.1. Les enfants dans l'expérience de Marcus et al. (1999) ont dû extraire les structures *indépendamment* des syllabes qui les portaient. Marcus et al. (1999) ont sélectionné les traits phonétiques des syllabes de sorte que les traits utilisés pendant la phase de familiarisation ne portent pas d'information sur les traits utilisés pendant la phase de test. Marcus a proposé à plusieurs reprises que les réseaux connexionnistes ne peuvent pas généraliser les structures comme les enfants dans ses expériences (Marcus, 1998a, 1998b; Marcus et al., 1999; Marcus, 2001). Marcus et al. (1999) ont donc conclu que les réseaux connexionnistes actuels ne sont pas de modèles appropriés pour leurs données.

En plus de cette réfutation du connexionisme actuel, Marcus et al. (1999) ont conclu que « infants [extracted] abstract algebra-like rules that represent relationships between placeholders (variables), such as 'the first item X is the same as the third item Y', or more generally, that 'item I is the same as item J » (p. 79). Cette conclusion peut être comprise de deux manières : Les enfants pourraient représenter les positions sérielles comme variables, et être équipés d'un mécanisme général d'extraction de règles qui découvre des relations entre des variables. Alternativement, les enfants pourraient utiliser un mécanisme plus limité auquel les répétitions sont saillantes. Marcus (2001) semble exprimer le premier point de vue en utilisant une métaphore de *registres* ; en effet, Marcus (2001) propose que les « are central to human cognition » (p. 55) comme ils le sont pour des ordinateurs, et spécule comment des registres pourraient être implémentés dans du tissu neuronal. Une telle position suivrait la traditions d'imaginer l'esprit comme un système symbolique général pour la solution de problèmes computationnels (voir par exemple Anderson, 1993; Marcus et al., 1999; Marcus, 2001; Newell, 1980; Newell & Simon, 1976; Lehman, Laird & Rosenbloom, 1998). Elle serait également compatible avec la notion que la fixation des croyances est similaire à l'inférence scientifique (Fodor, 1983).

Un des objectifs de cette thèse est de clarifier si des structures avec répétition sont généralisées par un mécanisme général d'extraction de règles ou plutôt par un mécanisme spécialisé sensible aux répétitions.

Les chercheurs connexionnistes ont tenté d'expliquer les résultats de Marcus et al. (1999) avec des modèles purement statistiques (voir par exemple Altmann & Dienes, 1999; Altmann, 2002; Christiansen & Curtin, 1999; Christiansen, Conway & Curtin, 2000; Gasser & Colunga, 2000; Hanson & Negishi, 2002; Negishi, 1999; McClelland & Plaut, 1999; Seidenberg & Elman, 1999a, 1999b; Shultz & Bale, 2001). Marcus (1999a, 1999b, 1999c, 1999d, 1999e) a donné des argument (à mon avis) convainquant pourquoi la plupart de ces réseaux ne sont effectivement pas capables de reproduire ses résultats. Or, les résultats de Altmann (2002) et Negishi (1999) suggèrent que l'expérience de Marcus et al. (1999) ne permet effectivement pas d'affirmer qu'elle reflète des calculs symboliques ; je discuterai donc ces simulations en plus de détail.

Altmann (2002) a utilisé un SRN avec une couche cachée supplémentaire entre la couche récurrente et la couche d'entrée (appelée la couche de 'récodage'). Après un pré-entraînement avec une langue simplifiée (Elman, 1990), il a familiarisé le réseau ou bien avec la structure ABA ou bien avec la structure ABB à l'aide des corpus d'entraînement de Marcus et al. (1999). Ensuite, le réseau devait apprendre les items de test comportant — comme dans l'expérience de Marcus et al. (1999) — des nouvelles 'syllabes'. Pour cela, le réseau entendait 20 fois chaque phrase de test ; lors de la dernière itération, la prédiction du réseau pour la dernière syllabe de la phrase a été comparée avec la syllabe cible. Le réseau prédisait les dernières syllabes mieux pour des items consistants que pour des items inconsistants.

Même si la tâche du réseau n'est certainement pas comparable à celle dans les expériences de Marcus et al. (1999), la raison pour les généralisations du réseau est loin d'être évidente. Elles résultent probablement de

deux facteurs. D'abord, le pré-entraînement a probablement généré des chevauchements dans la couche de recodage entre les syllabes de familiarisation et de test — alors celle-ci ne chevauchent pas dans leurs représentations en termes de traits phonétiques. En effet, pendant le pré-entraînement, les neurones représentaient les mots de Elman (1990) avant de représenter les syllabes de l'expérience de Marcus et al. (1999) pendant la simulation proprement dite. Deuxièmement, le pré-entraînement[2] contenait une proportion appréciable de répétitions et entre de 'mots' adjacents et entre des mots non-adjacents[3]. Ces deux facteurs seraient suffisants pour que le réseau apparaisse de généraliser les stimuli de Marcus et al. (1999). Cependant, si cette explication est correcte, un pré-entraînement avec un corpus plus réaliste — contenant moins de répétitions — devrait abolir ces généralisation[4].

Une des raisons pour lesquelles la simulation de Altmann (2002) semble généraliser les structures avec répétitions pourrait être que le pré-entraînement a généré un chevauchement entre les représentations des syllabes de la phase d'habituation et de la phase de test. Ceci reflète un problème d'interprétation plus général de telles expériences (voir également McClelland & Plaut, 1999) : La conclusion de Marcus (1998b) et Marcus et al. (1999) que les réseaux connexionnistes ne savent pas généraliser aux nouvelles instances dépend entièrement d'hypothèses représentationnelles, notamment que les 'nouveaux exemples' sont effectivement nouveaux dans le

[2]D'après ma lecture de l'article, Altmann (2002) a utilisé des représentations localistes pour chaque mot du pré-entraînement ; s'il ces représentations étaient encodées en termes de phonèmes, l'argument suivant en serait encore renforcé.

[3]Altmann (2002) a rapporté une simulation de contrôle où des phrases comme 'boy chase boy' ont été élimées du corpus de pré-entraînement. Cette manipulation n'a pas changé les résultats. Or, elle n'a pas éliminé toutes les répétitions présentes dans le corpus à cause du nombre très limité des mots disponibles ; il y avait donc presque certainement des répétitions de mot entre deux phrases et des répétitions entre des mots non-adjacents.

[4]Je propose cette explication sans la vérifier avec des simulations car l'interprétation des expériences présentées dans cette thèse n'est pas affectée par la possibilité pour un réseau connexionniste d'apprendre ce type de structures.

format de représentation de l'esprit, ce qui est difficile voire impossible à vérifier empiriquement. Dans les mots de Hinton, McClelland et Rumelhart (1986), « if [...] you learn that chimpanzees like onions you will probably raise your estimate of the probability that gorillas like onions » (p.82), car les gorilles et les chimpanzés sont similaires ; si les nouvelles instances sont similaires aux exemples d'apprentissage dans le format de représentation *interne* de l'esprit, les structures pourraient être généralisées sans faire appel à des calculs symboliques. Comme le remarque Hinton et al. (1986), « the internal structure of [the] pattern [representing chimpanzees] may also change. [...] Changes in the pattern itself alter its similarity to other patterns and thereby alter how generalization will occur in the future » (note 2). Le pré-entraînement de Altmann (2002) a de toute vraisemblance changé la représentation interne des syllabes de sorte que le réseau pouvait généraliser les structures de Marcus et al. (1999) sans faire appel à des calculs symboliques ; ces expériences ne permettent donc pas de trancher entre l'hypothèse que les enfants suivent une règle ou que leur comportement se laisse seulement décrire à l'aide d'une règle, et que les processus sous-jacents sont purement statistiques.

De plus, Negishi (1999) a observé que les réseaux utilisant des représentations des traits continues au lieu d'utiliser des représentations binaires peuvent reproduire les résultats de Marcus et al. (1999)[5] ; Marcus (1999b) a répondu que de telles représentations sont en effet des variables, et que la capacité des réseaux avec de telles variables de reproduire ses résultats était entièrement compatible avec ses conclusions. Or, Marcus et al. (1999) a conclu que les enfants sont équipés et de variables et d'*opérations*. Si les enfants ne faisaient effectivement que des associations entre des variables à valeurs réelles, on ne pourrait plus affirmer l'existence des opérations — sans lesquelles les variables seraient dépourvues d'intérêt. En

[5]Voir également Shultz et Bale (2001) pour un réseau non seulement avec des représentations de traits continues, mais où différents neurones ont codé pour les différentes positions séquentielles dans une phrase ; par conséquent, ce modèle comportait également des variables pour les différentes positions séquentielles.

plus, avec la même justification, on pourrait considérer *l'ensemble* des neurones d'entrée comme une variable — ce qui est effectivement la position que Marcus a adoptée plus récemment (Marcus, 2001). Par conséquent, si les réseaux avec des neurones à valeurs continues peuvent reproduire l'expérience de Marcus et al. (1999), cette expérience ne permet pas d'affirmer l'existence de calculs symboliques dans l'esprit des enfants de sept mois. Il est donc urgent de pouvoir exclure cette possibilité.

Ces considérations montrent qu'il y a au moins deux problèmes d'interprétation de l'expérience de Marcus et al. (1999) : D'abord, l'hypothèse que les syllabes de la phase d'habituation et de la phase de test sont indépendantes n'est pas supportée par de l'évidence expérimentale ; par conséquent, l'argument central de Marcus pourrait ne pas être justifié. Deuxièmement, les réseaux connexionnistes avec de neurones à valeurs réelles peuvent reproduire les résultats de Marcus et al. (1999). Ceci rend cette expérience inapproprié pour affirmer l'existence de traitements symboliques. Il est donc plus prometteur de suivre Fodor et Pylyshyn (1988) et de chercher des cas où les modèles symboliques et statistiques font des prédictions qualitativement différentes.

3.3 Un cas d'étude pour des computations symboliques et statistiques

On a vu que la technique de l'apprentissage des langues artificielles a été utilisée pour démontrer l'existence d'un traitement statistique chez les enfants très jeunes (Aslin et al., 1998; Saffran, Aslin & Newport, 1996; Saffran, Newport & Aslin, 1996). Peña et al. (2002) ont récemment montré que cette technique permet également d'observer des processus non-statistiques. Ils ont familiarisé des adultes avec des séquences de syllabes composées d'une concaténation de pseudo-mots (à partir de maintenant appelés des 'mots') trisyllabiques. Dans chaque mot, la première syllabe prédisait la dernière avec certitude, tandis que la syllabe au milieu était

variable. Par exemple, quand un mot commençait avec la syllabe /pu/, sa dernière syllabe était toujours /ki/, tandis que la syllabe au milieu pouvait être /li/, /ʁa/ et /fo/. Cet arrangement a résulté en des mots de la forme A_iXC_i. La langue artificielle utilisée par Peña et al. (2002) comportait trois familles de mots caractérisées par des combinaisons différentes entre les syllabes A et C. Ils ont utilisé trois syllabes X variables dans la position au milieu, résultant en neuf mots au total.

Alors que Saffran, Aslin et Newport (1996) et Saffran, Newport et Aslin (1996) ont montré que les adultes et les enfants peuvent utiliser les TPs entre syllabes *adjacentes* pour segmenter une séquence de parole, les sujets dans l'expérience de Peña et al. (2002) ont eu à leur disposition uniquement les TPs entre la première et la dernière syllabe d'un mot. Peña et al. (2002) ont montré que les adultes peuvent utiliser de telles TPs distantes, mais seulement pour *segmenter* les séquences de parole et non pas pour *généraliser* la dépendance entre la première et la dernière syllabe d'un mot — même si cette information est en principe suffisante. Même quand les sujets ont été exposés à une séquence de parole continue pour 30 minutes, ils n'ont pas seulement échoué de généraliser la dépendance, mais ils ont même choisi l'alternative statistiquement préférée. Les sujets ont réussi de généraliser la dépendance entre la première et la dernière syllabe des séquences uniquement quand les mots étaient séparés par des silences ; pour cela, des silences imperceptibles étaient suffisants. Sous ces conditions, une familiarisation de seulement deux minutes était suffisante pour induire les généralisations — ce qui est à comparer avec l'échec d'observer les généralisations après une exposition à une séquence continue de 30 minutes. Il semble donc que les indices de segmentation subliminaux étaient nécessaires et suffisants pour les généralisations. Peña et al. (2002) ont conclu que les sujets avaient appris une dépendance de la forme « si la première syllabe est /pu/, la dernière syllabe est /ki/ » et que les computations sous-jacentes ne sont probablement pas le résultat d'un mécanisme statistique. En conclusion, Peña et al. (2002) ont proposé l'existence de deux processus distincts : Un processus statistique qui extrait les mots

de la séquence de paroles en calculant les TPs, et un autre mécanisme non-statistique qui extrait les généralisations — si les indices de segmentation subliminaux sont donnés.

A l'égard de ces expériences, on peut se poser deux questions : Ces données, supportent-elles vraiment la capacité d'extraire des TPs non-adjacentes, et quelle est la nature des généralisations ? Concernant la première question, Newport et Aslin (2004) ont proposé que les expériences de Peña et al. (2002) ne seraient pas interprétables à cause d'un artefact — pour lequel Peña et al. (2002) ont en réalité rapporté une expérience de contrôle (note 17). Je ne discuterai pas ces considérations en détails parce qu'elles ne sont pas cruciales pour l'objectif de cette thèse, mais je présenterai néanmoins des expériences qui confirment que les adultes humaines ont la capacité de calculer des TPs entre items non-adjacents (voir également par exemple R. Brown & McNeill, 1966; Dusek & Eichenbaum, 1997; Ebbinghaus, 1885/1913; Fortin, Agster & Eichenbaum, 2002; Greene, Spellman, Dusek, Eichenbaum & Levy, 2001 pour des données compatibles avec cette conclusion) .

La deuxième question soulevée par l'expérience de Peña et al. (2002) est centrale pour les travaux présentés ici. Pour simplifier la discussion, j'appellerai les dépendances que Peña et al. (2002) ont proposé des règles A_iC_i. Plusieurs processus morphologiques ressemblent aux règles A_iC_i. La parasynthèse en est un exemple. En italien, l'adjectif 'imbianco' et le verbe 'biancare' n'existent pas, mais le verbe 'imbiancare' ('blanchir') existe. Par conséquent, ce verbe est généré en insérant une racine morphologique simultanément entre le préfix 'in' et la terminaison verbale 'a-re'. L'accord en genre et en nombre a également ce genre de relations à longue distance qui caractérisent des règles A_iC_i. Dans les langues qui font ces accords, les noms et les adjectifs s'accordent à une racine lexicale au milieu (par exemple IL bambinO — 'l'enfant', singulier masculin — vs. LA bambinA — singulier féminin — vs. LE bambinE — pluriel féminin).

Or, d'autres régularités morphologiques semblent être plus générales que les règles A_iC_i. La forme défaut du participe passé allemand, par exemple, est générée en rajoutant le préfixe /ge/ et le suffixe /t/ à une racine verbale. Cependant, le préfixe /ge/ est également utilisé pour d'autres processus morphologiques, et pour beaucoup de verbes le suffixe du participe passé est /en/. Par conséquent, plusieurs préfixes peuvent être combinés avec plusieurs suffixes. Un autre exemple est le grec ancien. L'imparfait et l'aoriste (un autre temps du passé) ont un préfixe commun, mais les suffixes dépendent de la personne et sont différents pour l'imparfait et l'aoriste. De nouveau, il n'y a pas de correspondance un-à-un entre les préfixes et les suffixes. Si les règles A_iC_i devaient être postulées pour chaque combinaison, le nombre de règles augmenterait dramatiquement. Les préfixes modifiant le sens comme /un/ or /re/ peuvent être utilisés de manière productive avec virtuellement tous les verbes. Ils peuvent être combinés avec tous les suffixes possibles d'un paradigme, résultant en un grand nombre de règles un apprenti devrait extraire. En plus, il n'y a aucune garantie qu'un apprenti rencontre un exemple d'une règle A_iC_i avant de l'appliquer. En français, par exemple, le passé simple est rare dans de la parole spontanée. Il est possible qu'un apprenti n'ait jamais rencontré une combinaison entre le préfix /re/ et le suffixe pour la deuxième personne du pluriel du passé simple. Pourtant, il n'y a aucun doute qu'il saura finalement produire cette combinaison. Ces considérations suggèrent que plusieurs processus morphologiques utilisant la préfixation et la suffixation ne reposent pas sur des combinaisons fixes entre préfixes et suffixes ; par conséquent, ils ne se laissent pas décrire avec les règles A_iC_i.

Quant à la syntaxe, il semble que la plupart des régularités syntactiques sont plus générales que les règles A_iC_i. Une phrase nominale peut être formée par exemple par un déterminant, un modificateur arbitraire (par exemple un exemple arbitraire d'une phrase adjectivale) et un exemple arbitraire d'une phrase nominale. Une phrase verbale peut contenir un exemple arbitraire de la classe des verbes, un exemple arbitraire de la classe des noms comme objet direct et d'autres constituants sélectionnés

sur la base de la classe à laquelle ils appartiennent.

En bref, des règles A_iC_i sont limitées aux dépendances entre les *items particuliers* tandis que les dépendances morphologiques et syntactiques sont souvent définies entre des *classes d'items*. Un apprenti doit trouver un moyen pour apprendre de telles dépendances.

Alors que Peña et al. (2002) ont conclu que leurs sujets ont appris les règles A_iC_i, leurs résultats sont en effet compatibles avec l'interprétation que les sujets ont appris que des membres de deux classes de syllabes devaient apparaître en des positions différentes. Au lieu d'apprendre les règles A_iC_i, les sujets pourraient avoir appris que la première et la dernière syllabe d'un mot sont des variables qui prennent leurs valeurs de deux classes distinctes. Ces classes consistent en les syllabes qui peuvent apparaître en première et dernière position. Les sujets auraient pu apprendre ces classes de syllabes et que leurs membres doivent apparaître dans des positions différentes ; ils auraient pu traiter les mots avec la structure A_iXC_i comme exemples particuliers d'items conformes à cette régularité. J'appellerai cette régularité la *règle des classes* dans la suite. Comme cette interprétation suggère que la méthodologie de Peña et al. (2002) permet d'étudier des processus statistiques et symboliques simultanément, je chercherai à la confirmer.

The great tragedy of Science — the slaying of a beautiful hypothesis by an ugly fact.

Thomas H. Huxley

Chapitre 4

Généralité des calculs symboliques ou statistiques

Le débat sur l'existence des règles a généralement porté sur l'esprit tout entier. L'esprit en général, est-il doté de capacités symboliques ou les associations entre idées sont-elles suffisantes pour l'expliquer ? Cependant, on peut se demander s'il est vraiment possible de considérer l'esprit comme une entité monolithique homogène. Gallistel (2000) remarque par exemple :

> « Biological mechanisms are hierarchically nested adaptive specializations, each mechanism constituting a particular solution to a particular problem. The foliated structure of the lung reflects its role as the organ of gas exchange, as does the specialized structure of the tissue that lines it. The structure of the hemoglobin molecule reflects its function as an oxygen carrier. The structure of the rhodopsin molecule reflects its function as a photon-activated enzyme. One cannot use a hemoglobin molecule as the first stage in light transduction and one cannot use a rhodopsin molecule as an oxygen carrier, any more than one can see with an ear or hear with an eye. Adaptive specializa-

> tion of mechanism is so ubiquitous and so obvious in biology, at every level of analysis, and for every kind of function, that no one thinks it necessary to call attention to it as a general principle about biological mechanisms. [...] The zoological approach to learning calls into question [that there is such a thing as a general-purpose learning mechanism]. »

En accord avec cette proposition, les animaux sont dotés de capacités computationnelles spécialisées. Les abeilles apprennent par exemple l'éphéméride solaire (voir par exemple Dyer & Dickinson, 1994; Lindauer, 1957, 1959), des insectes différents peuvent faire de l'intégration des chemins (voir par exemple Collett & Collett, 2000; Srinivasan, Zhang, Altwein & Tautz, 2000; Wehner & Menzel, 1990), différents oiseaux peuvent calculer les relations de dominance en utilisant de la transitivité (c'est-à-dire ils déduisent de A < B et de B < C que A < C ; voir par exemple Paz-Y-Miño C, Bond, Kamil & Balda, 2004; Peake, Terry, McGregor & Dabelsteen, 2002) et ont des prédispositions spécifiques pour l'apprentissage du chant (voir par exemple Marler, 1997) et le comportement de différents animaux montre une invariance aux échelles de temps dans les expériences de conditionnement (Gallistel & Gibbon, 2000, 2002). L'esprit humain pourrait donc également être équipé de capacités computationnelles spécialisées ; un avantage de tels mécanismes spécialisés est qu'ils ne sont pas confrontés aux problèmes d'apprénabilité — puisqu'ils ont probablement évolué pour acquérir seulement certaines grammaires et pas d'autres. Dans la suite, on verra qu'une telle position est attractive encore pour d'autres raisons.

4.1 La modularité de l'esprit

La position que différentes computations spécialisées ont évoluées en différents domaines (qui pourraient pour autant partager des mécanismes computationnels) découle également de l'hypothèse de la *modularité de l'esprit* (Fodor, 1983). L'esprit est organisé en des modules différents (par

exemple, la vision, l'audition, le langage etc.) ; ces modules sont indépendants et *informationnellement encapsulés*[1]. En d'autres termes, les computations dans un module ne peuvent pas être influencées par les computations dans un autre module ou des représentations centrales. Etant donné que les modules sont en général des systèmes d'entrée ('input systems'), il est plausible qu'ils contiennent des computations spécialisées pour les problèmes que le module doit résoudre dans son environnement. De telles computations ne sont donc probablement pas génériques mais connaissent des contraintes qui assurent qu'elles remplissent la tâche pour laquelle elles ont évolué sous les conditions pour lesquelles elles ont évoluées. Il est fort probable que les computations à l'intérieur des modules sont intégrées dans le système perceptif ; il est donc plausible qu'une signature de telles computations pourrait être qu'elles sont fortement affectées par des facteurs perceptifs.

En plus des modules, il y a des facultés horizontales comme la pensée qui intègrent les résultats provenant des différents modules et conduisent à la fixation des croyances. Fodor (1983) déduit deux propriétés centrales des facultés horizontales par une analogie avec l'inférence scientifique car « there is every reason to suppose that it [l'inférence scientifique] is a process fundamentally similar to the fixation of belief » (p. 106). Ces facultés sont 'isotropes' et 'quinéens'. L'isotropie implique que tous les domaines peuvent être utilisés pour former des croyances. Dans les mots de Fodor (1983), « in principle, our botany constrains our astronomy, if only

[1]Fodor (1983) donne aussi d'autres propriétés que les systèmes d'entrée ('input systems') doivent avoir pour être des modules ; ces propriétés sont des conséquences plus ou moins directes de l'hypothèse de l'encapsulation informationnelle. Les systèmes d'entrée doivent être spécifiques au domaine (p. 47), les computations correspondantes doivent être exécutées automatiquement (p. 52), ils ont uniquement un accès central limité aux représentations mentales qu'ils calculent (p. 55), ils sont rapides (p. 61), ils ont des sorties limitées ('shallow', p. 86), ils sont associés à une architecture neuronale fixe (p. 98), ils montrent des patterns de décomposition caractéristiques dans des atteintes neurologiques (p. 99) et leur ontogenèse montre une progression et un agencement caractéristiques (p. 100).

we could think of ways to make them connect » (p. 105). Le 'quinéanisme' implique que « the degree of confirmation to any given hypothesis is sensitive to properties of the entire believe system » (p. 107). L'isotropie et le quinéanisme ne sont pas deux noms pour le même concept ; « the point about being Quineian is that we might have two [...] theories, both of which make the same predictions [...], but such that one of the theories is better confirmed than the other — e.g., on grounds of such considerations as simplicity, plausibility, and conservatism » (p. 108).

En résumé, les facultés horizontales auraient accès aux résultats des différents modules, ainsi qu'aux croyances stockées en mémoire. De cette manière, ils pourraient piloter des actions sur une base d'information plus large qu'un module isolé ; inversement, ils pourraient également mettre à jour les croyances stockées en mémoires[2].

En plus des modules et des capacités centrales, Fodor (1983) propose l'existence de *mécanismes*. Les mécanismes de mémoire pourraient par exemple

[2]Certains auteurs ont proposé que la capacité de combiner des représentations de plusieurs domaines était un pas évolutif décisif pour l'espèce homo sapiens (voir par exemple Mithen, 2003). Même s'il est probable que cette capacité est beaucoup plus général chez l'homme que chez d'autres animaux, d'autres mammifères intègrent néanmoins des données provenant de différentes modalités, par exemple pour le comportement locomoteur (voir par exemple Dickinson et al., 2000), pour les localisations spatiales (voir par exemple Andersen, 1997; Knudsen, Zheng & DeBello, 2000) ou encore pour les associations multi-modales (voir par exemple Andersen, Snyder, Bradley & Xing, 1997; Fuster, Bodner & Kroger, 2000; Ono, Nishijo & Uwano, 1995) ; en plus, des primates peuvent apparemment reconnaître des objets en différentes modalités (voir par exemple Bolster, 1978; Cowey & Weiskrantz, 1975; Frampton, Milner & Ettlinger, 1973; Jarvis & Ettlinger, 1977; Malone, Tolan & Rogers, 1980; Milner, 1973; Petrides & Iversen, 1976; Streicher & Ettlinger, 1986; Weiskrantz & Cowey, 1975) et l'on trouve souvent des régions cérébrales avec des neurones multi-modaux (voir par exemple Mesulam, 1998; Wallace, Wilkinson & Stein, 1996). On doit donc se poser la question si ces intégrations multi-sensorielles sont également des calculs spécialisés dans des modules 'cross-modaux' ou s'il existe un gradient dans la flexibilité des espèces d'intégrer des données provenant de différentes modalités.

être utiles et pour les modules et pour les facultés horizontales ; on pourrait imaginer que de simples opérations computationnelles pourraient également faire partie des mécanismes.

Les computations dans les modules et dans des facultés horizontales sont de deux natures fort différentes. Les modules sont composés de computations automatiques et spécialisées tandis que des facultés horizontales pourraient contenir des computations plus générales — à l'image du scientifique étudiant la nature. Par conséquent, il est important de spécifier si une computation que l'on étudie provient plutôt d'un module ou plutôt des capacités plus centrales.

4.2 Implications pour l'étude des computations particulières

Les systèmes expérimentaux fort simplifiés (Aslin et al., 1998; Marcus et al., 1999; Peña et al., 2002; Saffran, Newport & Aslin, 1996; Saffran, Aslin & Newport, 1996) ont le potentiel d'apporter des éléments de réponse à la question si l'esprit est capable du traitement symbolique — et donc s'il dispose d'importantes contraintes représentationnelles innées. Quelles sont les implications de la distinction entre les processus généraux et les processus spécifiques aux modules pour l'interprétation de tels systèmes expérimentaux simplifiés ?

Il est probable que les computations dans de tels systèmes expérimentaux reposent sur des opérations simples qui pourraient être assimilées aux analyseurs d'entrée dans des modules. En effet, les considérations de Gallistel (2000) suggèrent que les computations spécialisées des modules pourraient être des bons candidats pour découvrir du traitement symbolique[3].

[3]Un contre-argument possible est que les réponses des sujets pendant les expériences nécessitent des ressources centrales auxquelles les computations dans les modules n'ont

Les computations étudiées dans les systèmes expérimentaux simplifiés peuvent provenir ou bien des modules ou bien des facultés plus générales ; c'est précisément cette ambiguïté que l'on a observée lors de l'expérience de Marcus et al. (1999). Pour généraliser les structures avec répétitions, les enfants utilisent-ils un mécanisme général d'extraction de règles qui représente les positions séquentielles comme variables ou utilisent-ils un mécanisme plus simple qui ne traite que les répétitions ? Il est clair que les implications de ces alternatives sont fondamentalement différentes[4]. Si les enfants ont utilisé un mécanisme général d'extraction des règles, ils auraient — déjà à l'âge de sept mois — accès aux mécanismes sur lesquels repose à toute vraisemblance l'inférence scientifique ; ceci serait une découverte majeure qui changerait profondément les théories de l'acquisition du langage et plus généralement du développement cognitif. Si

qu'un accès limité par hypothèse. Or, il est clair qu'une expérience comporte beaucoup d'étapes intermédiaires entre les analyseurs d'entrée (qui effectuent la computation étudiée) et la réponse comportementale. Ces étapes comportent, entre autres, des processus de prise de décision, des commandes motrices etc. En effet, les analyseurs d'entrée ne sont très probablement pas directement 'branchés' sur les membres avec lequel le sujet donne ses réponses (par exemple les mains). Même les computations apparemment simples comme la détection de tons déviants ne se manifestent qu'après une latence de 100 à 200ms dans des signaux électrophysiologies chez l'homme (voir par exemple Näätänen, Gaillard & Mäntysalo, 1978; Näätänen, Tervaniemi, Sussman, Paavilainen & Winkler, 2001) — alors que le premier signal arrive dans le cortex auditif primaire après environ 12 à 15 ms (voir par exemple Celesia, Broughton, Rasmussen & Branch, 1968; Liegeois-Chauvel, Musolino & Chauvel, 1991; Markand, 1994) ; la différence entre ces latences correspond à 20 à 50 synapses et donc des computations intermédiaires. Par conséquent, il est assez probable que les résultats d'un analyseur d'entrée dans un module sont véhiculés par le module jusqu'à ce qu'ils puissent être traités par les ressources ayant accès aux processus conduisant à la réponse comportementale. Il n'y a donc aucune contradiction entre la nécessité d'obtenir une réponse des sujets et la possibilité que cette réponse soit élaborée à l'intérieur d'un module.

[4]Pour le reste de cet argument, je supposerai que l'on peut montrer que la généralisation des structures avec répétitions requiert des calculs symboliques. Alors qu'on a vu que cette conclusion n'est pas justifiée à partir des expériences de Marcus et al. (1999), elle sera démontrée par des expériences et des considérations formelles.

les structures avec répétitions sont généralisées par un mécanisme plus simple traitant des répétitions, la conclusion serait que les modules comportent des opérations symboliques et sont donc soumis à des contraintes innées — une conclusion fort plausible compte tenu des considérations de Gallistel (2000). Cette possibilité aurait deux implications supplémentaires. D'abord, on aurait identifié les répétitions comme partie de la 'trousse à outils symboliques' de l'esprit ; on pourrait donc se demander comment cette opération fonctionne. Deuxièmement, les facultés centrales hériteraient du traitement symbolique ou bien en utilisant les sorties des modules ou bien en partageant avec les modules des mécanismes comme les détecteurs de répétition — ou bien les deux.

Comment peut-on discerner ces deux possibilités ? D'abord, si les résultats de l'expérience de Marcus et al. (1999) reflètent un mécanisme général d'extraction de règles, la capacité de généraliser des structures ne devrait pas être limitée aux structures avec répétitions mais il devrait être possible de généraliser également d'autres structures. Deuxièmement, les modules (au moins ceux qui pourraient être impliqués dans la généralisation des structures acoustiques avec répétitions) sont des analyseurs d'entrée ; par conséquent, on s'attendrait à d'importants effets des facteurs perceptifs sur la capacité des sujets de généraliser les structures. Avant de dévoiler ces prédictions d'une manière plus complète, je présenterai des cas de calcul symbolique où des effets perceptifs ont effectivement été observés.

4.3 Computations perceptives

L'influence des facteurs perceptifs pourrait montrer si une computation donnée repose sur des facultés générales. En accord avec les considérations de Gallistel (2000), on pourrait même être amené à penser que des facteurs perceptifs pourrait *être* des calculs symboliques.

4.3.1 Des répétitions comme computations perceptives

De nombreux résultats suggèrent que les répétitions sont des structures particulièrement saillantes et causent des phénomènes particuliers. La 'repetition blindness' (RB) en est un exemple. Quand deux stimuli visuels sont présentés rapidement l'un après l'autre, les sujets ne peuvent rapporter qu'une seule des occurrences (Kanwisher, 1987 ; voir également Bavelier & Potter, 1992; Bavelier, 1994; Kanwisher & Potter, 1989; Kanwisher, Driver & Machado, 1995; Kanwisher, Kim & Wickens, 1996)[5]. En plus de RB, des données électrophysiologiques ont montré que l'absence d'une répétition peut être détectée de manière pré-attentive. La Mismatch Negativity (MMN), par exemple, est un composant des potentiels évoqués qui est engendré par des stimuli déviants occasionnels dans une séquence de sons identiques ou avec un trait commun ; ce composant ne dépend pas de l'attention (voir par exemple Näätänen et al., 1978, 2001).

Ces phénomènes sont observés quand des *tokens* sont répétés[6]. Par contre, les répétitions dans les expériences de Marcus et al. (1999) sont indépendantes des tokens qui les implémentent ; il s'agit de répétitions de *type*[7].

[5]La 'repetition deafness', l'analogue auditif de la RB, pourrait également exister (M. Miller & MacKay, 1994, 1996), mais n'a pas été observée par Kanwisher et Potter (1989). Quand ce phénomène a été répliqué, les auteurs ont dû recourir à des paradigmes expérimentaux très complexes (Soto-Faraco, 2000).

[6]Plus précisément, ces phénomènes sont observés quand des tokens sur le niveau de représentation approprié sont répétés. Par exemple, la RB peut être observée quand le chiffre '1' est 'répété' par le mot 'un' (Bavelier & Potter, 1992) ou quand le mot 'chat' est 'répété' par une image d'un chat (Bavelier, 1994). Les tokens qui sont répétés ne sont donc pas les items physiques dans l'environnement mais des représentations sur différents niveaux.

[7]D'autres auteurs ont montré que la présence d'une répétition dans les séquences de tons avec des pitchs différents peut également engendrer une MMN (Wolff & Schröger, 2001, mais voir Ritter et al., 1992) ; ceci suggère que les répétitions de type pourraient également être détectées automatiquement. Cependant, Wolff et Schröger (2001) n'ont utilisé que cinq tons différents ; par conséquent, une répétition était un 'bigramme' de tons moins fréquent que deux tons différents, et de la sensitivité pour la structure statis-

Des répétitions de tokens sont saillantes pour certains processus impliqués dans l'analyse des signaux sensoriels ; si ceci est également le cas pour les répétitions de type est encore une question ouverte que j'explorerai.

4.3.2 Positions perceptivement saillantes

Il est connu depuis Ebbinghaus (1885/1913) que des items en des positions de bord (PDBs) sont plus probables d'être retenus que des items en d'autres positions lors de la mémorisation de listes ; ce phénomène est connu sous le nom *d'Effet de Position Sérielle* (EPS). L'avantage pour les deux PDBs est dû à différents composants de la mémoire (voir par exemple Baddeley, 1999). Tandis que l'avantage pour la position finale ('l'effet de récence') décroît rapidement si l'on introduit un délai entre la phase de mémorisation et la phase de rappel, l'avantage pour la position initiale ('l'effet de primauté') reste stable dans le temps.

Les PDBs n'influencent pas uniquement la mémorisation, mais sont plus généralement connues d'être saillantes. Dans la plupart des langues, la rime poétique est définie par rapport à la dernière syllabe d'un mot tandis que les allitérations comparent les phonèmes initiaux de deux mots. Par contre, il n'existe aucune figure stylistique définie par rapport aux positions intérieures d'un mot. Il semble donc que les PDBs ont un statut perceptif particulier.

Dans la lumière de ces considérations, on peut de nouveau considérer les expériences de Marcus et al. (1999). Dans ces expériences, les enfants devaient généraliser les structures ABA, ABB et AAB. Ces structures ne font pas uniquement appel à des répétitions — dont on a vu qu'elles ont un statut perceptif particulier — mais les répétitions sont en plus localisées en des PDBs. Par conséquent, il est plausible que leurs résultats reflètent

tique des stimuli serait donc suffisante pour expliquer leurs données.

des computations perceptives et non pas un mécanisme général d'extraction de règles.

4.3.3 Facteurs perceptifs et l'acquisition du langage

Le langage est un système computationnel extrêmement complexe ; les computations perceptives pourraient donc être considérées comme irrelevantes pour l'acquisition du langage. Pourtant, nombre d'études démontrent une influence de facteurs perceptifs sur l'acquisition du langage. Il est donc possible que de telles computations jouent effectivement un rôle appréciable pour le langage.

Influence sur l'acquisition des mots

L'étude cross-linguistique de l'apprentissage des mots suggère que les facteurs perceptifs influencent cet aspect de l'acquisition du langage. Le vocabulaire précoce des enfants apprenant des langues comme l'anglais contient plus de noms que de verbes ce qui a été interprété en termes d'un avantage universel pour les noms (voir par exemple Gentner, 1982 ; mais voir par exemple Bloom, Tinker & Margulis, 1993 pour une vue alternative). L'universalité de l'avantage pour les noms peut être étudiée en considérant des langues avec d'autres propriétés syntactiques que l'anglais. Tandis que l'ordre de mots est sujet – verbe – objet (SVO) en anglais, le mandarin et le coréen sont des langues SOV. Les verbes apparaissent donc en position finale ce qui les rend plus saillants. Même si les enfants apprenant le mandarin ou le coréen connaissent initialement plus de noms que de verbes, ils connaissent proportionnellement plus de verbes que par exemple les enfants anglais (voir par exemple M. Kim, McGregor & Thompson, 2000; Tardif, Gelman & Xu, 1999). Ceci suggère que la saillance des positions où se trouvent les mots peut influencer leur acquisition.

Influence sur l'acquisition de la morphologie

De nombreuses études montrent que les facteurs perceptifs peuvent influencer l'acquisition de la morphologie. En anglais, par exemple, les enfants acquièrent le morphème /-s/ du pluriel (par exemple dog-s) plus tôt que le /-s/ de la troisième personne (par exemple bite-s) (R. Brown, 1973; Villiers & Villiers, 1973). Hsieh, Leonard et Swanson (1999) ont expliqué ce résultat par le fait que le /-s/ du pluriel est plus fréquent que le /-s/ de la troisième personne — en particulier dans les positions saillantes en fin de phrase. De même, Peters et Stömqvist (1996) ont montré qu'un enfant suédois a appris les morphèmes en proximité d'un pattern d'accent de pitch saillant avant d'autres morphèmes. Ils ont également cité des études sur les enfants polonais et russes (Johnston, 1991; Slobin, 1966; Smoczynska, 1985) qui confirment que la saillance perceptive influence l'acquisition de morphèmes grammaticaux : Les enfants polonais apprennent le système inflexionnel avant les enfants russes ; la raison en serait que — alors que les deux langues sont morphologiquement très similaires — le polonais a un accent sur une position fixe et pas de réduction de voyelles tandis que le russe peut avoir des accents en différentes positions et présente de la réduction de voyelles.

D'autres auteurs ont étudié les enfants souffrant du Specific Language Impairment (SLI). Ces enfants ont des problèmes linguistiques mais ne souffrent pas d'autres problèmes cognitifs ou sensoriels. Leonard et Eyer (1996) ont montré que les enfants anglais, italien et hébreux souffrant du SLI ont plus de problèmes pour les morphèmes qui sont difficiles à percevoir à cause de leur courte durée que pour les morphèmes plus longs.

Influence sur l'acquisition de la syntaxe

L'influence de la saillance perceptive n'est pas limitée à l'acquisition de la morphologie, mais semble également influencer certains aspects de l'acquisition de la syntaxe. La fréquence des questions oui/non dans de la parole dirigée aux enfants est par exemple positivement corrélée avec

l'utilisation d'auxiliaires par l'enfant (Furrow, Nelson & Benedict, 1979; Gleitman et al., 1984; Newport, Gleitman & Gleitman, 1977), probablement parce que des questions oui/non exposent les auxiliaires dans les positions saillantes en début de phrase. Un phénomène similaire a été observé chez les enfants néerlandais. Pendant une étape de leur acquisition du langage, ces enfants utilisent surtout des infinitifs au lieu des formes finies. Wijnen, Kempen et Gillis (2001) ont expliqué ce phénomène par la fréquence avec laquelle des infinitifs sont rencontrés en fin de phrase, surtout dans les constructions avec des auxiliaires (voir également Klein, 1974 ; Ingram & Thompson, 1996 pour une observation similaire en allemand).

4.3.4 Existent-ils des 'primitives perceptives' ?

Les facteurs perceptifs semblent influencer certains aspects de l'acquisition du langage alors que les computations linguistiques sont généralement considérées comme extrêmement complexes et générales. S'agit-il d'une contradiction ou peut-on réconcilier ces deux aspects de l'acquisition du langage ?

Un élément de réponse pourrait être la proposition de Fodor (1983) que le langage est un *module*. Comme les modules sont des analyseurs d'entrée, ils doivent être adaptés à l'environnement qu'ils analysent ; ils contiennent donc des computations *spécialisées* pour résoudre des problèmes computationnels auxquels un organisme est confronté dans son environnement (voir par exemple Fodor, 1983; Gallistel, 2000). Par exemple, des principes de Gestalt comme la bonne continuation reflètent les propriétés statistiques des scènes naturelles (voir par exemple Sigman, Cecchi, Gilbert & Magnasco, 2001) et sont implémentés déjà dans le cortex visuel primaire (Gilbert & Wiesel, 1989; Li & Gilbert, 2002). De la même manière, on s'attendrait à ce que la perception du langage reflète les propriétés des stimuli analysés et donc de l'appareil vocal humain ; en effet, il a été proposé que la parole est représentée en termes de gestes motrices (voir par exemple Liberman & Mattingly, 1985).

Alors que la plupart des computations linguistiques n'opèrent pas sur les signaux acoustiques arrivant aux oreilles mais sur des représentations plus abstraites, ceci est vrai même pour les computations du cortex visuel primaire : ses 'stimuli' d'entrée ne sont nullement des bitmaps d'une scène que l'on est en train de contempler mais les résultats de la chaîne de traitement entre les photorécepteurs et le corps genouillé latéral. Les computations dans le cortex visuel primaire sont donc spécialisées pour traiter les stimuli transformés par cette chaîne de traitement. Il est donc possible qu'également certaines computations linguistiques soient fortement spécialisées pour traiter les représentations auxquelles elles sont exposées dans leur 'environnement', ce qui expliquerait pourquoi elles sont influencées par des facteurs perceptifs comme les exemples rencontrés dans cette section.

Une autre raison pour laquelle certaines computations linguistiques pourraient être influencées par les facteurs perceptifs est que la faculté du langage pourrait utiliser — au moins partiellement — des capacités perceptives préexistantes. Les cailles peuvent par exemples apprendre des catégories de consonnes comme [d] (Kluender, Diehl & Killeen, 1987), ils peuvent compenser la coarticulation (Lotto, Kluender & Holt, 1997)[8] et les tamarins sont sensibles aux propriétés rythmiques des langues (Ramus, Hauser, Miller, Morris & Mehler, 2000). De même, les tamarins se comportent comme les humains dans la mesure où ils sont sensibles aux TPs dans les séquences de parole (Hauser et al., 2001), mais apparemment uniquement aux TPs entre des consonnes et non pas entre des voyelles (Newport, Hauser, Spaepen & Aslin, 2004), et l'expérience de Marcus et al. (1999) a pu être répliquée avec ces singes (Hauser, Weiss & Marcus, 2002). Si les animaux non-humains partagent des computations qui pourraient être liées au langage, on s'attendrait donc à des limitations perceptives

[8]On peut se poser la question si ces expériences reflètent véritablement des processus linguistiques à cause des stimuli utilisés. Or, ces données montrent au moins que certains précurseurs de la perception de la parole existent chez les animaux non-humains.

pour de telles computations.

L'observation que de nombreuses computations linguistiques sont partagées par des animaux non-humains révèle un autre aspect de l'ambiguïté dans l'interprétation des résultats de Marcus et al. (1999) : s'agit-il d'une computation générale dans une faculté centrale — et donc d'une capacité potentiellement spécifique à l'homme — ou la généralisation des répétitions repose-t-elle sur un mécanisme computationnel spécifique dans un module ? En vu des résultats présentés dans cette thèse, je serai amené à proposer que la généralisation de structures avec répétitions est effectuée par une *primitive perceptive* — une opération symbolique spécialisée et limitée qui est activée par les répétitions. De nombreux chercheurs ont en effet proposé que l'esprit est équipé de primitives computationnelles (voir par exemple Block, 1995; Marcus, 2001; Newell, 1980; Pylyshyn, 1984), mais ces propositions avaient tendance à illustrer l'analogie entre un ordinateur (par exemple une machine de Turing) et l'esprit ou même de proposer une analogie stricte entre les composants d'un micro-ordinateur (par exemples des barrettes de mémoire) et celles de circuits neuronaux spéculatifs (Marcus, 2001).

La notion des primitives computationnelles que je propose ne fait pas appel à des opérations aussi générales. En d'autres domaines, des computations spécifiques ressoudent des problèmes spécifiques. Ceci est le cas des données résumées par Gallistel (2000), mais également pour des primitives dans d'autres domaines comme les principes de Gestalt (que l'on pourrait considérer comme des primitives computationnelles même s'ils n'ont pas été proposés sous cette forme historiquement), les primitives pour la reconnaissance des formes visuelles (voir par exemple Biederman, 1987; S. Ullman, 1984), pour la perception du mouvement apparent (Ramachandran & Anstis, 1986) ou encore pour le contrôle moteur (voir par exemple Krebs, Aisen, Volpe & Hogan, 1999; Mussa-Ivaldi, Giszter & Bizzi, 1994; Mussa-Ivaldi & Bizzi, 2000; Thoroughman & Shadmehr, 2000) ; dans tous ces cas, un nombre limité d'opérations résout des problèmes

computationnels complexes. Je propose que la généralisation des structures avec répétitions repose sur une primitive dans ce sens — c'est-à-dire une simple opération élémentaire fonctionnant sous des conditions perceptives appropriées. Une autre primitive perceptive que j'analyserai est le traitement des items dans les positions de bord (PDBs), dont e montrerai qu'elles fonctionnent comme des variables positionnelles. Une preuve pour de telles primitives serait à la fois une preuve pour des calculs symboliques dans l'esprit — et pour des contraintes gouvernant la manipulation des symboles.

Après avoir présenté les données expérimentales qui supportent cette notion, je discuterai ses implications plus larges. En effet, même si les opérations que j'étudierai sont fortement spécialisées et limitées, les primitives perceptives pourraient permettre de reconceptualiser la distinction entre les processus statistiques et symboliques pour aboutir à une synthèse entre ces possibilités apparemment antonymes — tout en rendant expérimentalement accessibles leurs mécanismes psychologiques. Je proposerai que les processus cognitifs reposent sur une collection de telles opérations spécialisées et limitées mais fondamentalement symboliques ; ces opérations pourraient se trouver sur tous les niveaux de représentation, dans tous les modules ainsi que dans les facultés horizontales. Les processus cognitifs pourraient donc ne pas être des computations générales et monolithiques mais les résultats de des interactions (qui pourraient se révéler statistiques) d'un grand nombre de composants spécialisés. Alors que cette conceptualisation semble attractive pour différentes raisons, elle permettrait au minimum de découper la manipulation des symboles en des morceaux qui peuvent être étudiés empiriquement — ce qui serait difficile voire impossible si on partait de l'hypothèse d'un mécanisme général et monolithique. Même si elle s'averrait fausse, l'hypothèse des primitives perceptives pourrait être important méthodologiquement pour commencer à étudier les mécanismes psychologiques de la manipulation des symboles ; si elle était correcte, elle pourrait être une piste pour expliquer les facultés centrales en termes de mécanismes psychologiques.

Non, dans le séjour ténébreux
C'est en vain qu'on gémit ; c'est en vain que l'on crie ;
Et les plaintes des malheureux
Irritent notre barbarie.

Hippolyte et Aricie
Simon-Joseph Pellegrin

Chapitre 5

Aperçu des expériences

Cette thèse a deux objectifs : Trouver des exemples de computations symboliques et étudier leurs *mécanismes*. Alors que les computations symboliques et non-symboliques ont été considérées comme des mécanismes monolithiques pour tout l'esprit (mais voir Fodor, 1983; Gallistel, 2000), l'hypothèse de la modularité de l'esprit montre que les implications théoriques de l'évidence pour une opération symbolique peuvent être très différentes. Comme les facultés centrales offrent des calculs très généraux chez l'homme, de l'évidence en faveur de telles computations, a forteriori chez les enfants, permettra d'analyser une des capacités fondamentales de cette espèce. D'autre coté, les computations dans les modules pourraient être plus spécialisées parce qu'elles contribuent à construire des 'analyseurs d'entrée'. De l'évidence pour de telles computations pourrait permettre d'analyser en détail des opérations particulières qui donnent lieu à du calcul symbolique. Comme on s'attend à une certaine sensitivité des 'analyseurs d'entrée' aux facteurs perceptifs, j'utiliserai cette sensitivité pour décider si une computation donnée appartient à un module ou plutôt à des facultés plus centrales.

5.1 Une spécialisation pour les répétitions ?

Cette série d'expériences a exploré deux questions par rapport à l'expérience de Marcus et al. (1999). Ces résultats, permettent-ils vraiment d'affirmer l'existence de calculs mentaux symboliques ? Deuxièmement, impliquent-ils que déjà les jeunes enfants sont dotés de capacités symboliques générales comme dans les facultés horizontales chez les adultes, ou reflètent-ils un mécanisme plus limité et spécialisé ? Pour répondre à ces questions, j'ai comparé comment les adultes généralisent deux types de structures implémentées avec des notes de piano. Les sujets ont entendu des triplets de notes de piano et devaient généraliser leur structure. Les structures reposaient ou bien sur des répétitions (ABA et ABB) ou bien sur d'autres relations de pitch (Bas-Haut-Milieu et Milieu- Haut-Bas, appelées les structures 'ordinales').

Ces structures permettent de dériver les prédictions d'un mécanisme général d'extraction de règles et des mécanismes associationnistes. Un mécanisme général d'extraction de règles devrait généraliser les deux types de structures avec des performances similaires tandis qu'un mécanisme associationniste devrait ou bien généraliser les structures sans répétitions mieux que les structures avec répétitions — ou bien être au niveau du hasard pour les deux types de structures. Inversement, si les structures avec répétitions sont généralisées par un mécanisme spécialisé pour qui les répétitions sont particulièrement saillantes, les sujets devraient apprendre ces structures plus facilement que les structures ordinales.

Des conditions contrôles ont exclut d'éventuels problèmes psychophysiques ou attentionnels si jamais les structures ordinales ne pouvaient pas être généralisées.

5.2 Facteurs perceptifs modulant des généralisations

Cette série d'expériences a étudié un autre aspect de la généralité du mécanisme généralisant les structures avec répétitions. Alors qu'un mécanisme général d'extraction de règles ne devrait pas être limité par des facteurs perceptifs, de telles limitations seraient attendues si les structures avec répétitions étaient généralisées par un mécanisme plus spécialisé pour lequel les répétitions sont saillantes.

Pour étudier cette question, les sujets devaient généraliser des structures avec répétitions où les répétitions étaient localisées ou bien en position de bord (PDB) ou bien en milieu de séquence. Les sujets devaient apprendre les structures ABCDE*FF* et ABC*DD*EF, portées par des séquences de syllabes. Ils ont entendu d'abord des séquences conformes à une des structures ; ensuite ils ont dû décider si de *nouvelles* séquences avaient la même structure que les séquences entendues avant. Si ces structures étaient généralisées par un mécanisme général d'extraction de règles, la performance devrait être similaire pour les deux structures ; si elles étaient généralisées par un mécanisme plus limité pour lequel les répétitions sont saillantes, on devrait observer un avantage pour la structure ABCDE*FF*.

Des expériences contrôles ont exclu d'éventuels problèmes psychophysiques ou attentionnels empêchant la généralisation de la structure ABC*DD*EF.

5.3 Facteurs perceptifs et généralisations phonotactiques

Dans cette série d'expériences, je me suis demandé si les PDBs ne modulent pas seulement des généralisations comme dans le cas des structures avec répétitions, mais si elles en *induisent* véritablement. Une deuxième

question que je me suis posée était de savoir si de telles généralisations pouvaient avoir un rapport avec le langage.

Pour répondre à ces questions, j'ai demandé aux sujets de généraliser des régularités réminiscentes des contraintes phonotactiques comme dans les expériences de Chambers, Onishi et Fisher (2003) et Onishi, Chambers et Fisher (2002). Plus spécifiquement, je me suis posé la question de savoir si les adultes peuvent apprendre que certaines consonnes doivent apparaître en des positions spécifiques non seulement pour les PDBs, mais également pour les positions en milieu de mot. Les sujets, peuvent-ils apprendre des contraintes pour les consonnes C_1 et C_2 non seulement dans des mots de la forme C_1VccVC_2 (où les consonnes critiques sont en PDB) mais également dans des mots de la forme cVC_1C_2Vc (où les consonnes critiques sont en position médiale), les petits 'c' étant des consonnes de remplissage sans contraintes particulières ? En d'autres termes, est-ce que toutes les positions de consonnes agissent comme des variables positionnelles ou est-ce que ceci est le cas seulement des PDBs ? Cette question permet également de répondre à la question de savoir si les mécanismes sous-jacents peuvent être purement statistiques.

Des conditions contrôles ont exclut des problèmes psychophysiques ou attentionnels pour traiter des phonèmes en milieu de mot.

5.4 PDBs dans des séquences de parole

Cette série d'expériences a étudié les dépendances entre catégories. Comme ces dépendances sont importantes pour le langage, je me suis demandé si de telles généralisations subissent également des limitations perceptives comme les calculs dans les expériences précédentes. J'ai d'abord construit une situation où cette hypothèse peut être testée à partir des résultats rapportés par Peña et al. (2002).

Peña et al. (2002) ont étudié les calculs structuraux que des sujets peuvent faire à partir d'un flux de parole continu. Les sujets ont entendu des flux de parole consistant en des concaténations de mots imaginaires trisyllabiques. Dans ces mots, la première syllabe prédisait la dernière avec certitude tandis que la syllabe au milieu était variable. Pour segmenter ce flux, les sujets devaient donc exploiter la probabilité de transition entre la première et la dernière syllabe. Alors qu'ils ont réussi à segmenter le flux, ils ne pouvaient pas *généraliser* la dépendance entre la première et la dernière syllabe d'un mot. Or, quand les mots étaient séparés par des silences de 25 ms (une durée trop courte pour qu'ils soient perçus comme des pauses), les sujets ont également généralisé cette dépendance ; ils ont accepté des mots respectant cette dépendance — indépendamment de la syllabe apparaissant au milieu du mot. Par conséquent, des silences très courts ont induit des généralisations qui n'étaient pas disponibles autrement.

Les expériences de cette série ont étudié le type ainsi que le mécanisme des généralisations obtenues par Peña et al. (2002). Les sujets, apprennent-ils vraiment une dépendance entre syllabes quand ils sont familiarisés avec un flux segmenté (c'est-à-dire où les mots sont séparés par un silence) ou apprennent-ils en réalité une dépendance entre des *classes* de syllabes ? De même, ces généralisations, sont-elles explicables par des mécanismes purement associationnistes ? Finalement, les sujets peuvent-ils faire des calculs statistiques simultanément avec les généralisations ?

Mes résultats montrent que les sujets ont appris que les syllabes en début et en fin de mot doivent être des membres de deux classes distinctes. Afin de contraster les prédictions d'un mécanisme purement associationniste avec celles d'un modèle incorporant également une composante non-associationniste qui calcule les généralisations, j'ai mesuré la préférence pour les généralisations après des familiarisations avec des flux segmentés de différentes durées. Pour un mécanisme purement associationniste, plus la durée de familiarisation est longue, plus la préférence

pour les généralisations devrait être grande. Inversement, pour un modèle incorporant également une composante non-associationniste rapide, la préférence pour les généralisations devrait être maximale pour des flux de familiarisation brefs (voir section 3.3 pour plus de détails). Mes résultats montrent que la préférence pour les généralisations est effectivement maximale après une familiarisation avec un flux bref. J'ai également utilisé des considérations relativement formelles ainsi que des simulations avec des réseaux de neurones artificiels pour montrer que le mécanisme calculant les généralisations n'aurait pas pu résulter d'un mécanisme purement associationniste.

En passant, j'ai montré — contra les nombreuses critiques des expériences de Peña et al. (2002) — que les sujets effectuent des calculs statistiques sensibles aux TPs de deuxième ordre en même temps que les calculs symboliques — sans que ceci puisse être imputé à des problèmes avec les stimuli.

Dans la dernière série d'expériences, je me suis demandé si ces généralisations étaient également limitées par des facteurs perceptifs ou s'il s'agissait de computations plus générales. La capacité d'apprendre que les syllabes dans des positions particulières doivent être des membres de classes distinctes, est-elle limitée aux PDBs ou de telles computations peuvent-elles être observées également pour des positions médiales ? Plus précisément, j'ai familiarisé les sujets avec des séquences de parole composées de mots pentasyllabiques. Dans une condition, ils ont dû généraliser que la première et la dernière syllabe d'un mot devaient être des membres de classes distinctes et que les autres syllabes n'étaient pas pertinentes pour les généralisations. Dans une autre condition, les sujets ont dû apprendre que la deuxième et la quatrième syllabe d'un mot devaient être des membres de classes distinctes alors que les syllabes en PDB n'étaient pas pertinentes pour les généralisations. Si toutes les positions de syllabes fonctionnaient comme des variables positionnelles, les généralisations devraient avoir lieu aussi bien en milieu de mot qu'en PDB. Inversement, si

seulement les PDBs agissaient comme variables positionnelles, les généralisations ne devraient pas être disponibles en milieu de mot. D'autres expériences ont également étudié la question de savoir si les calculs statistiques sont également limités par les positions où ils ont lieu ou s'ils ne présentent pas de telles limitations.

En conclusion, les expériences présentées dans cette thèse ont testé l'hypothèse que les contraintes imposées par le système perceptif sont responsables de contraintes représentationnelles qui se traduisent par des opérations symboliques ; ces opérations pourraient appartenir à un répertoire d'opérations de base de l'esprit et donc agir comme des primitives computationnelles. Il ne s'agit pas d'opérations symboliques générales, mais d'opérations très spécialisées qui effectuent les computations pour lesquelles elles ont évolué, mais uniquement sous les conditions pour lesquelles elles ont évolué. Même s'il s'agit d'opérations fortement limitées, je proposerai dans la discussion générale qu'un tel ensemble de *primitives perceptives* pourraient également être utilisé par les facultés centrales et que cette approche au cas par cas de la manipulation des symboles est prometteuse pour étudier les mécanismes psychologiques sous-jacents.

Philosophia non in verbis sed in rebus est.

Epistulae Morales, Epistula XVI
Seneca

Deuxième partie

Expériences

Chapitre 6

Un mécanisme spécialisé pour les répétitions ?

Comme nous l'avons vu, Marcus et al. (1999) ont observé que les enfants de sept mois peuvent généraliser les structures ABA, ABB et AAB et ont proposé que ces résultats reflètent de l'apprentissage symbolique (voir également Marcus, 2001). Cependant, l'interprétation de ces résultats n'est pas claire. D'abord, de nombreux auteurs ont proposé des mécanismes statistiques qui seraient capables de reproduire ces résultats (voir en particulier Altmann, 2002; Negishi, 1999, mais également Altmann & Dienes, 1999; Christiansen & Curtin, 1999; Christiansen et al., 2000; Gasser & Colunga, 2000; Hanson & Negishi, 2002; McClelland & Plaut, 1999; Seidenberg & Elman, 1999a, 1999b; Shultz & Bale, 2001). De plus, on a vu que les arguments de Marcus dépendent des propriétés spécifiques des modèles connexionnistes actuellement populaires (Marcus, 1998b; Marcus et al., 1999; Marcus, 2001 ; voir également Marcus, 1999a, 1999b, 1999c, 1999d, 1999e) ; il serait donc préférable d'avoir des arguments qui ne dépendent pas d'un modèle particulier.

La deuxième ambiguïté de ces résultats est la question de savoir si la généralisation des structures avec répétitions reflète des capacités symboliques générales ou plutôt des computations spécialisées et limitées pour

lesquelles les répétitions sont saillantes. L'esprit d'un enfant de sept mois, peut-il être assimilé à une machine générale de calcul symbolique ou est-il suffisant d'affirmer qu'il est équipé de certaines computations spécialisées — comme c'est aussi le cas pour les animaux non-humains (voir par exemple Gallistel, 1990, 2000) ?

Afin de clarifier ces ambiguïtés, j'ai comparé comment les sujets généralisent *deux* types de structures. La figure 6.1 montre le paradigme de base. Les sujets ont dû apprendre ou bien les structures avec répétitions ABA et ABB (expérience 1) ou bien les structures 'ordinales' Bas-Haut-Milieu (BHM) et Milieu-Haut-Bas (MHB, expériences 2 et 3). Les expériences ont utilisé un paradigme AAAAX. Pendant chaque essai, les sujets ont entendu cinq triplets de notes de piano. Les quatre premiers triplets avaient la même structure (par exemple ABA lors de l'expérience 1) tandis que le cinquième triplet avait soit la même structure que les quatre triplets précédents (lors des essais 'congruents') soit l'autre structure (lors des essais 'déviants'). Les sujets devaient décider si la structure du cinquième triplet était la même que celle des triplets précédents.

Avant de passer aux expériences proprement dites, je développerai les prédictions de trois modèles possibles : les structures avec répétitions pourraient être généralisées ou bien par un mécanisme symbolique général, un mécanisme associationniste général — ou bien par une 'primitive perceptive' qui est spécialisée pour le traitement des répétitions.

6.1 Prédictions d'un mécanisme général d'extraction de règles

La proposition que les enfants de sept mois sont équipés d'un mécanisme général d'extraction de règles qui représente les positions sérielles comme des variables fait deux prédictions. D'abord, les sujets devraient généraliser les structures avec et sans répétitions également bien. Deuxiè-

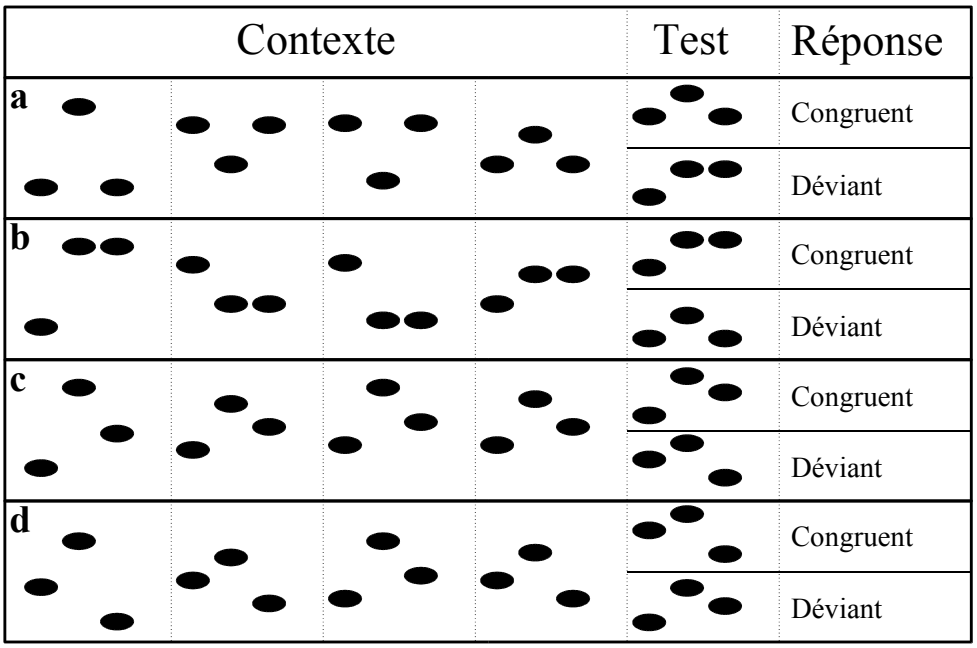


FIG. 6.1 – Paradigme des expériences 1 (a et b), 2 et 3 (c et d). Pendant chaque essai, les sujets entendaient cinq triplets de tons de piano. Les quatre premiers triplets avaient une structure commune ; le cinquième triplet avait ou bien la même structure ou bien une autre. Les sujets avaient la tâche de décider si la structure du cinquième triplet était la même que celle des quatre triplets précédents. Lors de l'expérience 1, les sujets devaient apprendre les structures avec répétitions ABA et ABB ; lors des expériences 2 et 3, les sujets devaient apprendre les structures 'ordinales' Bas-Haut-Milieu (BHM) et Milieu-Haut-Bas (MHB).

mement, la possibilité de généraliser les structures avec répétitions ne devrait pas dépendre de si les répétitions sont localisées en des positions de bord (PDBs). Tandis que les répétitions dans l'expérience de Marcus et al. (1999) étaient localisées en PDB, un mécanisme général d'extraction de règles devrait traiter des structures dans des séquences plus longues comme ABC*DD*EF aussi bien que ABCDE*FF* — car toutes les positions séquentielles devraient être représentées comme des variables formellement équivalentes ; la seule différence entre ces deux structures serait donc lesquelles de ces variables équivalentes définissent la structure.

Dans la présente série d'expérience, j'étudie la première de ces répétitions. Plus précisément, j'évalue si les structures ABA et ABB sont plus ou moins faciles à généraliser que les structures BHM et MHB. Dans les deux cas, un mécanisme général d'extraction de règles devrait représenter les trois tons d'un triplet comme trois variables XYZ et découvrir des relations qui permettent de caractériser ces structures. Il devrait par exemple découvrir que la structure ABA peut être définie par la relation 'X=Z'.

Les structures ordinales, comment devraient-elles être traitées par un mécanisme général d'extraction de règles qui représente les positions séquentielles comme des variables ? De nouveau, les trois positions d'un triplet devraient être représentées comme trois variables XYZ ; si les structures avec répétitions peuvent être apprises, le mécanisme doit avoir la capacité de représenter une séquence de trois variables. Il reste donc à se demander comment ce mécanisme pourrait détecter les relations qui sont caractéristiques pour ces structures. En effet, il est bien connu que l'on peut détecter les relations plus-haut-que/plus-bas-que pour des *paires* de tons même de manière pré-attentive ; les intervalles descendants dans une série d'intervalles montants (ou inversement) engendrent par exemple une 'Mismatch Negativity', une réponse électrophysiologique des potentiels évoquées qui est censée refléter du traitement pré-attentionnel (voir par exemple Korzyukov, Winkler, Gumenyuk & Alho, 2003; Paavilainen, Jaramillo, Näätänen & Winkler, 1999; Saarinen, Paavilainen, Schöger, Tervaniemi & Näätänen, 1992). Un opérateur de comparaison doit donc être disponible. Par conséquent, l'esprit humain est doté (i) d'une opération détectant les relations 'plus grand que' et 'plus petit que' et (ii) de la capacité de représenter une séquence de trois variables (si les structures avec répétitions peuvent être apprises grâce à un tel mécanise).

Un mécanisme général d'extraction de règles devrait donc découvrir que la relation 'X<Z' est suffisante pour distinguer la structure BHM de la structure MHB s'il peut apprendre les structures avec répétitions. Par conséquent, un mécanisme général d'extraction de règles qui représente

les positions séquentielles comme des variables devrait généraliser les structures avec répétitions aussi bien que les structures ordinales.

6.2 Prédictions d'un mécanisme associationniste

J'ai dérivé les prédictions d'un mécanisme associationniste d'abord en simulant les expériences avec un réseau de neurones artificiels et en démontrant la généralité des résultats de ces simulations avec des calculs d'information mutuelle. Il convient de mentionner que ces-derniers résultats sont indépendants d'un modèle particulier et donc valides pour *tout* modèle associationniste, c'est-à-dire pour tout modèle pour qui toute information est véhiculée des stimuli.

Avant de simuler les expériences, il était nécessaire de choisir un modèle approprié. Les structures (par exemple ABA et ABB pendant l'expérience 1) étaient équireprésentées pendant chaque expérience. Par conséquent, il n'y a aucune possibilité de prédire le troisième ton d'un triplet à partir des deux premiers tons : il peut être le même que le premier ton si la structure est ABA ou le même que le deuxième ton si la structure est ABB, et on ne peut connaître la structure qu'*après* avoir rencontré le troisième ton[1]. Par conséquent, des modèles qui apprennent à prédire des éléments dans une séquence temporelle échoueraient nécessairement de simuler mes expériences. J'ai donc choisi de simuler les expériences avec un perceptron à trois couches[2].

[1]Un argument similaire s'applique aux structures BHM et MHB.

[2]Le terme 'perceptron' sera utilisé comme synonyme de 'réseau feed-forward' qui peut éventuellement avoir des couches cachées. Ceci n'est pas la terminologie standard mais je montrerai qu'un perceptron se comporterait de la même manière que les réseaux effectivement utilisés — même si j'ai utilisé des couches cachées pour des raisons sociologiques.

6.2.1 Simulations avec un perceptron multi-couche

Je ne présenterai que des résultats sommaires ; les détails peuvent être trouvés dans l'annexe A. Je me suis demandé comment un perceptron multi-couche traite les structures avec répétitions et des structures ordinales. Le réseau devait associer des triplets de tons à un neurone de sortie qui codait pour la structure d'un triplet. En d'autres termes, les sorties correctes pour les deux structures étaient '1' et '0', respectivement ; le réseau devait apprendre à associer les triplets avec les structures dans ce format.

Quand (et seulement quand)[3] le réseau pouvait exploiter un chevauchement entre l'ensemble d'apprentissage et l'ensemble de test, il a généralisé les structures *ordinales* mieux que les structures avec répétitions. J'évaluerai cette prédiction dans les expériences suivantes. Avant de passer aux expériences, je montrerai cependant que ce résultat est valide pour *tout* mécanisme associationniste qui n'est sensible qu'à l'information véhiculée par les stimuli.

Une raison possible pour laquelle le réseau a généralisé les structures ordinales mieux que les structures avec répétitions pourrait être que les tons individuels sont plus *prédictifs* des structures ordinales que des structures avec répétitions. Si le premier ton d'un triplet est par exemple le ton le plus bas, le triplet correspondant peut avoir les structures ABA ou ABB si les choix possibles sont les structures avec répétitions. Par contre, si les choix possibles sont les structures ordinales, le triplet correspondant a forcément la structure BHM et non pas la structure MHB — car, dans la structure MHB, le dernier ton doit être plus bas que le premier, ce qui n'est

[3]Quand le réseau a été testé dans une plage de pitch distincte de la plage dans laquelle il a été entraîné, il n'a pas généralisé de structure de tout. Ce résultat est une illustration de ce que Marcus (2001) a appelé de 'l'indépendance de l'entraînement', c'est-à-dire l'observation que les réseaux de retro-propagation ne peuvent pas généraliser en dehors de leur espace d'entraînement. Cette limitation est en effet une conséquence assez triviale des équations de cet algorithme (voir par exemple Marcus, 1998a, 1998b, 2001 et section 2.3 pour plus de détails).

pas possible si le premier ton était déjà le ton le plus bas. Ceci suggère que les résultats des simulations précédentes résultent d'un effet de bord — c'est-à-dire l'existence d'un ton le plus bas.

Pour étudier cette possibilité, j'ai arrangé les tons sur un anneau ; le ton le plus haut de l'échelle était ainsi considéré comme plus bas que le ton le plus bas. Même si cet arrangement est manifestement psychologiquement irréaliste, je l'ai utilisé pour étudier les raisons des résultats des simulations. Afin de garder les relations 'plus haut que' et 'plus bas que', j'ai utilisé une plage de 20 tons (à comparer avec 10 tons possibles dans les simulations précédentes) et un intervalle maximal de 10 tons. J'ai généré tous les triplets possibles ; 80% des triplets ont été utilisés pour l'ensemble d'apprentissage et le reste pour l'ensemble de test. J'ai utilisé un perceptron avec deux couches et un autre avec trois couches avec des taux d'apprentissage et des nombres de cycles différents. Quand les tons ont été arrangés sur un anneau, les réseaux étaient en général au hasard, et il n'y avait pas de différence entre les structures avec répétitions et les structures ordinales. Dans certaines simulations avec le perceptron à deux couches, en particulier avec un nombre important de cycles d'apprentissage, la performance était en effet *en-dessous* du hasard ; ceci suggère que les réseaux ont sur-appris les stimuli. Par conséquent, l'avantage pour les structures ordinales résulte d'un effet de bord.

Les réseaux ont traité ou bien les structures ordinales mieux que les structures avec répétitions ou bien ils sont au hasard pour les deux types de structures. Je me suis demandé si ce résultat était spécifique aux réseaux que j'ai utilisés ou s'il était plus général. Pour cela, j'ai calculé l'information mutuelle entre les tons d'un triplet et sa structure.

6.2.2 Information mutuelle entre les tons et les structures

L'information mutuelle (IM) est une mesure générale de la 'prédictibilité' de deux variables. J'illustrerai le principe de cette mesure avec un

exemple informel. Considérons un système avec une variable X, représentant l'état d'une lampe (allumée ou éteinte) et une variable Y, représentant l'état de l'interrupteur correspondant. Combien de questions oui/non sont nécessaires pour connaître l'état du système ? Si l'on considère X et Y séparément, il y a quatre états du système logiquement possibles (interrupteur (allumé/éteint) $\times$ lampe (allumée/éteinte)) ; par conséquent, on doit poser deux questions oui/non pour connaître l'état du système. Or, si l'on considère les variables ensemble, on peut économiser des questions oui/non puisqu'il y a normalement un certain rapport entre l'état de l'interrupteur et celui de la lampe. Sauf dans des conditions pathologiques, il n'y a que *deux* états du système : quand l'interrupteur est allumé, la lampe est allumée et vice versa. Par conséquent, il suffit de poser une seule question pour connaître l'état du système. L'économie d'une question est l'IM entre les variables X et Y. Plus formellement, l'IM entre deux variables X et Y est la différence entre leurs entropies et l'entropie jointe : $IM(X,Y) = H(X) + H(Y) - H(X,Y)$ avec $H(X,Y) = -\sum p(X,Y)\log_2 p(X,Y)$.

J'ai calculé l'IM entre les structures et des combinaisons arbitraires de niveaux de pitch dans les trois tons d'un triplet pour quantifier si l'on peut deviner la structure d'un triplet à partir des niveaux de pitch des tons. Une combinaison de deux niveaux de pitch pourrait être par exemple le niveau le plus bas pour le premier ton avec le niveau le plus haut pour le deuxième ton ; une combinaison de 10 niveaux de pitch pourrait comprendre par exemple tous les niveaux pour le deuxième ton. La raison pour évaluer de telles combinaisons en plus des niveaux de pitch individuels est que les sujets auraient pu prêter attention non seulement à la présence d'un niveau de pitch mais également à son absence.

Pour les combinaisons d'un et de deux niveaux de pitch, j'ai calculé l'IM explicitement ; pour les combinaisons avec d'autres nombres de membres, j'ai fait des simulations Monte-Carlo avec 10^6 échantillons pour chaque taille de groupe[4]. La figure 6.2 montre les résultats de ces calculs. Pour

[4]La raison pour faire une simulation Monte-Carlo au lieu de calculer l'IM directement

toutes les tailles de groupe, l'IM est plus élevée pour les structures ordinales que pour les structures avec répétitions ($t(29) = 3.16$, $p < 0.004$, t-test apparié, pour les combinaisons avec un membre, $t(434) = 13.1$, $p < 2.2\text{e-}16$, t-test apparié, pour les combinaisons avec deux membres, et valeurs de p plus petites pour les autres tailles de groupe). Des résultats similaires ont été obtenus pour l'IM entre les positions dans un triplet (1, 2 ou 3) et les structures en considérant les niveaux de pitch comme les états possibles des trois positions. Dans ces calculs, chaque position était considérée comme une variable dont les valeurs possibles étaient les niveaux de pitch ; j'ai calculé l'IM entre ces variables et les structures. Tandis que l'IM entre les positions et les structures est 0 pour les structures avec répétitions, l'IM entre la première position et les structures ainsi qu'entre la dernière position et les structures est 0.334 pour les structures ordinales ; l'IM entre la deuxième position et ces structures est 0. Ces valeurs sont à comparer avec une entropie totale des structures de 1[5].

En conclusion, les niveaux de pitch sont plus prédictifs des structures ordinales que des structures avec répétitions. Par conséquent, tout mécanisme statistique (y compris tous les réseaux connexionnistes actuels) devrait apprendre les structures ordinales plus facilement que les structures avec répétitions.

6.3 Prédictions d'un modèle avec des primitives perceptives

Tandis qu'un mécanisme général d'extraction de règles prédit que les structures avec répétitions et les structures ordinales devraient être apprises de la même manière, tout mécanisme statistique prédit que les struc-

était que le nombre de combinaisons est grand, par exemple 3×10^7 pour les combinaisons de 20 niveaux de pitch.

[5]Comme il y a deux structures avec des probabilités p égales d'être rencontrées, leur entropie est donnée par $-\sum_{\text{Structures}} p_i \log_2 p_i = -2 \cdot 0.5 \cdot \log_2 0.5 = 1$.

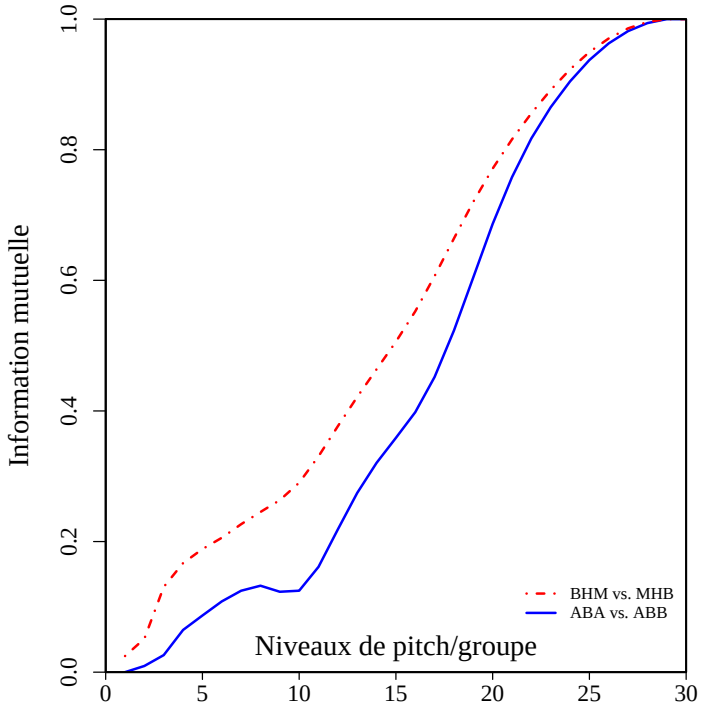


FIG. 6.2 – Information mutuelle entre les niveaux de pitch des triplets et les structures. Pour toutes les combinaisons de tons, l'information mutuelle était plus élevée pour les structures ordinales (BHM et MHB) que pour les structures avec répétitions (ABA et ABB). Les niveaux de pitch sont donc plus prédictifs des structures ordinales que des structures avec répétitions.

tures *ordinales* devraient être apprises plus facilement. Par contre, si le système perceptif humain est construit de manière que les répétitions soient des structures particulièrement saillantes, par exemple grâce à un détecteur de répétitions, les structures avec répétitions devraient être généralisées plus facilement que les structures ordinales.

L'objectif de l'expérience 1 était d'étudier comment les sujets généralisent les structures avec répétitions ABA et ABB ; les expériences 2 et 3 ont étudié l'apprentissage des structures ordinales BHM et MHB. En plus des réponses comportementales des sujets, j'ai enregistré leurs potentiels évoqués pour deux raisons. D'abord, les potentiels évoqués sont réputés être sensibles aux processus cognitifs en absence d'un traitement at-

tentionnel (voir par exemple Näätänen et al., 1978, 2001) ; ils pourraient donc être plus sensitifs que les méthodes comportementales. Comme j'anticipais que les structures ordinales pourraient être plus difficiles à apprendre que les structures avec répétitions, des mesures électrophysiologiques pourraient révéler des réponses même quand les réponses comportementales sont proches du hasard.

Deuxièmement, la latence des effets peut être utilisée pour estimer si un effet requiert des ressources cognitives de 'haut niveau'. Différents auteurs ont par exemple proposé que des processus automatiques dans différents domaines produisent des réponses 'précoces' avec des latences de l'ordre de 100 à 200 ms (voir par exemple Friederici, 2002; Hahne & Friederici, 1999; Näätänen et al., 1978, 2001). Alors qu'une latence de 100 à 200 ms donne au cerveau le temps pour du traitement considérable — étant donné que les premières réponses à un signal auditif sont observées après des latences de l'ordre de 12 à 15 ms dans le cortex auditif primaire chez l'homme (Celesia et al., 1968; Liegeois-Chauvel et al., 1991; Markand, 1994), les latences de l'ordre de 100-200 ms peuvent néanmoins être utilisées comme indication qu'une tâche ne requiert pas de ressources excessives puisque de telles latences sont généralement observées avec des tâches relativement simples.

6.4 Expérience 1 : Généralisation des structures avec répétitions

Lors de l'expérience 1, les sujets devaient généraliser les structures ABA et ABB. Le principe de l'expérience est illustré dans la figure 6.1. Les essais étaient composés de cinq triplets de notes de piano. Les quatre premiers triplets (les triplets 'de contexte') avaient une structure commune (ABA ou ABB), tandis que le cinquième triplet (le triplet 'de test') pouvait avoir la même structure que les triplets de contexte ou l'autre structure (par exemple ABB si la première structure était ABA). La tâche des su-

jets était de décider si le cinquième triplet avait la même structure que les triplets précédents. Les niveaux de pitch et les intervalles utilisés pour construire les triplets de test sont apparus également souvent dans les deux structures. Par exemple, le ton sol (qui a été utilisé pour les triplets de test) est apparu autant dans les triplets de la forme ABA que dans des triplets de la forme ABB. Par conséquent, ni les niveaux de pitch ni les intervalles ne pouvaient être associés à une des structures.

6.4.1 Matériels et méthodes

Sujets

Douze sujets italiens (neuf femmes, trois hommes, âgés de 19 à 28 ans pour un âge moyen 23.5 ans) ont été recrutés à Trieste pour être testés après avoir donné leur consentement libre et éclairé. Selon leur propre évaluation et l'inventaire d'Edinburgh, ils étaient des droitiers. Aucun n'a signalé une histoire d'atteintes neurologiques ou psychiatriques ou de troubles auditifs. Ils ont reçu un dédommagement de 22 EUR pour leur participation. Deux sujets ont dû être exclus des analyses électrophysiologiques à cause d'un nombre trop important d'artefacts de mouvement ou de clignement d'œil. Il restait donc 10 sujets pour l'analyse électrophysiologique (neuf femmes, un homme, âge moyen 23.5).

Matériels

Les sujets ont entendu des triplets de tons de piano générés par un ordinateur. Les tons ont été générés en format MIDI grâce à un programme en C avant d'être convertis au format WAV avec TIMIDITY[6]. La durée de chaque ton était 400 ms ; il n'y avait pas de silence entre les tons d'un triplet[7]. Les tons venaient d'une série de 10 tons dont le plus bas était la_b (103.8 Hz) ; les autres tons étaient séparés du ton le plus bas par des mul-

[6]Timidity++ est disponible sur `http://timidity.sourceforge.net/`.

[7]Comme mes stimuli étaient des tons de piano, l'amplitude de chaque ton décroissait pendant sa durée.

tiples de quartes en mode lydien. Les sujets pouvaient donc discriminer tous les tons par paires (voir par exemple Sinnott & Aslin, 1985). Les triplets avaient la structure ABA (par exemple bas-haut-bas) ou ABB (par exemple haut-bas-bas). Huit triplets (quatre de chaque structure) ont été réservés comme triplets de test. Les tons et les intervalles utilisés dans les triplets de test apparaissant avec les mêmes fréquences dans les deux structures ; par exemple une seconde montante (qui est apparue en certains triplets de test) est apparue autant dans les triplets avec la structure ABA que dans les triplets avec la structure ABB.

Procédure

Les sujets ont été informés qu'ils allaient entendre des séquences de cinq triplets de tons de piano. Les quatre premiers triplets auraient la même structure tandis que le dernier aurait ou bien la même structure ou bien une autre structure. Ils devaient répondre grâce à des boutons si la structure du cinquième triplet était la même que celle des quatre triplets précédents. Le rôle des boutons (par exemple « appuyez *à gauche* si le dernier triplet est déviant ») a été inverti après la moitié des essais ; le rôle initial a été contrebalancé entre les sujets.

Les sujets ont entendu des séquences de cinq triplets ; les triplets étaient séparés par des silences de 400 ms. Les quatre premiers triplets d'un essai avaient une structure commune (ABA ou ABB) tandis que la structure du cinquième triplet était ou bien congruente ou bien déviante ; chaque essai avait donc la forme AAAAX. Les triplets 'A' avaient des pitchs et des intervalles différents et ne partageaient que la structure. Les sujets ont reçu du feedback après chaque essai. Les essais commençaient 1 s après les réponses des sujets. Pendant chacun des quatre premiers triplets, les sujets ont vu son numéro sur un écran (1, 2, 3 ou 4) ; pendant le cinquième triplet, ils voyaient un point d'interrogation.

Il y avait 312 essais qui ont été présentés en ordre aléatoire. L'expé-

rience a été interrompue après chaque 39ème essai pour donner aux sujets l'occasion de bouger. Les sujets ont été testés individuellement dans une pièce calme. Les stimuli ont été présentés à travers des écouteurs. L'expérience était pilotée par un PC sous MS Windows 98 en utilisant le programme E-prime.

Système d'enregistrement et analyse de données

L'EEG a été enregistré grâce à 129 électrodes de charbon (système EGI) référencées au vertex. Les différences de potentiels sur le scalp ont été amplifiées, filtrées par un filtre passe-bas à 100 Hz et digitalisées à 250 Hz. Ensuite, le signal a été filtré numériquement entre 0.5 et 20 Hz. Des époques commençant 200 ms avant le début du dernier ton de chaque triplet de test et finissant 800 ms plus tard ont été extraites du signal digitalisé. Ces époques ont été éditées automatiquement pour rejeter les essais contaminés par de mouvements oculaires ou du corps (seuils : 30 μV pour les mouvements oculaires sur les électrodes autour des yeux ; 30 μV (déviations locales) et 80 μV (déviations globales) pour les mouvements du corps sur les autres électrodes). Les essais sans artefacts ont été moyennés pour chaque sujet en deux conditions, à savoir en les essais congruents et déviants. Ces moyennes ont été corrigées par une ligne de base (200 ms) avant d'être transformées en des valeurs indépendantes de la référence en utilisant la méthode de la référence moyenne. Des reconstructions bidimensionnelles des différences de potentiel sur le scalp ont été obtenues pour chaque échantillon (sample) en utilisant une interpolation par splines sphériques.

Les réponses évoquées peuvent être caractérisées comme dipôles électriques qui se manifestent par une positivité et une négativité sur le scalp. Des groupes d'électrodes ont été choisis pour couvrir les maxima de la négativité et de la positivité sur une reconstruction bidimensionnelle des différences entre la condition déviante et la condition congruente. Les différences de potentiel enregistrées à partir de deux groupes de neuf élec-

trodes contiguës sur chaque hémisphère ont été moyennées dans des fenêtres de temps de 100 ms (100–200 ms et 448–548 ms) avant d'être analysées avec une analyse de variance (ANOVA) dont les facteurs intra-sujets étaient la congruence (déviant or congruent), le groupe d'électrodes (antérieur : autour de FZ et postérieur : autour de 01 et 02) et l'hémisphère (gauche ou droit). Les effets principaux ne sont pas interprétables à cause de l'inversion de tension attendue entre les électrodes sélectionnées. Par conséquent, seulement les interactions entre Congruence, Electrodes et Hémisphère ont été étudiées.

6.4.2 Résultats et discussion

Les résultats comportementaux sont représentés dans la figure 6.3. Les sujets ont appris les structures ABA et ABB ; le pourcentage de réponses correctes était $78.7 \pm 13.3\%$ (moyenne$\pm$déviation standard, $t(11) = 7.5$, $p = 1.2 \cdot 10^{-5}$). J'ai observé des réponses électrophysiologiques aux changements de structure commençant après 100 ms et 448 ms[8] après le début du troisième ton du triplet de test ($F(1,9) = 11.5$, $p = 0.008$ et $F(1,9) = 12.0$, $p = 0.007$, respectivement ; Fig. 6.4A,C). La latence de la première réponse est compatible avec les latences de processus censés être automatiques comme la Mismatch Negativity (voir par exemple Näätänen et al., 1978, 2001), l'Early Left Anterior Negativity (voir par exemple Friederici, 2002; Hahne & Friederici, 1999) pour le traitement de phrases ou encore la N170 qui est censée avoir un rapport avec le traitement des visages (voir par exemple Bentin, Allison, Puce, Perez & McCarthy, 1996) ; ceci suggère que la généralisation des structures avec répétitions pourrait ne pas nécessiter des ressources de haut niveau, mais que des processus relativement automatiques pourraient être suffisants. Dans les expériences 2 et 3, je me suis demandé si ceci était également vrai pour les structures ordinales.

[8] La latence de cette deuxième réponse reflète son maximum, mais la réponse a pu être observée 80 ms plus tôt ($F(1,9) = 8.0$, $p = 0.020$) ou plus tard ($F(1,9) = 7.6$, $p = 0.022$).

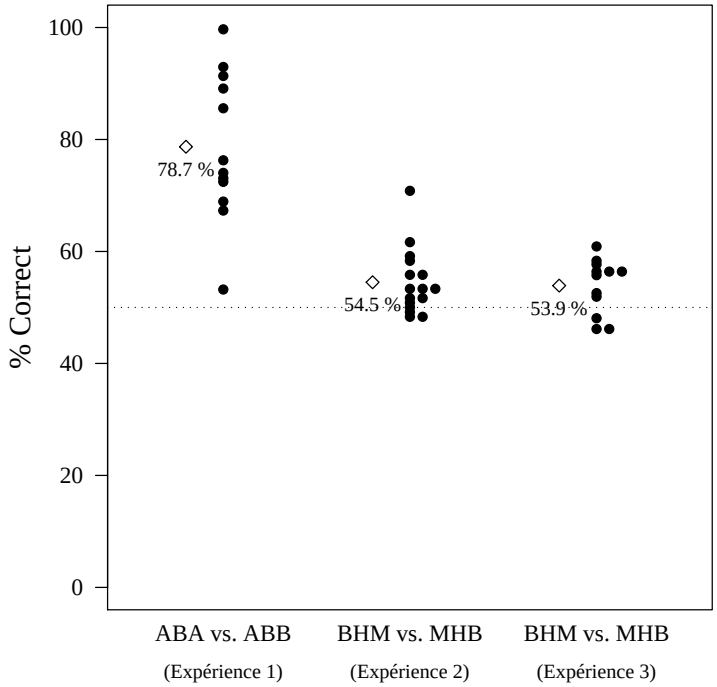


FIG. 6.3 – Résultats comportementaux des expériences 1, 2 (seulement la condition 'Structure') et 3. Lors de l'expérience 1, les sujets devaient généraliser les structures ABA et ABB ('structures avec répétitions') ; lors des expériences 2 et 3, ils devaient généraliser les structures Bas-Haut-Milieu et Milieu-Haut-Bas ('structures ordinales'). Alors que les sujets généralisaient facilement les structures avec répétitions, ils étaient proches du hasard pour les structures ordinales.

6.5 Expérience 2 : Généralisation des structures ordinales

L'expérience 1 a montré que la plupart des sujets peuvent généraliser les structures ABA et ABB. De plus, j'ai observé des réponses électrophysiologiques aux changements de structure uniquement 100 ms après le moment quand les sujets auraient pu déterminer la structure (c'est-à-dire le troisième ton du triplet de test) ; ceci suggère que l'extraction des structures avec répétitions pourrait être relativement automatique. Lors de l'expérience 2, j'ai étudié la question de savoir si les sujets peuvent ap-

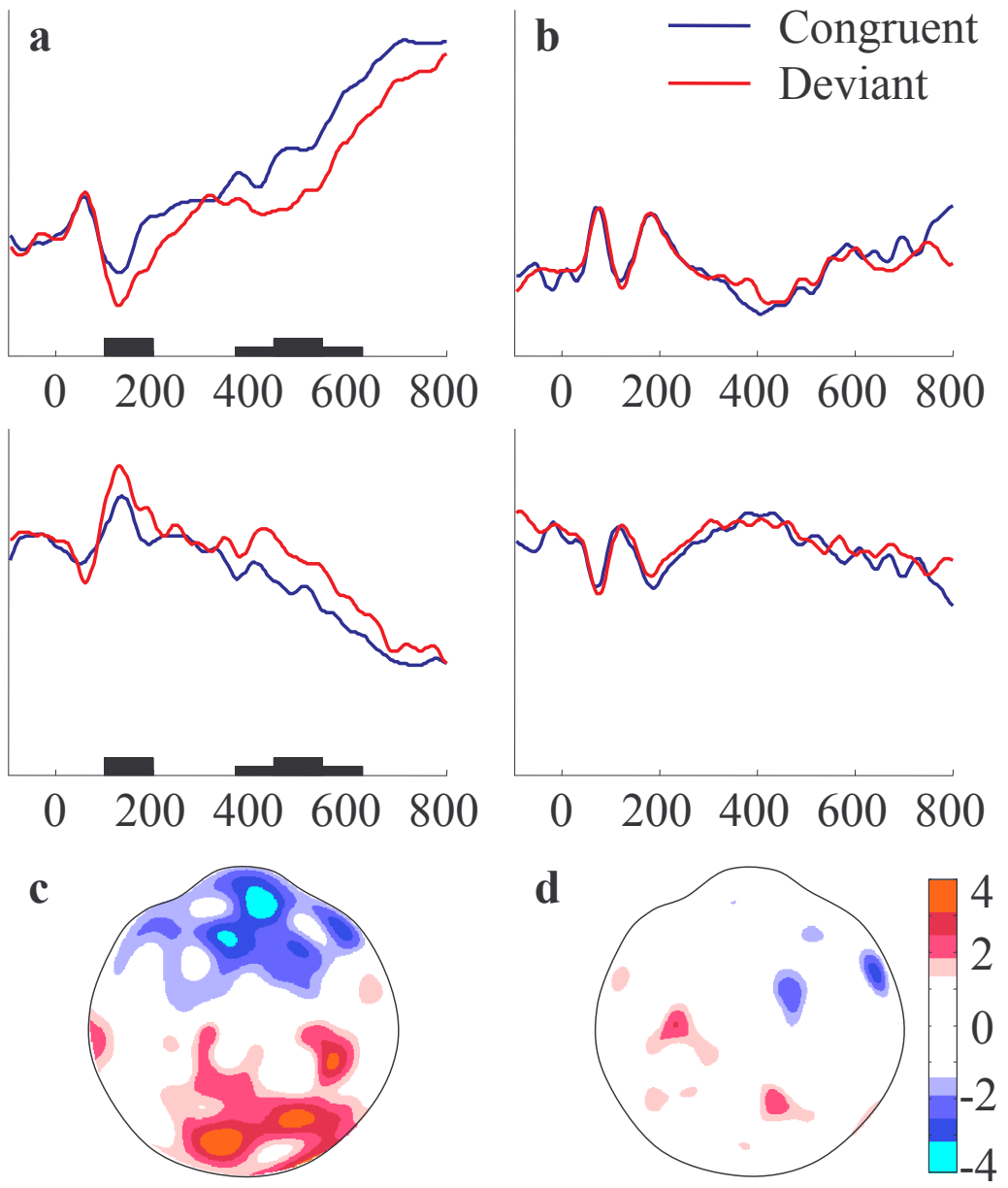


FIG. 6.4 – (a,b) Différences de potentiel moyennes des groupes d'électrodes utilisés pour l'analyse des expériences 1 (a) et 3 (b). Les figures supérieures et inférieures représentent des groupes d'électrodes antérieurs et postérieurs, respectivement. Les époques commencent 200 ms avant le début du *troisième* ton des triplets de test et finissent 800 ms plus tard. Les barres noires représentent la signifiance statistique. (c,d) Cartographie des valeurs de t 120 ms après le début du troisième du lors des expériences 1 (c) et 3 (d).

prendre aussi facilement les structures 'ordinales' Bas-Haut-Milieu (BHM) et Milieu-Haut-Bas (MHB).

Si les structures de l'expérience 1 étaient calculées par un mécanisme général d'extraction de règles, les structures ordinales devraient être apprénables aussi facilement que les structures avec répétitions. Inversement, si les généralisations observées lors de l'expérience 1 résultaient d'un mécanisme statistique, les structures ordinales devraient être apprises plus facilement que les structures avec répétitions. Finalement, si le cerveau humain comprend un mécanisme spécialisé pour le traitement des répétitions, les sujets devraient avoir plus de difficultés pour apprendre les structures ordinales que les structures avec répétitions.

6.5.1 Matériels et méthodes

Sujets

Seize sujets français (10 femmes, six hommes, âgés de 21 à 27 ans pour un âge moyen de 23.6 ans) ont été recrutés à Paris pour être testé après avoir donné leur consentement libre et éclairé. Selon leur propre évaluation et l'inventaire d'Edinburgh, ils étaient des droitiers. Aucun n'avait une histoire d'atteintes neurologiques ou psychiatriques ou de troubles auditifs. Ils ont reçu un dédommagement de 200 FRS pour leur participation. Quatre sujets ont dû être exclus des analyses électrophysiologiques à cause d'un nombre trop important d'artefacts de mouvement ou de clignement d'œil ou à cause de problèmes techniques.

Procédure

Le principe de l'expérience 2 est similaire à celui de l'expérience 1 : pendant chaque essai, les sujets ont entendu cinq triplets dont les quatre premiers avaient la même structure (BHM ou MHB) et le cinquième pouvait avoir ou bien la même structure que les quatre triplets précédents ou bien l'autre structure. Les essais avaient donc la forme AAAAX. Comme il

est possible que les structures ordinales soient plus difficiles à apprendre que les structures avec répétitions, j'ai inclus trois conditions expérimentales avec des niveaux de difficulté différents : dans la condition *Identité*, les triplets de contexte étaient physiquement identiques tandis que le triplet de test était ou bien également identiques aux triplets précédents ou bien conforme à la structure opposée. Cette condition est une condition contrôle pour d'éventuelles difficultés psychophysiques ou attentionnelles.

Dans la condition *Transposition*, les triplets de contexte étaient des transpositions mutuelles (c'est-à-dire les intervalles entre les tons d'un triplet restaient constants) ; le triplet de test était ou bien une autre transposition des triplets précédents ou bien conforme à la structure opposée. Si les sujets codaient pour les intervalles entre les tons d'un triplet, cette condition devrait être aussi facile que la condition Identité. En revanche, si les sujets codaient pour le pitch absolu, la performance devrait être la même que dans la condition Structure (voir ci-dessous).

La condition *Structure* était analogue à l'expérience 1 : les triplets de contexte partageaient seulement la structure (BHM ou MHB) tandis que le triplet de test était conforme à cette même structure ou ne l'était pas.

Les essais ont été groupés en deux blocs en fonction de leur structure de contexte afin de faciliter l'apprentissage. Cinq triplets de chaque structure ont été réservés comme triplets de test. L'expérience comprenait 120 essais par condition ; les trois conditions étaient équireprésentées pendant les deux blocs de structure. Les stimuli ont été présentés avec des haut-parleurs. Un PC sous MS Dos pilotait l'expérience grâce au logiciel EXPE (Pallier, Dupoux & Jeannin, 1997).

Système d'enregistrement et analyse de données

Le système d'enregistrement était le même que lors de l'expérience 1 à deux différences près. Les données ont été digitalisées à 125 Hz et les époques commençaient 200 ms avant le début du *premier* ton de chaque triplet de test, finissant 1800 ms plus tard. Alors que les sujets de l'expérience 1 auraient pu répondre seulement après le troisième ton du triplet de test (parce qu'ils ne pouvaient savoir si un triplet avait la structure ABA ou ABB qu'à ce moment), les réponses de la condition Identité pourraient apparaître déjà après le premier ton d'un triplet de test.

La procédure pour l'analyse des données était la même que lors de l'expérience 1.

6.5.2 Résultats

Les résultats comportementaux de l'expérience 2 sont représentés dans la figure 6.5. Une ANOVA avec la condition (Identité, Transposition ou Structure) comme facteur intra-sujet a révélé un effet principal ($F(1,15) = 393.8$, $p < 0.001$). J'ai étudié cet effet avec une série de tests de t appariés. Les sujets étaient meilleurs dans la condition Identité (95.2±5.1%) que dans les conditions Transposition (59.7±7.7%, $t(15) = 17.5$, $p = 2.2 \cdot 10^{-11}$) ou Structure (54.5±5.9%, $t(15) = 19.8$, $p = 3.5 \cdot 10^{-12}$), mais la différence entre les conditions Transposition et Structure n'était pas significative ($t(15) = 2.8$, $p = 0.053$, ns). Dans toutes les conditions, le taux de réponses correctes était différent du niveau du hasard[9].

La comparaison la plus centrale pour les hypothèses étudiées ici est la comparaison entre la condition Structure et l'expérience 1. La performance des sujets de l'expérience 1 était nettement meilleure que dans la condition Structure de l'expérience 2 ($F(1,26) = 42.6$, $p = 6.5 \cdot 10^{-7}$).

[9]Identité : $t(15) = 35.2$, $p = 7.7 \cdot 10^{16}$; Transposition : $t(15) = 5.1$, $p < 0.002$; Structure : $t(15) = 3.1$, $p < 0.009$.

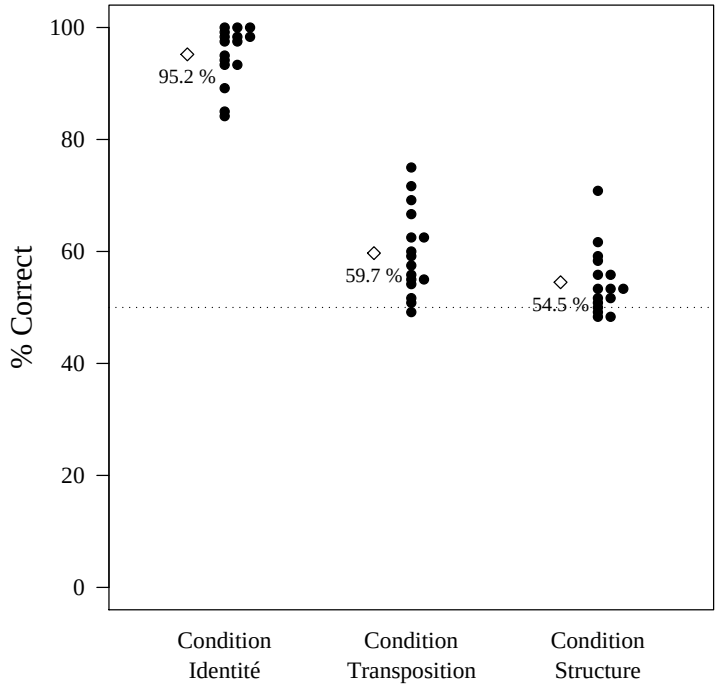


FIG. 6.5 – Résultats comportementaux de l'expérience 2. Les sujets étaient presque parfaits pour la condition Identité mais proches du niveau du hasard pour les conditions Transposition et Structures.

La figure 6.6 montre les résultats électrophysiologiques de l'expérience 2. Ils sont congruents avec les résultats comportementaux. Dans la condition Identité, le premier ton du triplet de test est suffisant pour détecter une déviance. J'ai observé une première réponse cérébrale à un changement de triplet à partir de 200 ms après le début du premier ton du triplet de test ($F(1,11) = 8.3$, $p = 0.015$). D'autres réponses avec des topographies similaires ont été observées 144 ms après le début du deuxième ton ($F(1,11) = 7.5$, $p = 0.019$) et 88 ms après le début du troisième ton ($F(1,11) = 8.0$, $p = 0.016$). La dernière réponse cérébrale au changement a été observée 464 ms après le début du troisième ton ($F(1,11) = 28.9$, $p < 0.001$).

Dans la condition Transposition, le changement de structure ne peut être détecté avant le deuxième ton du triplet de test (qui détermine l'in-

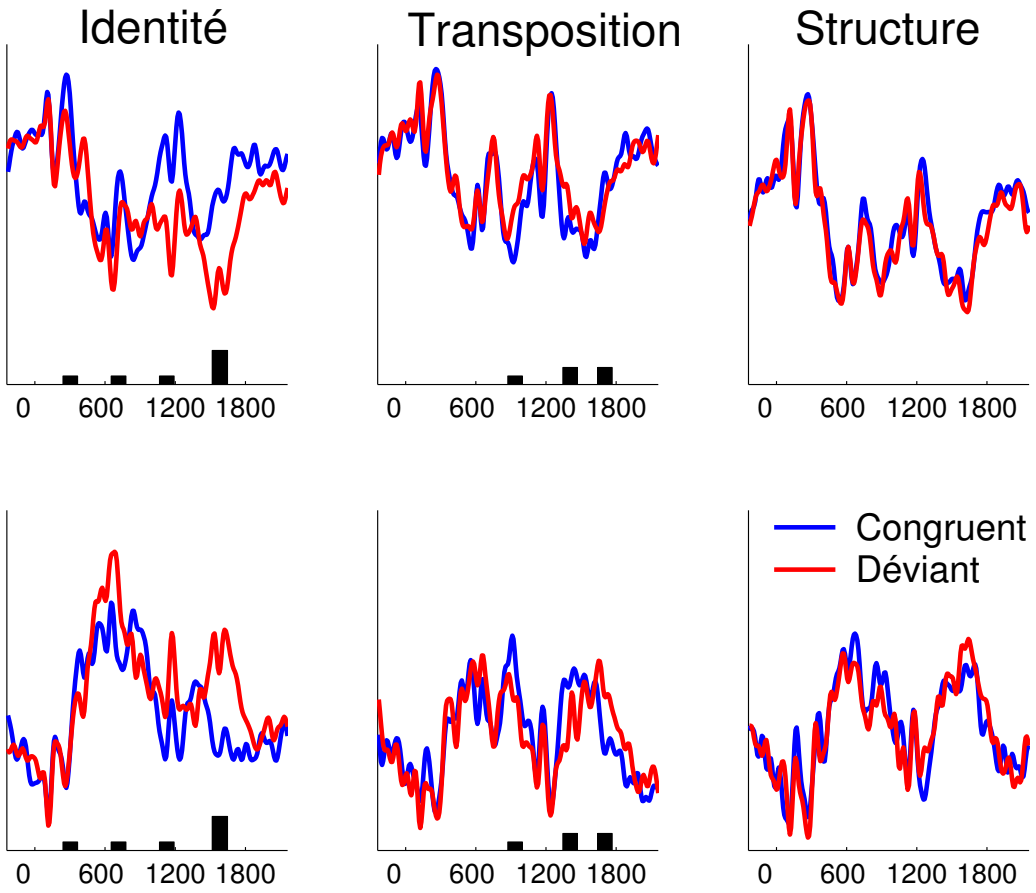


FIG. 6.6 – Différences de potentiel moyennes des groupes d'électrodes utilisés pour l'analyse de l'expériences 2. Les figures supérieures et inférieures représentent des groupes d'électrodes antérieurs et postérieurs, respectivement. Les époques commencent 200 ms avant le début du *premier* ton des triplets de test et finissent 1800 ms plus tard. Les barres noires représentent la signifiance statistique.

tervalle entre les deux premiers tons). Des réponses cérébrales aux changements ont été observées 328 ms après le début du deuxième ton du triplet de test ($F(1,11) = 9.0$, $p = 0.012$), 320 ms après le début du troisième ton ($F(1,11) = 16.1$, $p = 0.002$) et 568 ms après le début du troisième ton ($F(1,11) = 13.2$, $p = 0.004$).

Dans la condition Structure, je n'ai pas observé de réponses cérébrales

au changement.

6.5.3 Discussion

Contrairement à l'expérience 1, la performance des sujets dans la condition Structure était proche du niveau du hasard et aucune réponse cérébrale au changement n'était observable. On pourrait conclure que les structures ordinales sont plus difficiles à traiter que les structures avec répétitions. Or, les essais de l'expérience 2 étaient organisés en blocks définis par les structures de contexte ; pendant chaque block, la structure des triplets ne changeait pas. En plus, les sujets avaient accès à du feedback après chaque essai. Par conséquent, ils auraient pu associer des triplets particuliers à des réponses particulières ; ils auraient pu apprendre par exemple que la réponse correcte pour un triplet de test particulier était toujours la réponse 'différent' à l'intérieur d'un block. Cependant, cette possibilité est peu plausible — car elle aurait dû *améliorer* la performance des sujets alors qu'ils étaient proches du niveau du hasard.

Il y a cependant encore d'autres raisons pour répliquer l'expérience 2. Des expériences pilotes comportementales ont montré que certains sujets peuvent tout à fait généraliser les structures ordinales[10]. Il est donc possible que l'inclusion de trois conditions différentes dans l'expérience 2 a pu rendre cette expérience plus difficile. J'ai donc répliqué l'expérience 2 avec un paradigme plus simple où je n'ai gardé que la condition Struc-

[10]Une première expérience pilote, incluant 10 essais d'exemple *avant* le début de l'expérience proprement dite et comportant uniquement une structure de contexte pour chaque sujet, a montré que certains sujets peuvent apprendre les structures ordinales (69.7±17.2%, $t(15) = 4.6$, $p < 4 \cdot 10^{-4}$). Dans une autre expérience pilote, les sujets ont rencontré les deux structures comme structures de contexte ; ils ont généralisé les structures ordinales également dans cette expérience (64.3±12.5%, $t(13) = 4.3$, $p < 0.001$). Une des raisons pour laquelle les sujets dans ces expériences pourraient avoir appris les structures ordinales est que beaucoup d'entre eux avaient une histoire d'instruction musicale formelle, car il est bien connu que les musiciens sont plus performants pour traiter les mélodies qui peuvent sembler 'atonales' (voir par exemple Dowling & Fujitani, 1971, expérience 1 ; Trehub, Schellenberg & Kamenetsky, 1999).

ture ; en plus, les deux structures ordinales pouvaient être utilisées comme structures de contexte pendant toute la durée de l'expérience.

6.6 Expérience 3 : Réplication de l'expérience 2

L'expérience 3 était une réplication de la condition Structure de l'expérience 2. En plus de ne contenir qu'une seule condition expérimentale, les structures BHM et MHB pouvaient être des structures de contexte pendant toute la durée de l'expérience et non pas seulement pendant certains blocks. Comme lors de l'expérience 2, les sujets devaient généraliser les structures BHM et MHB dans un paradigme AAAAX.

6.6.1 Matériels et méthodes

Sujets

Douze sujets français (six femmes, six hommes, âgés de 20 à 33 ans pour un âge moyen de 22.8 ans) ont été recrutés à Paris pour être testé après avoir donné leur consentement libre et éclairé. Selon leur propre évaluation et l'inventaire d'Edinburgh, ils étaient des droitiers. Aucun n'avait une histoire d'atteintes neurologiques ou psychiatriques ou de troubles auditifs. Ils ont reçu un dédommagement de 15 EUR pour leur participation. Un sujet a dû être exclus des analyses électrophysiologiques à cause d'un nombre trop important d'artefacts de mouvement ou de clignement d'œ. Aucun des sujets n'avait participé aux expériences 1 ou 2.

Procédure

La procédure était similaire à celle de la condition Structure de l'expérience 2 ; seront donc décrites seulement les différences. Trois triplets de chaque structure ont été réservés comme triplets de test. Les deux structures pouvaient être la structure de contexte pendant toute la durée de l'expérience. L'expérience comportait 156 essais.

Système d'enregistrement et analyse de données

Le système d'enregistrement ainsi que la procédure de l'analyse des données étaient les mêmes que lors de l'expérience 1.

6.6.2 Résultats et discussion

La figure 6.3 montre les résultats comportementaux de l'expérience 3. Alors que le pourcentage de réponses correctes était différent du niveau du hasard (53.9±4.9%, $t(11) = 2.8$, $p = 0.019$), la performance était nettement moins bonne que pour l'expérience 1 ($F(1,22) = 36.8$, $p = 4.16 \cdot 10^{-6}$) et ne différait pas de la condition Structure de l'expérience 2 ($F(1,26) = 0.08$, $p = 0.784$, ns). Comme dans la condition Structure de l'expérience 2, je n'ai pas observé de réponse cérébrale au changement (voir figure 6.4).

6.7 Discussion intermédiaire

J'ai évalué les prédictions de trois modèles de l'apprentissage de structures simples en utilisant les structures avec répétitions ABA et ABB (expérience 1) et les structures *ordinales* Bas-Haut-Milieu (BHM) et Milieu-Haut-Bas (MHB ; expériences 2 et 3) comme études de cas. Tandis qu'un mécanisme général d'extraction de règles devrait généraliser l'un des deux types de structures aussi bien que l'autre, j'ai montré que tout mécanisme statistique devrait apprendre les structures ordinales mieux que les structures avec répétitions. En revanche, si le cerveau humain est équipé d'un mécanisme perceptif spécialisé pour la détection des répétitions, les structures avec répétitions devraient être généralisées mieux que les structures ordinales.

Les sujets ont appris les structures avec répétitions facilement mais étaient proches du niveau du hasard pour les structures ordinales. De plus, j'ai observé des réponses cérébrales rapides aux changements de structure pour les structures avec répétitions mais pas pour les structures ordinales.

Tandis que les structures avec répétitions peuvent être traitées facilement et peut-être automatiquement, il est plus difficile d'extraire des structures plus générales.

6.7.1 Des difficultés psychophysiques ?

On pourrait penser que les triplets avec les structures ordinales sont plus difficiles à percevoir que les triplets avec répétitions. Or, les résultats de l'expérience 2 ainsi que d'autres résultats excluent cette possibilité. En effet, si j'avais présenté les tons des triplets par paires, les intervalles utilisés auraient été plusieurs ordres de grandeur au-dessus des seuils de discriminablité (voir par exemple Sinnott & Aslin, 1985). Par conséquent, des problèmes de discriminer les tons ne peuvent pas expliquer mes données. De plus, les sujets peuvent traiter des relations non-adjacents entre des tons ; par exemple, des violations de règles locales et globales peuvent engendrer des MMNs (Horváth, Czigler, Sussman & Winkler, 2001). Par conséquent, ni des problèmes avec les comparaisons des tons ni avec des relations non-adjacentes peuvent expliquer pourquoi les sujets ont généralisé les structures avec répétitions mais pas les structures ordinales. Ceci est particulièrement vrai pour un modèle où les positions séquentielles sont représentées comme des variables : si une opération binaire (comme 'x plus petit que y') peut être appliquée à une paire de variables, elle devrait être applicable également à une autre paire de variables. Par conséquent, si les tons d'un triplet sont représentés comme une séquence de variables XYZ, et si les sujets peuvent appliquer l'opération 'X<Y' (ce qu'ils peuvent puisqu'ils peuvent *discriminer* les tons par paires et ils peuvent généraliser la direction d'un changement de pitch), il n'y a aucune raison pour laquelle ils devraient être incapables d'appliquer l'opération 'X<Z' — étant donné qu'ils étaient capables d'appliquer une opération à des variables non-adjacents lors de l'expérience 1.

De plus, l'expérience 2 comprend une condition contrôle pour d'éventuels problèmes psychophysiques mais les sujets étaient presque parfaits

dans la condition Identité : quand les généralisations n'étaient pas requises, ils étaient donc capables de traiter les structures ordinales parfaitement bien. Les problèmes d'apprendre ces structures étaient donc spécifiques à la nécessité d'extraire une généralisation, et ne peuvent pas être expliqués par des facteurs psychophysiques ou attentionnels.

6.7.2 Pourquoi les structures ordinales sont-elles difficiles à généraliser ?

Tandis que les sujets ont généralisé les structures avec répétitions, ils étaient proches du niveau du hasard pour les structures ordinales. Par contre, une grande proportion des sujets dans les expériences pilotes comportementales ont généralisé les structures ordinales. Quelle est la raison de cette contradiction apparente ?

Les difficultés de généraliser les structures ordinales pourraient être le résultat de la manière dont les mélodies sont encodées chez l'homme. En effet, les adultes ne peuvent pas discriminer des courtes mélodies atonales si celles-ci conservent le *contour* des mélodies originales (voir par exemple Dowling & Fujitani, 1971, expérience 1)[11]. Dans d'autres expériences, la performance des sujets était encore pire que pour les structures ordinales dans la mesure où ils n'arrivaient même pas à discriminer des mélodies atonales quand leurs contours étaient différents ; les sujets capables de discriminer ces mélodies étaient des musiciens professionnels et montraient une MMN même en ignorant les stimuli (Tervaniemi, Rytkönen, Schröger, Ilmoniemi & Näätänen, 2001)[12].

Quand ils sont confrontés à des mélodies tonales, par contre, les adultes

[11]Le contour d'une mélodie est la séquence des directions des changements de pitch. Dans la mélodie 1-8-7-8 (où les chiffres représentent les niveaux de pitch), le contour est par exemple 'ascendant–descendant–ascendant'.

[12]Tervaniemi et al. (2001) ont pris leurs tons de 12 'niveaux de fréquence' de 'l'échelle musicale occidentale', probablement correspondant aux 12 demi-tons d'une octave ; ceci génère en réalité probablement des mélodies atonales.

ainsi que les enfants peuvent détecter des petits changements d'intervalles également quand le contour est conservé (voir par exemple Trehub et al., 1999). Si les sujets ont perçu mes stimuli comme atonaux[13], ils devraient avoir des problèmes de généraliser les structures ordinales parce qu'ils devraient avoir des difficultés d'encoder la mélodie exacte. Il est donc possible que la performance pour les structures ordinales pourrait être améliorée en utilisant des gammes plus fréquentes pour des non-musiciens, par exemple en utilisant une gamme en majeur. Or, cette possibilité est trompeuse : peut-être est-il possible de trouver des conditions sous lesquelles les structures ordinales peuvent également être apprises. Or, contrairement aux structures ordinales, la généralisation des structures avec répétitions ne semble pas être sensible à ces propriétés idéosyncratiques des stimuli. La généralisation des structures avec répétitions est donc beaucoup plus robuste que le traitement des structures ordinales, ce qui suggère que les répétitions ont un statut particulier. Une conclusion plausible est que les structures avec répétitions pourraient être généralisées par un mécanisme spécialisé qui est relativement insensible à ce type de changement de matériel (mais on verra plus loin qu'il est fortement affecté par des facteurs perceptifs).

L'observation que de nombreux sujets dans les expériences pilotes pouvaient généraliser les structures ordinales pourrait être expliquée par le fait que beaucoup de ces sujets avaient une histoire d'instruction musicale formelle. Le résultat important de mes expériences est cependant que les structures avec répétitions peuvent être généralisées spontanément également en absence d'une telle formation ; en considérant que ces résultats sont en contradiction et avec un mécanisme général d'extraction de règles et avec un mécanisme général statistique, ils suggèrent que des répétitions sont généralisées par un mécanisme symbolique spécialisé.

[13] Alors que les mélodies étaient en réalité tonales, il est possible qu'elles aient été perçues comme atonales car la gamme choisie (lydien) est rare à ce jour. De plus, aucune mélodie musicalement raisonnable utiliserait exclusivement des grands intervalles comme dans mes expériences.

Il est important de se rappeler que ce mécanisme doit détecter des répétitions indépendamment des items qui les exemplifient ; comme la notion de l'écho est indépendante des sons qui sont répétées, ce détecteur de répétition est plus abstrait que les items particuliers. C'est ce qu'on a appelé les répétitions de *type* dans la section 2.1. Dans la prochaine série d'expériences, j'étudierai les propriétés de cette opération.

Chapitre 7

Facteurs perceptifs modulant la généralisation des structures avec répétitions

Les expériences présentées jusqu'ici suggèrent que la généralisation des structures avec répétitions repose sur un mécanisme spécialisé. Comme tous les mécanismes associationnistes se trompent dans leurs prédictions concernant la facilité relative de généraliser les structures avec répétitions, ce mécanisme est symbolique. Dans les expériences suivantes, j'étudierai les propriétés de cette opération symbolique. S'agit-il d'une opération générale — à l'instar des opérations dans les ordinateurs — ou d'une opération spécialisée résultant des contraintes du système perceptif humain ?

Le point de départ des expériences suivantes était de nouveau l'expérience de Marcus et al. (1999). On se rappellera que ces auteurs ont montré que les enfants de sept mois peuvent généraliser les structures ABA, ABB et AAB ; dans toutes ces structures, les répétitions étaient localisées dans les positions de bord (PDBs). Lors de la série d'expériences précédente, je me suis demandé si les structures avec répétitions avaient un statut particulier ; dans la présente série d'expériences j'étudie l'influence des PDBs

sur les généralisations. Si les structures avec répétitions sont généralisées grâce à un mécanisme général d'extraction de règles — qui a tout de même une prédilection pour les structures avec répétitions, l'influence des facteurs perceptifs sur la possibilité de généraliser les structures devrait être limitée ; par conséquent, les structures avec répétitions devraient être généralisées indépendamment de si les répétitions sont localisées en PDB.

Inversement, si l'opération généralisant les répétitions fait partie des con-traintes du système perceptif, l'influence des facteurs perceptifs devrait être relativement grande ; par corollaire, il devrait être beaucoup plus facile de généraliser les structures avec répétitions dont les répétitions sont en PDB que les structures dont les répétitions sont en d'autres positions.

J'ai évalué ces prédictions grâce à des séquences de sept syllabes. Supposons d'abord que la généralisation des structures avec répétitions repose sur un mécanisme général d'extraction de règles. Dans ce cas, les positions séquentielles devraient être représentées comme des variables ; toutes les positions devraient donc être formellement équivalentes. Par conséquent, les sujets devraient généraliser la structure ABC*DD*EF (où la répétition est au milieu de la séquence) aussi bien que la structure ABCDE*FF* (où la répétition est dans la dernière PDB) — puisque la seule différence entre ces structures est la question de savoir à laquelle des variables équivalentes est appliquée l'opération détectant les répétitions : les sept positions seraient représentées comme une séquence de variables $\xi_1 \ldots \xi_7$, et le mécanisme d'extraction de règles devrait détecter ou bien que $\xi_6 = \xi_7$ (pour la structure ABCDE*FF*) ou bien que $\xi_4 = \xi_5$ (pour la structure ABC*DD*EF). Or, si les ξ_n fonctionnent essentiellement comme les variables dans un ordinateur, il est clair que la structure définie par $\xi_4 = \xi_5$ devrait être aussi facile à traiter que la structure définie par $\xi_6 = \xi_7$. Par contre, si de telles généralisations sont effectuées par des mécanismes plus spécialisés et limités pour lesquels les répétitions en PDB sont saillantes à cause des contraintes du système perceptif, on devrait observer un avantage pour les répétitions en PDB : la structure ABCDE*FF* devrait être plus

facile à généraliser que la structure ABC*DD*EF.

Cependant, l'observation que la structure ABCDE*FF* est plus facile à apprendre que la structure ABC*DD*EF ne saurait suffire à affirmer que les computations sous-jacentes soient modulées par des facteurs perceptifs. En effet, déjà les syllabes en PDB sont plus saillant que des syllabes en milieu de séquence ; par corollaire, un avantage éventuel pour les répétitions en PDB pourrait être une simple conséquence de la saillance des syllabes qui *implémentent* les répétitions et non pas des limitations intrinsèques de l'opération traitant les répétitions. Après tout, il est probablement plus facile de généraliser la structure des séquences quand on les entend bien que quand elles sont présentées juste au seuil de perceptibilité ; si les syllabes en PDB sont mieux 'perçues' que les syllabes en milieu de séquence, une telle différence pourrait expliquer pourquoi les structures définies par des répétitions en milieu de séquence pourraient être plus difficiles à apprendre que les structures définies par des répétitions en PDB. Pour exclure ce type d'interprétations alternatives, je n'ai pas seulement demandé aux sujets de *généraliser* des structures mais également de *discriminer* des séquences ; si un avantage éventuel pour la généralisation des structures avec des répétitions en PDB résultait d'un avantage pour traiter les syllabes en PDB (parce qu'elles sont plus faciles à percevoir), un avantage similaire devrait être observé pour les discriminations. Les expériences 4 à 7 ont étudié la capacité de généraliser les structures définies par des répétitions en PDB ou en milieu de séquence tandis que les expériences 8 à 10 ont étudié la capacité de discriminer les séquences correspondantes.

7.1 Expérience 4 : Généralisation des répétitions en fin de séquence

Dans cette expérience, j'ai testé la capacité des sujets de généraliser les structures avec répétitions quand les répétitions sont localisées en fin de séquence. J'ai familiarisé les sujets avec 36 exemples de séquences de syl-

labes avec la structure ABCDE*FF* (par exemple /z∅fesapitu*koko*/) ; après cette familiarisation, les sujets devaient décider si de nouvelles séquences avec de nouvelles syllabes avaient la même structure que les séquences de la phase de familiarisation. Ces nouvelles séquences avaient ou bien la structure ABCDE*FF* (pour les séquences 'grammaticales') ou bien la structure ABCD*EE*F (pour les séquences 'agrammaticales', par exemple /z∅fesapi*tutu*ko/).

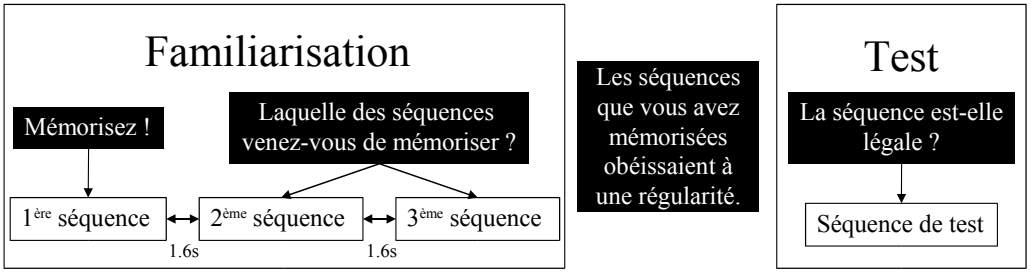


FIG. 7.1 – Structure des essais lors des expériences 4 et 5. Les rectangles en blanc sur noir indiquent les instructions qui sont apparues sur l'écran tandis que les rectangles en noir sur blanc représentent les stimuli.

La structure des essais des expériences 4 et 5 est illustrée dans la figure 7.1. Les sujets ont été familiarisés avec 36 séquences de syllabes de la forme ABCDE*FF*. Afin de réduire la variabilité et pour évaluer si les sujets prêtaient attention aux séquences, les sujets ont été testés s'ils retenaient chaque séquence de familiarisation immédiatement après l'avoir entendue. Plus spécifiquement, les sujets ont entendu trois séquences consécutives. Ils devaient mémoriser la première séquence et décider si elle était la même séquence que la deuxième ou la troisième. La première séquence avait toujours la structure ABCDE*FF*. Une des deux séquences suivantes était identique à la première ; l'autre était composée des mêmes syllabes dans le même ordre mais avait la structure ABC*DD*EF.

7.1.1 Matériels et méthodes

Sujets

Vingt-trois sujets italiens (18 femmes, cinq hommes, âgés de 19 à 37 ans pour un âge moyen de 23.9 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

Les sujets ont été testés individuellement dans une pièce calme ; l'expérience a été piloté par un PC utilisant le logiciel Presentation®.

Matériels

J'ai synthétisé les stimuli avec la base de diphones *fr2* de MBROLA (Dutoit, Pagel, Pierret, Bataille & Vreken, 1996). Toutes les syllabes avaient la forme CV ; la durée des phonèmes était 116 ms et la durée des syllabes donc 232 ms. La fréquence du premier formant était 200 Hz. Il n'y avait pas de silence entre les syllabes à l'intérieur d'une séquence.

Les consonnes retenues étaient p, t, k, z, f, et s tandis que les voyelles utilisées étaient a, e, i, o, u et ∅. J'ai utilisé différentes séquences pendant la phase de familiarisation et la phase de test ; par conséquent, les sujets n'auraient pas pu utiliser des probabilités de transition pour généraliser les structures. Toutes les séquences utilisées lors de la phase de familiarisation et la phase de test sont détaillées dans les tables 7.1 et 7.2, respectivement.

Familiarisation

Les sujets ont été familiarisés avec des séquences de syllabes de la structure ABCDE*FF*. Ils avaient la tâche de prêter attention aux séquences et de les mémoriser aussi bien que possible. Afin de réduire la variabilité entre les sujets et pour évaluer s'ils prêtaient attention aux séquences, les

TAB. 7.1 – Séquences de familiarisation utilisées pendant l'expérience 4 en transcription SAMPA.

Première séquence	Deuxième séquence	Troisième séquence	Réponse correcte
tek2pazofusisi	tek2pazofusisi	tek2pazozofusi	2
tek2pazosifufu	tek2pazosifufu	tek2pazozosifu	2
tek2pafuzosisi	tek2pafuzosisi	tek2pafufuzosi	2
tek2pafusizozo	tek2pafusizozo	tek2pafufusizo	2
tek2pasizofufu	tek2pasizofufu	tek2pasisizofu	2
tek2pasifuzozo	tek2pasifuzozo	tek2pasisifuzo	2
k2patezofusisi	k2patezofusisi	k2patezozofusi	2
k2patezosifufu	k2patezosifufu	k2patezozosifu	2
k2patefuzosisi	k2patefuzosisi	k2patefufuzosi	2
k2patefusizozo	k2patefusizozo	k2patefufusizo	2
k2patesizofufu	k2patesizofufu	k2patesisizofu	2
k2patesifuzozo	k2patesifuzozo	k2patesisifuzo	2
k2tepazofusisi	k2tepazofusisi	k2tepazozofusi	2
k2tepazosifufu	k2tepazosifufu	k2tepazozosifu	2
k2tepafuzosisi	k2tepafuzosisi	k2tepafufuzosi	2
k2tepafusizozo	k2tepafusizozo	k2tepafufusizo	2
k2tepasizofufu	k2tepasizofufu	k2tepasisizofu	2
k2tepasifuzozo	k2tepasifuzozo	k2tepasisifuzo	2
patek2zofusisi	patek2zozofusi	patek2zofusisi	3
patek2zosifufu	patek2zozosifu	patek2zosifufu	3
patek2fuzosisi	patek2fufuzosi	patek2fuzosisi	3
patek2fusizozo	patek2fufusizo	patek2fusizozo	3
patek2sizofufu	patek2sisizofu	patek2sizofufu	3
patek2sifuzozo	patek2sisifuzo	patek2sifuzozo	3
pak2tezofusisi	pak2tezozofusi	pak2tezofusisi	3
pak2tezosifufu	pak2tezozosifu	pak2tezosifufu	3
pak2tefuzosisi	pak2tefufuzosi	pak2tefuzosisi	3
pak2tefusizozo	pak2tefufusizo	pak2tefusizozo	3
pak2tesizofufu	pak2tesisizofu	pak2tesizofufu	3
pak2tesifuzozo	pak2tesisifuzo	pak2tesifuzozo	3
tepak2zofusisi	tepak2zozofusi	tepak2zofusisi	3
tepak2zosifufu	tepak2zozosifu	tepak2zosifufu	3
tepak2fuzosisi	tepak2fufuzosi	tepak2fuzosisi	3
tepak2fusizozo	tepak2fufusizo	tepak2fusizozo	3
tepak2sizofufu	tepak2sisizofu	tepak2sizofufu	3
tepak2sifuzozo	tepak2sisifuzo	tepak2sifuzozo	3

TAB. 7.2 – Séquences de test utilisées pendant l'expérience 4 en transcription SAMPA.

Séquences grammaticales	Séquences agrammaticales
z2fesapitukoko	z2fesapitutuko
z2fesapukitoto	z2fesapukikito
z2fesatipokuku	z2fesatipopoku
z2fesatokipupu	z2fesatokikipu
z2fesakupotiti	z2fesakupopoti
z2fesakotupipi	z2fesakotutupi
zes2fapitukoko	zes2fapitutuko
zes2fapukitoto	zes2fapukikito
zes2fatipokuku	zes2fatipopoku
zes2fatokipupu	zes2fatokikipu
zes2fakupotiti	zes2fakupopoti
zes2fakotupipi	zes2fakotutupi
f2zasepitukoko	f2zasepitutuko
f2zasepukitoto	f2zasepukikito
f2zasetipokuku	f2zasetipopoku
f2zasetokipupu	f2zasetokikipu
f2zasekupotiti	f2zasekupopoti
f2zasekotupipi	f2zasekotutupi

sujets devaient faire un test de rétention immédiatement après avoir entendu une séquence de familiarisation. Plus précisément, ils ont entendu trois séquences d'affilée. Ils devaient mémoriser la première de ces séquences et décider ensuite si elle était la même que la deuxième ou la troisième séquence (voir figure 7.1). La première séquence avait toujours la structure ABCDE*FF*. Une des deux séquences suivantes était identique à la première ; l'autre était composée des même syllabes dans le même ordre mais avait la structure ABC*DD*EF. Les séquences d'un essai étaient séparées d'un silence de 1624 ms (c'est-à-dire une durée de séquence). Les essais étaient séparés d'un délai de 2 s après les réponses des sujets. Il y avait 36 essais de familiarisation.

Test

Après la phase de familiarisation, les sujets ont été informés que les séquences qu'ils avaient mémorisées contenaient une régularité. Ils étaient informés qu'ils allaient entendre de nouvelles séquences et qu'ils devraient décider si ces séquences obéissaient à la même régularité que les séquences mémorisées. Ensuite, ils ont entendu 18 nouvelles séquences avec la structure ABCDE*FF* (comme les séquences de familiarisation) mélangées avec 18 nouvelles séquences avec la structure ABCD*EE*F (une structure nouvelle) ; les séquences ont été présentées en ordre aléatoire. Toutes les séquences de test utilisaient un nouvel ensemble de syllabes qui n'avaient pas été utilisées pendant la phase de familiarisation. J'appellerai une séquence '*grammaticale*' si elle obéit à la structure avec laquelle les sujets ont été familiarisés et '*agrammaticale*' sinon.

Les essais étaient séparés par un délai de 2 s après chaque réponse des sujets. Les sujets n'ont pas reçu de feedback.

7.1.2 Résultats et discussion

Le pourcentage de réponses correctes pendant le test de rétention de la phase de familiarisation était différent du niveau du hasard (86.6±10.9%, $t(22) = 16.1$, $p < 0.001$). Les sujets qui ont fait plus de 20% d'erreurs pendant cette phase étaient exclus des autres analyses ; 15 sujets ont été retenus pour les analyses suivantes.

Après cette familiarisation, les sujets ont passé le test de généralisation. La figure 7.2 montre que les sujets ont généralisé la structure des séquences mémorisées aux nouvelles séquences (70.7±20.2%, $t(14) = 4.0$, $p = 0.001$)[1]. Les sujets étaient légèrement mieux pour rejeter les séquences agrammaticales (74.4±22.4%, $t(14) = 4.2$, $p < 0.001$) que pour accepter les

[1]Inclure tous les sujets dans l'analyse résulte également en une performance significative (61.8±22.4%, $t(22) = 2.5$, $p = 0.020$).

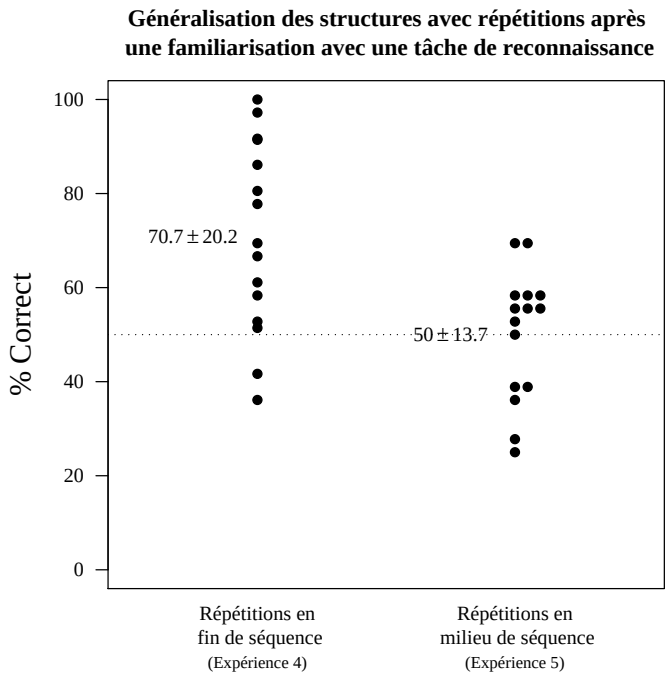


FIG. 7.2 – Résultats des tests de généralisation des expériences 4 et 5. Les sujets généralisaient la structure ABCDE*FF* mais pas la structure ABC*DD*EF.

séquences grammaticales (66.7±26.9%, $t(14) = 2.4$, $p = 0.031$) mais cette tendance n'était pas significative ($t(14) = 1.1$, $p > 0.3$, ns, test de t apparié) ; elle était le résultat d'un sujet qui a rejeté toutes les séquences. Il n'y avait pas de tendance globale à accepter les séquences grammaticales (46.1±14.2%, $t(14) = 1.1$, $p > 0.3$, ns).

7.2 Expérience 5 : Généralisation des répétitions en milieu de séquence

Les sujets ont réussi de généraliser la structure ABCDE*FF* lors de l'expérience 4. Dans cette expérience, je me suis demandé si ceci serait également possible pour la structure ABC*DD*EF, où les répétitions sont localisées en milieu de séquence.

7.2.1 Matériels et méthodes

L'expérience était identique à l'expérience 4 sauf que les sujets devaient apprendre la structure ABC*DD*EF. Pendant la phase de familiarisation, les séquences à mémoriser avaient la structure ABC*DD*EF tandis que les autres séquences utilisées pour le test de rétention avait la structure ABCDE*FF*. Pendant la phase de test, les séquences grammaticales avaient la structure ABC*DD*EF tandis que les séquences agrammaticales avaient la structure ABC*C*DEF. Les séquences de familiarisation et de test sont détaillées dans les tables 7.3 et 7.4, respectivement.

Sujets

Dix-sept sujets italiens (12 femmes, cinq hommes, âgés de 19 à 29 ans pour un âge moyen de 22.4 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique. Un sujet a dû être exclu parce qu'elle n'a pas utilisé les boutons de réponse appropriés.

7.2.2 Résultats

Le taux de réponses correctes lors du test de rétention pendant la phase de familiarisation était 92.0±8.4% ($t(16) = 20.7$, $p < 0.001$) ; il n'était pas différent du taux obtenu lors de l'expérience 4 ($F(1,38) = 2.9$, $p = 0.096$, ns). Les sujets avec plus de 20% d'erreurs pendant cette phase étaient exclus des autres analyses ; 15 sujets ont été retenus pour les analyses suivantes.

Comme le montre la figure 7.2, les sujets n'ont pas généralisé la structure ABC*DD*EF aux nouvelles séquences ; le pourcentage de réponses correctes n'était pas différent du niveau du hasard (50.0±13.7%, $t(14) = 0.0$, $p > 0.999$, ns)[2]. Les sujets n'ont ni accepté les séquences grammaticales

[2]La performance n'était pas différente du hasard non plus en incluant tous les sujets (49.3±13.0%, $t(16) = 0.2$, $p > 0.8$, ns).

TAB. 7.3 – Séquences de familiarisation utilisées pour l'expérience 5 en transcription SAMPA.

Première séquence	Deuxième séquence	Troisième séquence	Réponse correcte
tek2pazozofusi	tek2pazofusisi	tek2pazozofusi	3
tek2pazozosifu	tek2pazosifufu	tek2pazozosifu	3
tek2pafufuzosi	tek2pafuzosisi	tek2pafufuzosi	3
tek2pafufusizo	tek2pafusizozo	tek2pafufusizo	3
tek2pasisizofu	tek2pasizofufu	tek2pasisizofu	3
tek2pasisifuzo	tek2pasifuzozo	tek2pasisifuzo	3
k2patezozofusi	k2patezofusisi	k2patezozofusi	3
k2patezozosifu	k2patezosifufu	k2patezozosifu	3
k2patefufuzosi	k2patefuzosisi	k2patefufuzosi	3
k2patefufusizo	k2patefusizozo	k2patefufusizo	3
k2patesisizofu	k2patesizofufu	k2patesisizofu	3
k2patesisifuzo	k2patesifuzozo	k2patesisifuzo	3
k2tepazozofusi	k2tepazofusisi	k2tepazozofusi	3
k2tepazozosifu	k2tepazosifufu	k2tepazozosifu	3
k2tepafufuzosi	k2tepafuzosisi	k2tepafufuzosi	3
k2tepafufusizo	k2tepafusizozo	k2tepafufusizo	3
k2tepasisizofu	k2tepasizofufu	k2tepasisizofu	3
k2tepasisifuzo	k2tepasifuzozo	k2tepasisifuzo	3
patek2zozofusi	patek2zozofusi	patek2zofusisi	2
patek2zozosifu	patek2zozosifu	patek2zosifufu	2
patek2fufuzosi	patek2fufuzosi	patek2fuzosisi	2
patek2fufusizo	patek2fufusizo	patek2fusizozo	2
patek2sisizofu	patek2sisizofu	patek2sizofufu	2
patek2sisifuzo	patek2sisifuzo	patek2sifuzozo	2
pak2tezozofusi	pak2tezozofusi	pak2tezofusisi	2
pak2tezozosifu	pak2tezozosifu	pak2tezosifufu	2
pak2tefufuzosi	pak2tefufuzosi	pak2tefuzosisi	2
pak2tefufusizo	pak2tefufusizo	pak2tefusizozo	2
pak2tesisizofu	pak2tesisizofu	pak2tesizofufu	2
pak2tesisifuzo	pak2tesisifuzo	pak2tesifuzozo	2
tepak2zozofusi	tepak2zozofusi	tepak2zofusisi	2
tepak2zozosifu	tepak2zozosifu	tepak2zosifufu	2
tepak2fufuzosi	tepak2fufuzosi	tepak2fuzosisi	2
tepak2fufusizo	tepak2fufusizo	tepak2fusizozo	2
tepak2sisizofu	tepak2sisizofu	tepak2sizofufu	2
tepak2sisifuzo	tepak2sisifuzo	tepak2sifuzozo	2

TAB. 7.4 – Séquences de test utilisées pour l'expérience 5 en transcription SAMPA.

Séquences grammaticales	Séquences agrammaticales
fas2zepipituko	fas2zezepituko
fas2zepupukito	fas2zezepukito
fas2zetitipoku	fas2zezetipoku
fas2zetotokipu	fas2zezetokipu
fas2zekukupoti	fas2zezekupoti
fas2zekokotupi	fas2zezekotupi
sezaf2pipituko	sezaf2f2pituko
sezaf2pupukito	sezaf2f2pukito
sezaf2titipoku	sezaf2f2tipoku
sezaf2totokipu	sezaf2f2tokipu
sezaf2kukupoti	sezaf2f2kupoti
sezaf2kokotupi	sezaf2f2kotupi
safez2pipituko	safez2z2pituko
safez2pupukito	safez2z2pukito
safez2titipoku	safez2z2tipoku
safez2totokipu	safez2z2tokipu
safez2kukupoti	safez2z2kupoti
safez2kokotupi	safez2z2kotupi

(51.5±23.6%, $t(14) = 0.2$, $p > 0.8$, ns) ni rejeté les séquences agrammaticales (48.5±23.1%, $t(14) = 0.3$, $p > 0.8$, ns). La différence entre les séquences grammaticales et agrammaticales était le résultat d'un sujet qui a accepté presque toutes les séquences et n'était donc pas significative ($t(14) = 0.3$, $p > 0.7$, ns, test de t apparié). Il n'y avait pas de différence entre la proportion de séquences acceptées pendant les premiers 18 essais (51.1±20.3%) et les derniers 18 essais (51.9±18.3% ; $t(14) = 0.4$, $p > 0.7$, ns, test de t apparié).

Le pourcentage de réponses correctes dans la phase de test de l'expérience 5 était différent de celui de l'expérience 4 ($F(1,28) = 10.7$, $p = 0.003$)[3].

[3]Quand tous les sujets ont été inclus, les pourcentages de réponses correctes étaient toujours différents entre les expériences 4 et 5 ($F(1,38) = 4.2$, $p = 0.048$). L'effet de l'exclusion des sujets qui n'ont pas réussi le test de rétention était donc de réduire la variance entre les sujets résultant de facteurs attentionnels.

7.2.3 Discussion

Les sujets ne pouvaient pas généraliser une structure avec répétitions quand les répétitions étaient localisées en milieu de séquence. Une raison possible pour ce résultat pourrait être que les sujets avaient appris qu'il y avait une répétition *quelque part* en milieu de séquence sans savoir exactement où. En d'autres termes, les sujets auraient pu remarquer les répétitions mais déterminer leur position exacte pourrait être plus difficile au milieu d'une séquence qu'en PDB. Il convient cependant de noter qu'un tel avantage ne devrait pas exister si les positions séquentielles étaient représentées comme des variables — puisque toutes les positions devraient être formellement équivalentes — et donc si les structures avec répétitions étaient généralisées par un mécanisme général d'extraction de règles.

De plus, certains aspects de mes résultats semblent exclure cette possibilité. Si les sujets avaient des difficultés de déterminer la position exacte des répétitions, ils devraient considérer *toutes* les séquences comme grammaticales car toutes les séquences contiennent une répétition *quelque part* au milieu. Par conséquent, les sujets devraient avoir un biais d'accepter *toutes* les séquences comme grammaticales. Comme cette prédiction n'a pas été confirmée, je rejète la possibilité que les sujets ont appris simplement qu'il y avait une répétition quelque part dans la séquence. Une autre raison possible pour l'incapacité de généraliser la structure ABC*DD*EF pourrait être que les sujets ont effectivement appris que les séquences contiennent une répétition quelque part au milieu, mais qu'ils savaient également qu'il y avait et des séquences grammaticales et des séquences agrammaticales. Il est donc concevable qu'ils aient commencé par accepter toutes les séquences comme grammaticales puisqu'elles contenaient une répétition au milieu. Or, ils auraient pu remarquer tôt ou tard qu'ils n'ont pas encore classifié de séquence comme agrammaticale. Par conséquent, la proportion des séquences acceptées comme grammaticales devrait être plus élevée pendant la première partie de l'expérience que pendant la deuxième partie. Cette prédiction n'a pas été confirmée non plus.

Finalement, il est possible que le test de rétention pendant la phase de familiarisation rende les répétions en PDBs plus saillantes que les répétitions en milieu de séquence. Pendant la phase de familiarisation de l'expérience 5, les sujets ont dû mémoriser les séquences avec la structure ABC*DD*EF. Chaque séquence était suivie d'une séquence identique et d'une séquence avec les mêmes syllabes dans le même ordre mais conforme à la structure ABCDE*FF*. Les sujets devaient décider laquelle des deux séquences consécutives était celle qu'ils avaient mémorisée précédemment. Les sujets pourraient avoir remarqué qu'une de ces deux séquences avait une répétition en position finale et que cette séquence était toujours différente de la séquence qu'ils avaient mémorisée (et qui n'avait pas de répétition en PDB). Ceci pourrait avoir dirigé l'attention des sujets vers la fin des séquences, empêchant ainsi les sujets d'apprendre la structure ABC*DD*EF : pendant la tâche de familiarisation, ils auraient pu répondre simplement en se demandant si la deuxième ou la troisième séquence contenait une répétition en fin de séquence. Ceci expliquerait pourquoi les sujets n'ont pas remarqué la répétition en quatrième position.

Or, cette possibilité est trompeuse. En effet, si les positions séquentielles étaient des variables, la quatrième position dans une séquence aurait pu attirer l'attention des sujets autant que la dernière position ; les sujets auraient pu réussir la tâche de familiarisation de l'expérience 4 fort bien en se demandant si la deuxième ou la troisième séquence de chaque essai contenait une répétition en quatrième position — ce qui aurait dû empêcher les sujets de remarquer les répétitions en PDB et donc d'apprendre la structure ABCDE*FF*. Il est donc clair qu'un mécanisme général d'extraction de règles ne peut pas expliquer pourquoi la procédure de familiarisation des expériences 4 et 5 aurait pu attirer l'attention vers les PDBs plutôt que vers les positions en milieu de séquence — mais la logique de cet argument est précisément ce qui est à l'étude ici : ces expériences évaluent l'hypothèse que la saillance des PDBs influencent les processus symboliques qui généralisent les structures avec répétitions. Pour

réfuter cet argument, je considérerai néanmoins la possibilité que les sujets pourraient représenter les positions séquentielles comme des variables et que le test de rétention aurait pu créer de la confusion. Si ceci était le cas, les sujets devraient généraliser la structure AB*CDD*EF aussi bien que la structure ABCDE*FF* s'ils sont familiarisés seulement par une exposition passive aux séquences exemples. Cette possibilité sera étudiée lors des expériences 6 et 7. Au minimum, ces expériences corroboreront les résultats des expériences 4 et 5 avec des conditions de familiarisation différentes.

7.3 Expérience 6 : Généralisation des répétitions en fin de séquence après exposition simple

Les expériences 6 et 7 étaient des réplications des expériences 4 et 5 ; la seule différence était que la phase de familiarisation ne comportait pas de test de rétention. Les sujets ont donc simplement écouté les séquences exemples de manière passive et ont dû essayer de les mémoriser.

7.3.1 Matériels et méthodes

Après avoir entendu passivement 36 séquences exemples avec la structure ABCDE*FF*, les sujets devaient décider pour les mêmes séquences que dans la phase de test de l'expérience 4 si ces séquences avaient la même régularité que les séquences exemples. Les séquences grammaticales avaient donc la structure ABCDE*FF* tandis que les séquences agrammaticales avaient la structure ABCD*EE*F.

Sujets

Quinze sujets français (sept femmes, huit hommes, âgés de 20 à 27 ans pour un âge moyen de 22.7 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

7.3.2 Résultats et discussion

La figure 7.3 montre que les sujets ont généralisé la structure des séquences mémorisées correctement aux nouvelles séquences (82.8±19.8%, $t(14) = 6.4$, $p < 0.001$). Ils étaient légèrement mieux pour rejeter les séquences agrammaticales (88.1±22.8%, $t(14) = 6.5$, $p < 0.001$) que pour accepter les séquences grammaticales (77.4±28.9%, $t(14) = 3.7$, $p = 0.002$), mais cette tendance n'était pas significative ($t(14) = 1.2$, $p > 0.2$, ns, test de t apparié). Il n'y avait pas de tendance globale à accepter les séquences comme grammaticales (44.6±17.0%, $t(14) = 1.2$, $p > 0.2$, ns).

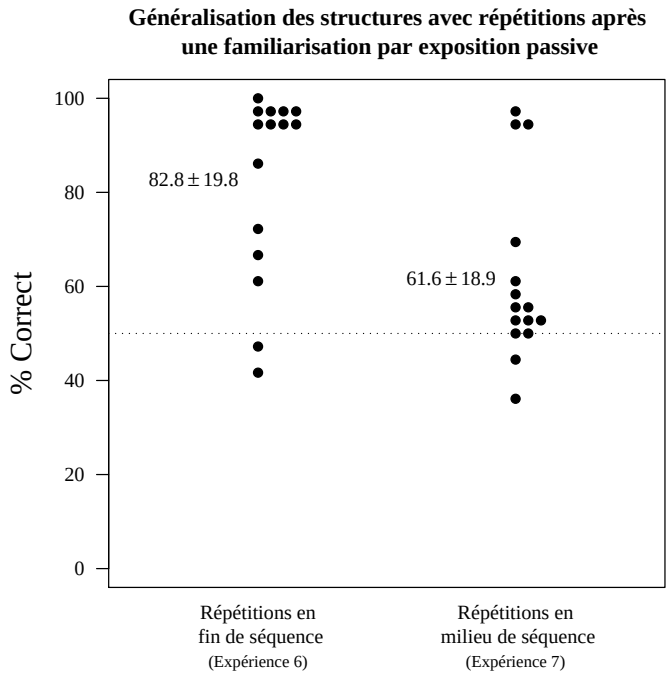


FIG. 7.3 – Résultats des expériences 6 et 7. Les sujets généralisaient la structure ABCDE*FF* mais la majorité écrasante ne généralisait pas la structure ABC*DD*EF.

7.4 Expérience 7 : Généralisation des répétitions en milieu de séquence après exposition simple

L'expérience 7 était une réplication de l'expérience 5 sauf que le test de rétention pendant la phase de familiarisation a été supprimé.

7.4.1 Matériels et méthodes

Les sujets ont entendu des séquences exemples de la forme ABC*DD*EF et devaient décider lors de la phase de test si de nouvelles séquences avec la structure ABC*DD*EF ou AB*CC*DEF partageaient la régularité des séquences exemples.

Sujets

Quinze sujets français (huit femmes, sept hommes, âgés de 20 à 37 ans pour un âge moyen de 26.4 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

7.4.2 Résultats

La figure 7.3 montre que les sujets ont généralisé la structure ABC*DD*EF aux nouvelles séquences (61.6±18.9%, $t(14) = 2.4$, $p = 0.032$). Ils ont accepté les séquences grammaticales (70.0±26.4%, $t(14) = 2.9$, $p = 0.011$) mais n'ont pas rejeté les séquences agrammaticales (53.3±31.1%, $t(14) = 0.4$, $p > 0.6$, ns). Cette tendance n'était cependant pas significative ($t(14) = 1.4$, $p = 0.160$, ns, test de t apparié). Les sujets n'avaient pas de biais d'accepter des séquences comme grammaticales (58.3±21.8%, $t(14) = 1.4$, $p = 0.160$, ns) et il n'y avait pas de différence entre les proportions de séquences acceptées comme grammaticales pendant la première moitié de l'expérience (58.1±23.0%) et la deuxième moitié (58.5±23.3%, $t(19) = 0.1$, $p > 0.9$, ns, test

de t apparié).

L'inspection de la figure 7.3 révèle que la performance relativement haute était portée par trois sujets qui ont découvert la structure explicitement et faisaient deux erreurs au plus. Ceci était probablement possible parce que les sujets avaient la possibilité de rabâcher les séquences ad libitum. Même sous ces conditions, la performance était meilleure pour l'expérience 6 que pour l'expérience 7 ($F(1,28) = 8.9$, $p = 0.006$). Si l'on exclut les trois sujets qui ont appris la structure explicitement, on obtient un pourcentage de réponses correctes dans l'expérience 7 de 53.2±8.3 ($t(11) = 1.6$, $p > 0.2$, ns)[4].

7.4.3 Discussion

Les expériences 6 et 7 répliquent les résultats principaux des expériences 4 et 5 : la plupart des sujets ont généralisé facilement la structure ABCDE*FF* mais n'ont pas pu généraliser la structure ABC*DD*EF. Les mêmes analyses que pour l'expérience 5 montrent que le faible taux de réponses correctes pour la structure ABC*DD*EF n'est pas le résultat de difficultés de déterminer la position exacte d'une répétition en milieu de séquence. Les expériences 6 et 7 étaient particulièrement instructives car les sujets avaient la possibilité de rabâcher les séquences ad libitum. Même sous ces conditions, seulement trois sujets ont appris la structure ABC*DD*EF — et tous ces sujets n'ont pas seulement appris la structure des séquences mais pouvaient également rapporter l'algorithme avec lequel les séquences ont été générées. Quand je leur ai demandé s'ils avaient remarqué la structure des séquences (une question standard de débriefing), ils ont mentionné les répétitions au milieu des séquences et comment les voyelles et

[4]L'inspection de la figure 7.3 montre également que les résultats de l'expérience 6 ne comportaient pas de 'outlier' comme ceux qui ont influencé les résultats de l'expérience 7. Même quand les trois meilleurs sujets sont exclus de l'analyse de l'expérience 6, la généralisation de la structure ABCDE*FF* est toujours statistiquement robuste (79.0±20.4%, $t(11) = 4.9$, $p < 0.001$) ; la performance des autres sujets était meilleure que celle des sujets de l'expérience 7 — qui comportait les trois 'outliers' ($F(1,25) = 5.2$, $p = 0.032$).

les consonnes ont été distribuées dans les syllabes des séquences de familiarisation et de test. Ceci suggère que les sujets peuvent entretenir et tester des hypothèses extrêmement complexes quand ils ont l'occasion de les verbaliser mais qu'ils ne sont pas équipés d'un mécanisme d'extraction de règles automatique qui représente les positions séquentielles comme des variables : quand les sujets n'ont pas remarqué les structures explicitement, ils n'ont pas pu les généraliser.

Une raison possible pour laquelle la majorité écrasante des sujets n'a pas généralisé la structure ABC*DD*EF pourrait être que les sujets ne pouvaient simplement pas encoder les items en milieu de séquence correctement. Dans les expériences précédentes, les sujets ont dû apprendre une structure qui était *indépendante* de ses exemplifications en des séquences particulières. Or, il est possible que les problèmes de généraliser la structure et ABC*DD*EF étaient simplement le résultat d'un problème de traiter les syllabes en milieu de séquence parce que les sujets pourraient entendre 'mal' les syllabes en milieu de séquence ; dans ce cas, des problèmes similaires devraient persister quand les sujets sont confrontés à une tâche où ils doivent *discriminer* les séquences au lieu de généraliser leur structure. Dans les trois dernières expériences de ce chapitre, j'ai donc construit une tâche pour laquelle les sujets devaient faire les mêmes discriminations que lors des phases de test des expériences 4 à 7 mais qui ne nécessitait pas de généralisations aux nouvelles séquences.

7.5 Expérience 8 : Discrimination des répétitions en fin de séquence

Lors de l'expérience 8, les sujets devaient discriminer des séquences avec la structure ABCDE*FF* des séquences avec la structure ABCD*EE*F ; ils devaient donc faire les mêmes distinctions que pour les expériences 4 et 6.

7.5.1 Matériels et méthodes

Pendant chaque essai, les sujets entendaient deux séquences de syllabes. La première avait toujours la structure ABCDE*FF* ; la deuxième était ou bien identique à la première ou bien elle contenait les mêmes syllabes dans le même ordre mais avait la structure ABCD*EE*F. Les sujets devaient décider si les séquences étaient identiques ou différentes. Il y avait 18 essais avec des séquences identiques et 18 essais avec des séquences différentes présentés en ordre aléatoire ; toutes les séquences sont détaillées dans la table 7.6

Avant de passer aux essais proprement dits, les sujets ont entendu 36 essais d'exemple. Lors de ces exemples, les sujets ne pouvaient pas donner de réponse mais étaient simplement informés si deux séquences étaient identiques ou pas. 18 exemples contenaient des séquences identiques et 18 des séquences différentes ; les séquences sont présentées dans la table 7.5. La raison pour inclure ces exemples était de rester aussi proche que possible à la procédure pour les expériences 6 et 7 et donc d'inclure également une phase de familiarisation.

Sujets

Quinze sujets français ou italiens (10 femmes, cinq hommes, âgés de 20 à 63 ans pour un âge moyen de 27.1 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

7.5.2 Résultats et discussion

Comme deux sujets de l'expérience 9 ne prêtaient visiblement pas attention à la tâche (ils parlaient entre eux pendant l'expérience), j'ai exclu les sujets différant plus que deux déviations standard de la moyenne. Dans cette expérience, aucun sujet n'a été exclu par ce critère. La figure 7.4

TAB. 7.5 – Séquences d'exemple utilisées lors de l'expérience 8 en transcription SAMPA.

Paires de séquences			
Différentes		Identiques	
tek2pazofusisi	tek2pazofufusi	tek2pasifuzozo	tek2pasifuzozo
pak2tezosifufu	pak2tezosisifu	patek2fuzosisi	patek2fuzosisi
tek2pafusizozo	tek2pafusisizo	pak2tezofusisi	pak2tezofusisi
tek2pazosifufu	tek2pazosisifu	tepak2zosifufu	tepak2zosifufu
tepak2zofusisi	tepak2zofufusi	pak2tefuzosisi	pak2tefuzosisi
k2patezofusisi	k2patezofufusi	pak2tesizofufu	pak2tesizofufu
patek2sifuzozo	patek2sifufuzo	k2patefusizozo	k2patefusizozo
k2tepasizofufu	k2tepasizozofu	pak2tesifuzozo	pak2tesifuzozo
tepak2fuzosisi	tepak2fuzozosi	k2patefuzosisi	k2patefuzosisi
k2tepazofusisi	k2tepazofufusi	patek2zosifufu	patek2zosifufu
tepak2fusizozo	tepak2fusisizo	k2tepazosifufu	k2tepazosifufu
k2tepafusizozo	k2tepafusisizo	pak2tefusizozo	pak2tefusizozo
k2patesifuzozo	k2patesifufuzo	tepak2sizofufu	tepak2sizofufu
k2tepafuzosisi	k2tepafuzozosi	tek2pafuzosisi	tek2pafuzosisi
k2tepasifuzozo	k2tepasifufuzo	tek2pasizofufu	tek2pasizofufu
patek2zofusisi	patek2zofufusi	k2patesizofufu	k2patesizofufu
k2patezosifufu	k2patezosisifu	patek2fusizozo	patek2fusizozo
patek2sizofufu	patek2sizozofu	tepak2sifuzozo	tepak2sifuzozo

montre que la performance de discrimination était presque parfaite (93.7±5.4%, $t(14) = 31.3$, $p < 0.001$).

7.6 Expérience 9 : Discrimination des répétitions en milieu de séquence

Cette expérience était identique à l'expérience 8 sauf que les sujets devaient discriminer des séquences avec la structure ABC*DD*EF de séquences avec la structure AB*CC*DEF. Chaque essai était composé de deux séquences dont la première avait toujours la structure ABC*DD*EF ; la deuxième était ou bien identique à la première ou composée des mêmes syllabes

TAB. 7.6 – Séquences de test utilisées lors de l'expérience 8 en transcription SAMPA.

Paires de séquences			
Différentes		Identiques	
sezaf2kupotiti	sezaf2kupopoti	f2zasetipokuku	f2zasetipokuku
fas2zekupotiti	fas2zekupopoti	f2zasekupotiti	f2zasekupotiti
sezaf2pitukoko	sezaf2pitutuko	safez2tokipupu	safez2tokipupu
sezaf2kotupipi	sezaf2kotutupi	fas2zetokipupu	fas2zetokipupu
z2fesapukitoto	z2fesapukikito	sezaf2tipokuku	sezaf2tipokuku
fas2zekotupipi	fas2zekotutupi	sezaf2tokipupu	sezaf2tokipupu
f2zasekotupipi	f2zasekotutupi	safez2tipokuku	safez2tipokuku
f2zasetokipupu	f2zasetokikipu	zes2fapukitoto	zes2fapukitoto
safez2kupotiti	safez2kupopoti	f2zasepitukoko	f2zasepitukoko
z2fesatokipupu	z2fesatokikipu	fas2zepitukoko	fas2zepitukoko
zes2fatokipupu	zes2fatokikipu	safez2kotupipi	safez2kotupipi
zes2fakotupipi	zes2fakotutupi	safez2pitukoko	safez2pitukoko
z2fesapitukoko	z2fesapitutuko	sezaf2pukitoto	sezaf2pukitoto
zes2fatipokuku	zes2fatipopoku	zes2fapitukoko	zes2fapitukoko
zes2fakupotiti	zes2fakupopoti	safez2pukitoto	safez2pukitoto
f2zasepukitoto	f2zasepukikito	z2fesakotupipi	z2fesakotupipi
fas2zepukitoto	fas2zepukikito	fas2zetipokuku	fas2zetipokuku
z2fesatipokuku	z2fesatipopoku	z2fesakupotiti	z2fesakupotiti

dans le même ordre mais conforme à la structure ABCCDEF. Les sujets devaient décider si les séquences étaient identiques ou différentes ; ils ont entendu des essais exemples avant de passer aux essais proprement dits. Les séquences exemples et les séquences de test sont détaillées dans les tables 7.7 et 7.8, respectivement.

Sujets

Dix-sept sujets français ou italiens (13 femmes, quatre hommes, âgés de 20 à 29 ans pour un âge moyen de 23.8 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

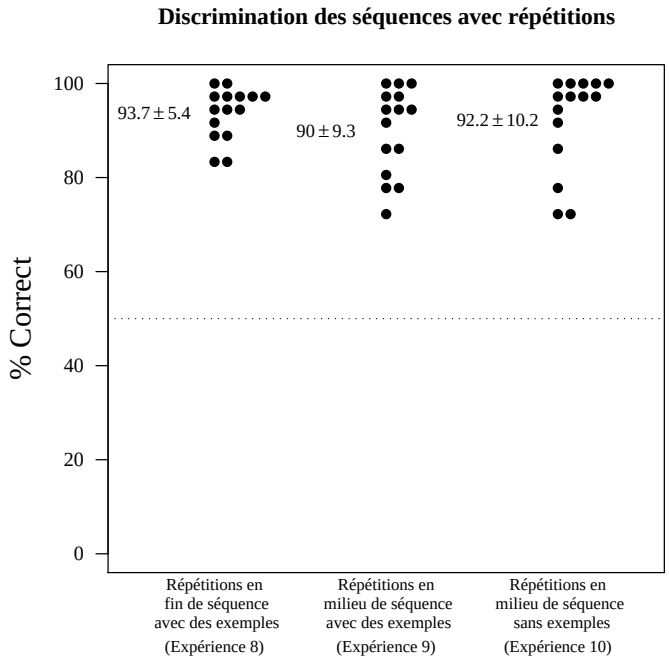


FIG. 7.4 – Résultats des expériences 8 à 10. Les sujets pouvaient discriminer les séquences avec la structure ABCDE*FF* des séquences avec la structure ABCD*EE*F aussi bien que les séquences avec la structure AB*CDD*EF des séquences avec la structure AB*CC*DEF. Lors des expériences 8 et 9 (à gauche), les sujets ont d'abord été familiarisés avec des essais exemples ; ceci n'était pas le cas lors de l'expérience 10 (à droite).

7.6.1 Résultats et discussion

Les sujets différant plus que deux déviations standards de la moyenne ont été exclus de l'analyse (n = 2) ; un autre critère aurait été d'exclure les sujets qui parlaient entre eux pendant l'expérience. La figure 7.4 montre que la performance de discrimination des 15 sujets restants était presque parfaite (90.0±9.3%, $t(14) = 16.7$, $p < 0.001$) ; cette performance n'était pas différente de celle obtenue lors de l'expérience 8 ($F(1,28) = 1.8$, $p = 0.192$, ns).

Comme les sujets ont discriminé les séquences lors des expériences 8

TAB. 7.7 – Séquences exemples utilisées lors de l'expérience 9 en transcription SAMPA.

Paires de séquences			
Différentes		Identiques	
tek2pazozofusi	tek2papazofusi	tek2pasisifuzo	tek2pasisifuzo
pak2tezozosifu	pak2tetezosifu	patek2fufuzosi	patek2fufuzosi
tek2pafufusizo	tek2papafusizo	pak2tezozofusi	pak2tezozofusi
tek2pazozosifu	tek2papazosifu	tepak2zozosifu	tepak2zozosifu
tepak2zozofusi	tepak2k2zofusi	pak2tefufuzosi	pak2tefufuzosi
k2patezozofusi	k2patetezofusi	pak2tesisizofu	pak2tesisizofu
patek2sisifuzo	patek2k2sifuzo	k2patefufusizo	k2patefufusizo
k2tepasisizofu	k2tepapasizofu	pak2tesisifuzo	pak2tesisifuzo
tepak2fufuzosi	tepak2k2fuzosi	k2patefufuzosi	k2patefufuzosi
k2tepazozofusi	k2tepapazofusi	patek2zozosifu	patek2zozosifu
tepak2fufusizo	tepak2k2fusizo	k2tepazozosifu	k2tepazozosifu
k2tepafufusizo	k2tepapafusizo	pak2tefufusizo	pak2tefufusizo
k2patesisifuzo	k2patetesifuzo	tepak2sisizofu	tepak2sisizofu
k2tepafufuzosi	k2tepapafuzosi	tek2pafufuzosi	tek2pafufuzosi
k2tepasisifuzo	k2tepapasifuzo	tek2pasisizofu	tek2pasisizofu
patek2zozofusi	patek2k2zofusi	k2patesisizofu	k2patesisizofu
k2patezozosifu	k2patetezosifu	patek2fufusizo	patek2fufusizo
patek2sisizofu	patek2k2sizofu	tepak2sisifuzo	tepak2sisifuzo

et 9 presque parfaitement, on pourrait conclure que l'impossibilité de généraliser la structure ABC*DD*EF lors des expériences 5 et 7 n'était pas le résultat de difficultés psychophysiques ou attentionnelles. Or, les essais exemples de l'expérience 9 pourraient avoir encouragé les sujets de prêter attention spécifiquement aux milieux de séquences, et ceci pourrait expliquer pourquoi la performance de discrimination de l'expérience 9 ne reflète pas les difficultés de généraliser la structure ABC*DD*EF. Comme l'attention des sujets pourrait être dirigée vers le milieu des séquences, il pourrait être plus facile de traiter les syllabes qui s'y trouvent. Par conséquent, si les sujets avaient été encouragés de la même manière de prêter attention aux milieux des séquences lors des expériences 5 et 7, peut-être auraient-ils pu généraliser également la structure ABC*DD*EF. Afin d'exclure cette possibilité, j'ai répliqué l'expérience 9 *sans* les essais exemples.

TAB. 7.8 – Séquences de test utilisées lors de l'expérience 9 en transcription SAMPA.

Paires de séquences			
Différentes		Identiques	
sezaf2kukupoti	sezaf2f2kupoti	f2zasetitipoku	f2zasetitipoku
fas2zekukupoti	fas2zezekupoti	f2zasekukupoti	f2zasekukupoti
sezaf2pipituko	sezaf2f2pituko	safez2totokipu	safez2totokipu
sezaf2kokotupi	sezaf2f2kotupi	fas2zetotokipu	fas2zetotokipu
z2fesapupukito	z2fesasapukito	sezaf2titipoku	sezaf2titipoku
fas2zekokotupi	fas2zezekotupi	sezaf2totokipu	sezaf2totokipu
f2zasekokotupi	f2zasesekotupi	safez2titipoku	safez2titipoku
f2zasetotokipu	f2zasesetokipu	zes2fapupukito	zes2fapupukito
safez2kukupoti	safez2z2kupoti	f2zasepipituko	f2zasepipituko
z2fesatotokipu	z2fesasatokipu	fas2zepipituko	fas2zepipituko
zes2fatotokipu	zes2fafatokipu	safez2kokotupi	safez2kokotupi
zes2fakokotupi	zes2fafakotupi	safez2pipituko	safez2pipituko
z2fesapipituko	z2fesasapituko	sezaf2pupukito	sezaf2pupukito
zes2fatitipoku	zes2fafatipoku	zes2fapipituko	zes2fapipituko
zes2fakukupoti	zes2fafakupoti	safez2pupukito	safez2pupukito
f2zasepupukito	f2zasesepukito	z2fesakokotupi	z2fesakokotupi
fas2zepupukito	fas2zezepukito	fas2zetitipoku	fas2zetitipoku
z2fesatitipoku	z2fesasatipoku	z2fesakukupoti	z2fesakukupoti

7.7 Expérience 10 : Discrimination des répétitions en milieu de séquence sans exposition préalable

L'expérience 10 était identique à l'expérience 9 sauf que les essais exemples n'ont pas été présentés.

7.7.1 Matériels et méthodes

Sujets

Quinze sujets français (neuf femmes, six hommes, âgés de 18 à 35 ans pour un âge moyen de 23.4 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

7.7.2 Résultats

La figure 7.4 montre que la performance de discrimination était presque parfaite (92.2±10.2%, $t(14) = 16.0$, $p < 0.001$) et ne différait pas de celle obtenue lors de l'expérience 8 ($F(1,28) = 0.2$, $p = 0.623$, ns) ou 9 ($F(1,28) = 0.4$, $p = 0.537$, ns).

La proportion des sujets ayant donné une réponse correcte lors du premier essai était différente du niveau du hasard ($p < 0.008$, test binomial) et, pour chaque sujet, la proportion de réponses correctes pour le premier essai avec des séquences identiques n'était pas différente de la proportion pour le premier essai avec des séquences différentes ($\chi^2(2) = 2.16$, $p > 0.141$, ns).

7.7.3 Discussion

Lors des expériences 4 à 7, les sujets ont généralisé la structure ABCDE*FF* facilement mais pas la structure ABC*DD*EF. Par contre, les expériences 8 à 10 ont montré que les sujets peuvent *discriminer* les séquences avec des répétitions au milieu aussi bien que les séquences avec des répétitions en PDB finale.

Or, il est possible que la tâche de discrimination ait encouragé les sujets de prêter attention spécifiquement aux milieux de séquence — car c'était

seulement en ces positions que deux séquences pouvaient différer. Cette possibilité fait deux prédictions. D'abord, les sujets devraient avoir une bonne performance seulement après quelques essais — parce qu'ils devraient remarquer que les séquences peuvent différer seulement en milieu de séquence *avant* de pouvoir utiliser cette régularité ; ils devraient donc être proches du hasard pour les premiers essais. Deuxièmement, la performance pour les premiers essais 'différents' devrait être pire que la performance pour les premiers essais 'identiques' car ce sont seulement les essais 'différents' où les sujets peuvent apprendre que les séquences ne peuvent différer qu'en milieu de séquence. Or, ces analyses ont montré que les sujets ont eu une bonne performance dès le premier essai et que la performance initiale pour les essais avec des séquences identiques et les essais avec des séquences différentes n'étaient pas différentes. Ceci suggère que les sujets ont pu encoder et traiter les syllabes en milieu de séquence spontanément ; ils ont discriminé les séquences sans devoir remarquer d'abord que les séquences ne pouvaient différer qu'en milieu.

Or, en plus de ne pas nécessiter des généralisations, il y a d'autres raisons pour lesquelles les tâches des expériences 8 à 10 pourraient être plus simples que les tâches des expériences 4 à 7. Dans les expériences 8 à 10, il suffisait de mémoriser seulement deux séquences à la fois tandis que, lors des autres expériences, les sujets ont dû mémoriser toutes les séquences de familiarisation avant d'être testés. Or, il était impossible de mémoriser les séquences parce qu'elles étaient trop nombreuses. Même si les sujets les avaient mémorisées, cet exploit n'aurait pas été utile pour les généralisations car ils ont été testés avec de *nouvelles* séquences. Par corollaire, les différences entre les expériences 8 à 10 et 4 à 7 ne peuvent pas être expliquées par des problèmes de mémoire.

Dans leur ensemble, ces données suggèrent que l'impossibilité de généraliser la structure AB*CDD*EF n'était pas le résultat d'un déficit brut pour traiter les syllabes en milieu de séquence ; les difficultés étaient spécifiques aux généralisations.

7.8 Discussion intermédiaire

Un des plus importants débats des sciences cognitives concerne l'existence des représentations mentales des règles. L'importance de ce débat découle du fait que l'éventuelle existence des règles mentales implique l'existence de contraintes représentationnelles innées. La raison est qu'un apprenti ne saurait choisir les *bonnes* généralisations s'il n'était pas doté de contraintes limitant les généralisations possibles. Alors l'esprit est traditionnellement vu comme un système computationnel symbolique (voir par exemple Chomsky, 1980; Fodor, 1975; Fodor & Pylyshyn, 1988; Gallistel, 1990, 2000; Gallistel & Gibbon, 2000, 2002; Marcus, 2001; Newell, 1980; Newell & Simon, 1976; Pinker & Prince, 1988; Pylyshyn, 1984), cette position a récemment été mis en doute par les chercheurs connexionnistes (voir par exemple J. A. Feldman & Ballard, 1982; Elman, 1990; Elman et al., 1996; Hinton & Anderson, 1981; Joanisse & Seidenberg, 1999; McClelland, Rumelhart & The PDP Research Group, 1986; Rumelhart, McClelland & The PDP Research Group, 1986; Seidenberg, 1997).

Dans les expériences présentées jusqu'ici, j'ai cherché de simples exemples d'opérations mentales symboliques tout en m'interrogeant sur leurs mécanismes psychologiques. En effet, le débat sur l'existence des règles mentales a été mené généralement en des termes très généraux ce qui a souvent conduit à l'hypothèse que l'apprentissage repose sur des mécanismes uniques et monolithiques qui peuvent être ou bien symboliques ou bien statistiques. Or, comme l'a montré par exemple Gallistel (1990, 2000), il est fort probable que les mécanismes d'apprentissage sont des solutions spécialisées pour les problèmes qu'un organisme confronte dans son environnement ; on doit donc analyser les propriétés computationnelles de chaque opération au cas par cas afin de comprendre (i) s'il s'agit d'une opération symbolique et (ii) quel est le mécanisme psychologique sous-jacent (voir également Fodor & Pylyshyn, 1988 pour une approche similaire pour la pensée et le langage quoiqu'en utilisant les propriétés 'macroscopiques' des computations correspondantes). Etudier le mécanisme psy-

chologique d'une opération est d'une importance aussi grande que d'identifier des opérations symboliques possibles car trouver d'éventuelles opérations symboliques dans l'esprit peut avoir des implications très différentes. D'un coté, une opération pourrait appartenir à ce que Fodor (1983) appelle les facultés horizontales ; ce sont des processus centraux contribuant à la fixation des croyances qui pourraient être puissants comme l'inférence scientifique. Trouver de l'évidence pour de tels processus, a forteriori chez les jeunes enfants qui ont été étudiés dans les expériences précédentes (voir par exemple Marcus et al., 1999), aurait un impact considérable sur la forme que les théories de l'acquisition du langage, ou plus généralement du développement cognitif, peuvent prendre. D'autre coté, les opérations symboliques pourraient exister également dans les modules ; dans ce cas, ce seraient par définition des opérations plus limitées et spécialisées que dans les facultés plus centrales.

Le point de départ des expériences présentées jusqu'ici était l'observation de Marcus et al. (1999) que les enfants de sept mois peuvent généraliser les structures avec répétition ABA, AAB et ABB. Ces auteurs ont conclu que ces généralisations reflètent des opérations symboliques et ils semblent proposer que ces opérations reposent sur un mécanisme général d'extraction de règles. Comme nous l'avons vu auparavant, ils ne discutent jamais explicitement la généralité ou le mécanisme de ces généralisations, mais leurs conclusions ainsi que d'autres ouvrages (voir par exemple Marcus, 2001) sont tout à fait compatibles avec cette interprétation générale de leurs résultats. Or, la conclusion que ces généralisations reflètent du traitement symbolique a été critiquée par de nombreux auteurs et Altmann (2002) et Negishi (1999) ont en effet montré qu'elle repose sur des hypothèses représentationnelles non vérifiées.

La première question que je me suis posée était de savoir si la généralisation des structures avec répétitions reflète un mécanisme symbolique. En suivant l'approche de Fodor et Pylyshyn (1988) et Gallistel (1990, 2000), j'ai analysé les propriétés computationnelles de cette opération dans le

but de décider si elles sont diagnostiques des capacités symboliques générales ou plutôt de mécanismes plus limités. Lors des expériences 1 à 3, j'ai montré que les adultes humains généralisent facilement les structures avec répétitions ABA et ABB mais pas les structures ordinales Bas-Haut-Milieu (BHM) et Milieu-Haut-Bas (MHB). Des conditions contrôles ont montré que la difficulté de généraliser les structures ordinales ne provient pas d'une difficulté de traiter les tons ou les intervalles correspondants. Or, comme tout mécanisme associationniste prédit que les structures ordinales devraient être généralisées plus facilement, le mécanisme traitant les répétitions ne peut pas être associationniste et doit donc être symbolique. Il convient de noter que cette conclusion ne dépend pas des propriétés d'un modèle associationniste ou d'hypothèses représentationnelles particuliers comme par exemple les arguments de Marcus et al. (1999) car tout modèle associationniste fait des prédictions qualitativement fausses concernant les structures avec répétitions ; les tokens qui implémentent les structures sont plus prédictifs des structures ordinales que des structures avec répétitions. Par conséquent, tout mécanisme pour qui — comme pour les mécanisms associationnistes — toute information doit être portée par les stimuli devrait traiter les structures ordinales mieux que les structures avec répétitions.

Alors que le mécanisme traitant les répétitions doit être symbolique, les résultats des expériences 1 à 3 sont incompatibles également avec les mécanismes symboliques généraux — parce que ceux-ci devraient généraliser les structures ordinales aussi bien que les structures avec répétitions ; la raison pour cela est que tous les deux types de structures devraient être appris en appliquant des opérations à des variables formellement équivalentes. J'ai donc conclu que le mécanisme traitant les répétitions est un mécanisme symbolique spécialisé et limité.

Il est cependant possible que ce mécanisme soit quand même une opération relativement généralement applicable. Lors des expériences 4 à 10, je me suis donc posé la question si ce mécanisme est un mécanisme géné-

ral à l'instar des opérations dans un ordinateur (ou de l'inférence scientifique) ou s'il s'agit d'un mécanisme computationnel qui pourrait résulter des contraintes du système perceptif. Ces expériences montrent que les sujets peuvent généraliser les structures avec répétitions facilement quand les répétitions sont localisées en fin de séquence mais qu'ils ont plus de difficultés de généraliser de telles structures quand les répétitions sont localisées en milieu de séquence. En d'autres termes, ils généralisent facilement la structure ABCDE*FF* mas pas la structure ABC*DD*EF. Or, les sujets peuvent *discriminer* ces séquences parfaitement bien — même s'ils ne peuvent pas utiliser cette capacité perceptive pour généraliser de l'information structurale. Comme je ne trouve pas de difficultés pour traiter les séquences avec des répétitions au milieu, un mécanisme général d'extraction de règles devrait généraliser les structures avec répétitions aussi bien quand les répétitions se trouve en milieu de séquence que quand elles se trouvent en fin de séquence parce que la seule différence entre ces structures est la question de savoir à laquelle des variables équivalentes (que sont les positions séquentielles) l'opération détectant les répétitions est appliquée. Si les séquences de sept syllabes étaient des séquences de variables $\xi_1 \ldots \xi_7$, la seule différence entre les structures serait que le mécanisme devrait calculer une relation de la forme $\xi_6 = \xi_7$ dans le cas de la structure ABCDE*FF* et une relation de la forme $\xi_4 = \xi_5$ dans le cas de la structure ABC*DD*EF. Or, aucun de ces calculs ne devrait être plus difficile que l'autre pour un mécanisme général d'extraction de règles. Comme les données ne supportent pas cette prédiction, il semble raisonnable de conclure que la généralisation des structures avec répétitions pourrait être effectuée par un mécanisme fortement affecté par des contraintes perceptives. Ceci est compatible avec l'hypothèse que des structures avec répétitions sont généralisées par une *primitive perceptive* sévèrement limitée — et non pas par un mécanisme général d'extraction de règles.

Les limitations de l'opération détectant les répétitions permettent également de contrer un argument classique par lequel on peut toujours affirmer qu'une structure est calculée par un mécanisme statistique même

si aucun mécanisme statistique connu peut la généraliser. L'argument est le suivant. On observe que certains modèles associationnistes (c'est-à-dire en général des réseaux connexionnistes) ne réussissent pas des calculs que par exemples les enfants savent faire (par exemple généraliser les structures avec répétitions dans l'expérience de Marcus et al., 1999). Or, les enfants qui participants à ces expériences ont eu une exposition considérable au monde avant de participer aux expériences ; les modèles associationnistes, par contre, n'ont pas de telle exposition préalable parce qu'ils sont évalués seulement avec les tâches des expériences. Il est donc possible que l'exposition au monde ait déformé l'espace représentationnel des enfants tel qu'également un modèle associationniste pourrait faire le calcul que les enfants ont réussi s'il pouvait utiliser l'espace représentationnel que les enfants utilisent. En d'autres termes, l'espace représentationnel des enfants est déformé par des processus associationnistes (avant de participer à l'expérience) de sorte que la représentation des stimuli d'une expérience dans cette espace permettrait à un mécanisme associationniste de faire les calculs qu'il ne pourrait pas réussir s'il devait traiter les stimuli directement.

Cet argument semble assez hypothétique car ni les processus ou stimuli qui déforment l'espace représentationnel sont spécifiés ni ce que cette espace représentationnel devrait être. Or, même si cet argument est sous-spécifié, on peut le réfuter pour les structures avec répétitions. D'abord, tandis qu'il est possible de se demander si les phonèmes dans l'expérience de Marcus et al. (1999) sont effectivement représentés en termes de leurs traits binaires (ce qui est leur argument central pour affirmer que leurs résultats reflètent des calculs symboliques), de tels doutes sont probablement moins critiques pour les expériences 1 à 3 — car au moins les représentations d'entrée sont organisées en fonction du pitch des notes puisqu'elles sont tonotopiques. Les expériences 4 à 10 fournissent encore une autre raison pour laquelle de tels arguments ne sont pas applicables aux structures avec répétitions. En effet, un mécanisme associationniste ne traite que les tokens, en l'occurrence des syllabes particulières. Or, comme

je n'ai observé aucune trace d'une difficulté de traiter les syllabes en milieu de séquence, un mécanisme qui ne traitent que de tokens ne devraient pas avoir de difficulté non plus de calculer les 'structures' en milieu de séquence. Comme les sujets ne peuvent pas généraliser la structure ABC*DD*EF alors qu'ils traitent les syllabes en milieu de séquence parfaitement bien, les structures avec répétitions ne peuvent pas être calculées par un mécanisme qui ne traite que de tokens et donc par un mécanisme associationniste — indépendamment de toute hypothèse sur le format de représentation interne des syllabes. Les limitations sélectives du mécanisme généralisant les répétitions excluent donc la possibilité qu'il puisse s'agir d'un mécanisme associationniste.

7.8.1 Une distinction compétence/performance peut-elle expliquer les résultats ?

On pourrait penser que mes résultats sont compatibles avec un mécanisme général d'extraction de règles si l'on admet une distinction entre la compétence et la performance. Les structures avec répétitions pourraient être généralisées par un mécanisme général d'extraction de règles mais ce mécanisme pourrait être soumis à des limitations de 'performance'.

Or, les limitations de performance résultent par définition des difficultés de mémoire ou perceptives ; or, je n'ai trouvé aucune trace pour de telles difficultés lors des expériences 8 à 10. Même s'il pourrait être possible que ces expériences n'étaient pas suffisamment sensitives pour détecter de telles difficultés et que même de petites différences psychophysiques pourraient engendrer les problèmes de généraliser les structures avec les répétitions en milieu de séquences que j'ai observés, il serait toujours nécessaire d'expliquer pourquoi des différences tellement petites peuvent changer la capacité de généraliser les structures avec répétitions aussi dramatiquement tandis que l'on n'observe aucun effet sur la performance de discrimination.

Même s'il pourrait être possible de construire des arguments de performance spécifiques qui pourraient réconcilier nos résultats avec un mécanisme général d'extraction de règles, je propose que les primitives perceptives fournissent une explication plus naturelle que des arguments spécifiquement construits. Un mécanisme général d'extraction de règles doit donc être supporté par des données expérimentales qui sont inconsistantes avec cette explication plus limitée et, si on l'ose dire, plausible.

7.8.2 D'autres propriétés des primitives perceptives

J'ai proposé que le mécanisme détectant les répétitions pourrait être une 'primitive perceptive', une opération symbolique spécialisée et limitée. Les résultats des expériences 4 à 10 révèlent certaines propriétés que cette opération doit avoir.

Comme mentionné plus haut, une primitive perceptive pourrait être une opération générale comme on s'attendrait à en trouver dans les ordinateurs. En effet, de nombreux auteurs ont proposé que l'esprit contient des primitives computationnelles (voir par exemple Block, 1995; Marcus, 2001; Pylyshyn, 1984) mais ces propositions étaient surtout des illustrations de l'analogie entre l'esprit en ordinateur. Marcus (2001) a par exemple proposé que « registers are central to human cognition » comme ils les sont pour des ordinateurs (ibid., p. 55) ; selon lui, de tels registres pourraient être implémentés par des circuits neuronaux bistables. En plus des registres, le cerveau contiendrait un « stock of basic instructions, each defined to operate over all possible values of registers » (ibid., p. 58)[5].

[5]La proposition que les composants de base du cerveau sont essentiellement les mêmes que ceux des ordinateurs actuels fait certaines hypothèses, sans même considérer ses implications plus générales. Tandis qu'il y a des neurones capables d'une activité bistable (voir par exemple Egorov, Hamam, Fransén, Hasselmo & Alonso, 2002), on ne sait pas si les opérations symboliques psychologiques utilisent de tels neurones ; on ne sait pas non plus si le cerveau utilise un schéma de codage binaire — avec des attracteurs avec plus que deux états, une logique avec plus que deux états est tout à fait envisageable. Une piste plus prometteuse serait d'explorer le rapport entre des opérations symboliques

Mes résultats montrent — au moins pour le cas de l'opération détectant les répétitions — que les primitives perceptives ne sont pas de telles opérations généralement applicables. En effet, le mécanisme généralisant les répétitions est fortement affecté par des facteurs perceptifs. C'est bien le mécanisme lui-même qui est affecté et non pas la perception des items qui exemplifient les structures (c'est-à-dire la perception des syllabes) car je n'ai observé aucune trace de difficultés pour le traitement des syllabes au milieu des séquences : les représentations des syllabes dans les séquences ne sont pas perturbées d'une manière mesurable par le fait de se trouver en milieu de séquence ; la raison pour l'échec relatif de généraliser la structure ABC*DD*EF n'est donc pas que les sujets n'entendent simplement pas les syllabes en milieu de séquence. Un opérateur général devrait donc fonctionner aussi bien sur les syllabes en PDB que sur les syllabes en milieu de séquence — si cet opérateur n'était pas lui-même perturbé par les effets perceptifs.

Je propose que de tels résultats ne sont pas limités aux structures avec répétitions mais pourraient également être valables pour d'autres opérations. Il convient encore de rappeler que la capacité d'extraire les répétitions *indépendamment* des items qui les exemplifient est cruciale pour expliquer les résultats présentés jusqu'ici et de Marcus et al. (1999) ; c'est donc bien une opération abstraite — mais sévèrement limitée. Les primitives perceptives pourraient être des opérations symboliques spécialisées et limitées fortement sensibles à des facteurs perceptifs ; malgré leurs limitations elles ont la capacité de supporter des généralisations. La primitive détectant les répétitions est donc une opération spécialisée pour traiter des structures particulières (c'est-à-dire les répétitions) et seulement sous les conditions d'entrée appropriées.

En conclusion, les expériences 1 à 10 suggèrent que l'esprit humain est

---

et leur substrat neuronal en explorant comment des opérations simples comme les primitives perceptives fonctionnent grâce à des études neurophysiologiques chez les animaux.

équipé d'une opération symbolique spécialisée pour traiter les structures avec répétitions. Ce mécanisme est fortement affecté par les facteurs perceptifs comme la saillance des positions où se trouvent les répétitions ce qui suggère qu'il nécessite des conditions d'entrée appropriées afin d'être 'activé'. Je propose que cette opération spécialisée et limitée est une *primitive perceptive*, une opération symbolique spécialisée pour extraire seulement certaines structures et seulement sous certaines conditions d'entrée. Or, si de telles primitives perceptives sont utiles pour décrire des processus cognitifs éventuellement symboliques, elles ne peuvent pas être limitées aux seules répétitions ; on devrait pouvoir trouver encore d'autres opérations spécialisées et limitées en d'autres domaines. Si ceci s'avérait vrai, on pourrait même envisager qu'un ensemble de primitives perceptives pourrait former une 'boîte à outils' computationnelle de l'esprit qui pourrait expliquer les mécanismes psychologiques de la manipulation des symboles. L'objectif des expériences suivantes est donc de commencer à répondre à la question de savoir si les répétitions sont une exception dans la mesure où elles sont traitées par une opération spécialisée ou si de tels mécanismes limités peuvent être observés également en d'autres domaines.

Chapitre 8

Effets perceptifs en phonotactique

Les résultats des expériences 1 à 10 ont montré que les structures avec répétitions sont généralisées par un mécanisme symbolique spécialisé fortement affecté par des facteurs perceptifs. J'ai proposé que ce mécanisme pourrait être un exemple de primitives perceptives, des opérations symboliques spécialisées et limitées qui pourraient résulter des contraintes du système perceptif mais que l'on pourrait également trouver en d'autres modules ou même en des facultés plus horizontales. La présente série d'expériences a deux objectifs. D'abord, pour que le concept des primitives perceptives ait un sens, le répertoire de telles primitives ne saurait être limité aux seules répétitions. Je me suis donc posé la question de savoir si l'on peut trouver des limitations perceptives également pour des généralisations plus linguistiques en utilisant les contraintes phonotactiques comme étude de cas. Deuxièmement, le rôle des positions de bord (PDBs) dans les expériences précédentes est ambigu : servent-elles simplement à rendre les répétitions plus 'saillantes' ou s'agit-il de positions spéciales qui pourraient être des *variables positionnelles* ? Cette deuxième question deviendra plus claire quand on aura présenté les expériences de ce chapitre.

8.1 Régularités phonotactiques

Différentes langues ont des patterns de sons différents ; elles admettent par exemple différents clusters de consonnes. Alors que les mots des langues comme le croate ou le polonais peuvent avoir de longs clusters de consonnes, de tels clusters ne sont pas permis dans les langues comme le japonais. Ces régularités influencent profondément comment les sons de parole sont perçus. Quand on présente par exemple des pseudo-mots avec un cluster de consonnes aux locuteurs japonais, ces locuteurs perçoivent des voyelles (illusoires) de 'remplissage' entre les consonnes du cluster ; ils entendent par exemple /ebuzo/ quand leur présente en réalité /ebzo/ (voir par exemple Dupoux, Kakehi, Hirose, Pallier & Mehler, 1999; Dupoux, Pallier, Kakehi & Mehler, 2001).

Comment de telles régularités peuvent-elles être apprises ? Des expériences récentes ont montré que les adultes ainsi que les enfants humains peuvent apprendre des régularités réminiscentes des contraintes phonotactiques à partir d'une exposition très limitée (Chambers et al., 2003; Onishi et al., 2002). Dans ces expériences, les adultes et les enfants ont été exposés à des mots avec la structure consonne-voyelle-consonne (CVC). Ils ont dû apprendre que certaines consonnes pouvaient apparaître uniquement en début de mot et d'autres uniquement en fin de mot ; l'ensemble de consonnes {b,k,m,t} pouvait par exemple apparaître uniquement en début de mot. Une interprétation possible de ces résultats est que les différentes positions des phonèmes des mots agissent comme des variables pouvant prendre des valeurs mutuellement exclusives. Les trois phonèmes pourraient donc être représentés comme une séquence de variables XYZ et les sujets pourraient apprendre que ces variables sont quantifiées sur des classes distinctes comme $X \in \{b,k,m,t\}$ — même si ces classes ne jouent aucun rôle dans les langues réelles puisqu'il ne s'agit pas de classes naturelles. Il convient de noter que Chambers et al. (2003) et Onishi et al. (2002) n'ont pas proposé une telle interprétation. Ils ont fourni de l'évidence pour des conditions sous lesquelles un apprentissage réminiscent

de l'apprentissage phonotactique peut être observé après une exposition très limitée — sans proposer que leurs résultats reflètent les opérations symboliques générales esquissées ci-dessus.

Je profite de leurs résultats pour me demander si ces contraintes phonotactiques peuvent être apprises uniformément partout dans les mots ou si cette forme d'apprentissage est également soumise à des contraintes perceptives — comme les structures avec répétitions dans les autres expériences. En étudiant la nature et la généralité des opérations symboliques sous-jacentes à cet apprentissage, je suis donc parti de l'hypothèse que l'apprentissage observé par Chambers et al. (2003) et Onishi et al. (2002) repose sur des capacités symboliques générales.

Comme Chambers et al. (2003) et Onishi et al. (2002) ont utilisé des mots CVC monosyllabiques, les sujets auraient pu apprendre que les mots commencent par certaines consonnes mais pas d'autres et qu'ils finissent par certaines autres consonnes mais pas d'autres. Un tel apprentissage pourrait donc être limité à la détection de sons particuliers dans des positions particulièrement saillantes. Ces expériences ont donc deux interprétations possibles : ou bien les sujets ont appris des régularités symboliques généralement applicables par lesquelles les positions des phonèmes sont représentées comme des variables — ou bien leurs généralisations reposaient sur la saillance des PDBs où se trouvaient les consonnes critiques. Afin de trancher entre ces deux possibilités, j'ai demandé aux sujets d'apprendre des régularités positionnelles comme dans les expériences de Chambers et al. (2003) et Onishi et al. (2002) ou bien quand les consonnes critiques étaient en PDB ou bien quand elles étaient en milieu de mot. Plus spécifiquement, je me suis demandé si les sujets pouvaient apprendre des contraintes portant sur les consonnes C_1 et C_2 non pas seulement dans les mots avec la forme $C_1V_1ccV_2C_2$ (où les consonnes critiques sont en PDB) mais également dans des mots avec la structure $cV_1C_1C_2V_2c$ (où les consonnes critiques sont en milieu de mot) ; les petits 'c' sont des consonnes de remplissage sans contraintes particulières.

Les sujets devaient apprendre des contraintes portant sur C_1 et C_2 dans les mots avec la structure $C_1V_1ccV_2C_2$ pendant l'expérience 11 et dans les mots avec la structure $cV_1C_1C_2V_2c$ lors de l'expérience 12. L'expérience 13 a étudié le rôle du début de mot tandis que l'expérience 14 a étudié le rôle de la fin de mot. Lors de l'expérience 15, les sujets devaient *discriminer* des mots qui différaient en leurs clusters médiaux de la même manière que les mots de test de l'expérience 12. Si les sujets discriminaient les mots bien, d'éventuels problèmes pour les généralisations lors de l'expérience 12 ne pourraient pas être expliqués par des difficultés psychophysiques ou attentionnels. Finalement, avec l'expérience 16, je me suis demandé si l'utilisation de classes naturelles de consonnes au lieu des classes arbitraires utilisées dans les autres expériences pourrait faciliter la généralisation des contraintes phonotactiques quand les consonnes critiques sont en milieu de mot.

Les méthodes détaillées pour toutes les expériences de chapitre peuvent être trouvées en annexe.

8.2 Expérience 11 : Contraintes phonotactiques en PDB

8.2.1 Matériels et méthodes

Sujets

Seize sujets français (12 femmes, quatre hommes, âgés de 19 à 45 ans pour un âge moyen de 27.2 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique. Dans cette et toutes les autres expériences de ce chapitre, la moitié des sujets appartenait à un de deux groupes et l'autre moitié à l'autre groupe afin de contrebalancer le matériel entre les sujets.

Stimuli

Lors de l'expérience 11, les sujets ont dû apprendre des contraintes portant sur C_1 et C_2 dans les mots avec la structure $C_1V_1ccV_2C_2$. Les sujets du group 1 ont dû apprendre que C_1 devait être un membre de la classe {k, t, f} et que C_2 devait être un membre de la classe {s, ʃ, p}. Le rôle des classes a été échangé pour les sujets du groupe 2. Tous les clusters qui peuvent être construits avec ces classes sont légaux en français dans les deux directions et ne resyllabifient pas en position intervocalique (Dell, 1995) ; des assimilations de voisement ne sont pas applicables parce que toutes les consonnes étaient dévoisées.

Les autres consonnes (les 'petits' c's) pouvaient être /l/, /R/ ou /n/ ; les répétitions de consonnes étaient exclues. Tous les clusters que l'ont peut générer avec ces consonnes sont légaux en français, ne resyllabifient pas en position intervocalique et ne subissent aucune assimilation de voisement.

J'appellerai les consonnes en PDB le *cadre* et les consonnes en milieu de mot le *cluster*. Avec ces classes de consonnes, on peut former six clusters ainsi que neuf cadres dont six ont été utilisés pour la phase de familiarisation ; trois cadres ont été réservés pour la phase de test (f...s, k...ʃ et t...p ainsi qui leurs inversions). Pendant la phase de familiarisation, la première voyelle dans un mot était toujours /a/ et la deuxième /i/ ; pendant la phase de test, l'ordre des voyelles a été inversé.

Les mots de familiarisation avaient la forme C_1/a/cc/i/C_2 tandis que les mots de test avaient la forme C_1/i/cc/a/C_2. Il y avait donc 36 mots de familiarisation ainsi que 18 items de test *legaux*. Tous les items ont été synthétisés avec MBROLA (Dutoit et al., 1996) en utilisant la base de diphones *fr2*. Les sujets ont été testés individuellement grâce à un script PERL/Tk.

Familiarisation

Les sujets ont été informés qu'ils entendraient des mots martiens, et qu'ils devaient écouter comment ces mots sonnaient. Ils ont été informés qu'ils devraient décider si de nouveaux mots sonnaient comme les mots martiens dans une deuxième partie de l'expérience. Ensuite, ils ont entendu tous les 36 mots de familiarisation une fois en ordre aléatoire. La table 8.1 montre les mots de familiarisation.

Test

Avant la phase de test, les sujets ont été informés qu'ils entendraient de paires de mots et devraient choisir lequel des deux était un mot martien en cliquant sur le bouton correspondant.

L'alternative correcte était comme les mots de familiarisation sauf que (i) un des cadres réservés pour la phase de test a été utilisé et (ii) la première voyelle était /i/ et la deuxième /a/. L'autre alternative était identique à la première sauf que les consonnes du cadre ont été échangées ; par conséquent, les choix corrects pour le premier group de sujets étaient les choix incorrects pour l'autre group et vice versa. Toutes les 18 paires de test ont été présentées deux fois en différents ordres ; les paires de testes sont détaillées dans la table 8.2.

8.2.2 Résultats et discussion

La figure 8.1 montre que les sujets ont généralisé les contraintes phonotactiques aux nouveaux cadres (65.8±15.6%, $t(15) = 4.0$, $p = 0.001$). Il n'y avait pas de différence entre les groupes de sujets ($F(1,14) = 0.4$, $p = 0.524$, ns).

Un certain nombre de sujets ont rapporté qu'ils ont remarqué que les mots devaient *finir* par certaines consonnes. Une analyse par item a montré que différents sujets ont trouvé saillantes différentes consonnes finales.

TAB. 8.1 – Mots de familiarisation utilisés lors des expériences 11, 13 et 14 en transcription SAMPA.

Groupe 1	Groupe 2
kalRis	salRik
kalRip	salRit
talRis	SalRit
talRiS	SalRif
falRiS	palRik
falRip	palRif
kalnis	salnik
kalnip	salnit
talnis	Salnit
talniS	Salnif
falniS	palnik
falnip	palnif
kaRlis	saRlik
kaRlip	saRlit
taRlis	SaRlit
taRliS	SaRlif
faRliS	paRlik
faRlip	paRlif
kaRnis	saRnik
kaRnip	saRnit
taRnis	SaRnit
taRniS	SaRnif
faRniS	paRnik
faRnip	paRnif
kanlis	sanlik
kanlip	sanlit
tanlis	Sanlit
tanliS	Sanlif
fanliS	panlik
fanlip	panlif
kanRis	sanRik
kanRip	sanRit
tanRis	SanRit
tanRiS	SanRif
fanRiS	panRik
fanRip	panRif

TAB. 8.2 – Paires de test utilisées lors de l'expérience 11 en transcription SAMPA.

Mots (groupe 1) Détracteurs (groupe 2)	Détracteurs (groupe 1) Mots (groupe 2)
fiRlas	siRlaf
fiRnas	siRnaf
filRas	silRaf
filnas	silnaf
finRas	sinRaf
finlas	sinlaf
kiRlaS	SiRlak
kiRnaS	SiRnak
kilRaS	SilRak
kilnaS	Silnak
kinRaS	SinRak
kinlaS	Sinlak
tiRlap	piRlat
tiRnap	piRnat
tilRap	pilRat
tilnap	pilnat
tinRap	pinRat
tinlap	pinlat

Afin de confirmer cette impression, j'ai calculé la différence quadratique entre la performance pour la 'meilleure' des consonnes et la performance pour la 'pire' des consonnes ; si ces performances sont distribuées selon une distribution normale, la différence est également distribuée selon une telle distribution, par hypothèse avec moyenne 0, et la somme des différences au carré normalisée par la variance des différences suit une distribution de χ^2. La probabilité que la somme résultante de 68.5 résulte d'une distribution de $\chi^2(16)$ est négligeable ($p < 1.8 \cdot 10^{-8}$). Si l'on trie les performances pour les trois consonnes finales possibles à *l'intérieur* des sujets, une ANOVA a révélé un effet principal ($F(1,15) = 53.5$, $p < 0.001$, ANOVA à mesures répétées) ; ceci confirme que les sujets ont réussi différemment pour les différentes consonnes finales (ou initiales, ce qu'on ne peut pas distinguer avec cette expérience). Or, la performance était meilleure que le

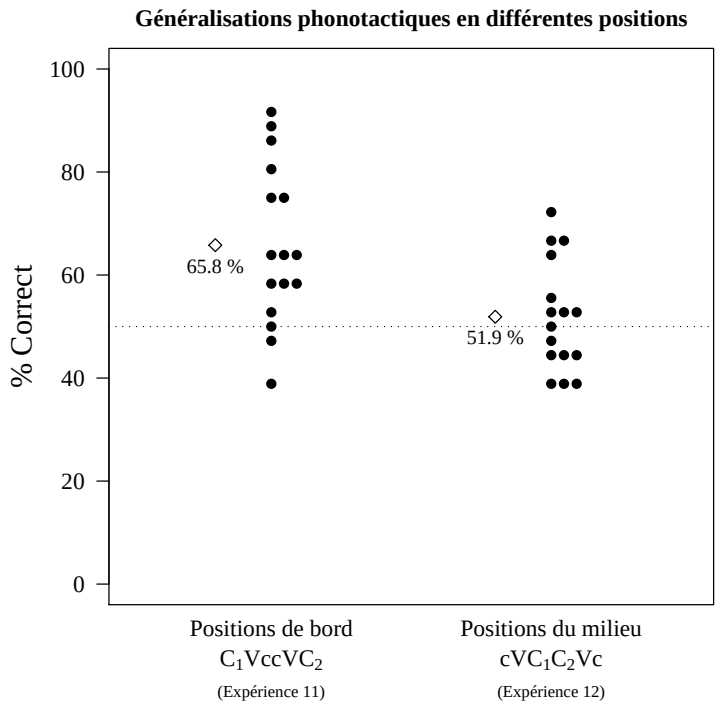


FIG. 8.1 – Résultats des expériences 11 et 12. Les sujets ont appris des contraintes phonotactiques quand les consonnes critiques étaient en position de bord (expérience 11) mais pas quand elles étaient en milieu de mot (expérience 12).

niveau du hasard sauf pour la pire des consonnes[1]. Ceci suggère que — même si les sujets avaient des performances différentes pour différentes consonnes — ils ont appris des contraintes portant sur l'occurrence d'au moins deux consonnes. Les rôles du début de mot et de la fin de mot seront étudiés séparément dans les expériences 13 et 14.

[1]Meilleure consonne : 84.4±14.6%, $t(15) = 9.4$, $p < 1.1 \cdot 10^{-7}$; 'deuxième' consonne : 64.6±18.6%, $t(15) = 3.1$, $p < 0.007$; pire consonne : 48.4±21.1%, $t(15) = -0.3$, $p > 0.7$.

8.3 Expérience 12 : Contraintes phonotactiques en milieu de mot

8.3.1 Matériels et méthodes

L'expérience 12 était identique à l'expérience 11 sauf que les rôles des cadres et des clusters ont été échangés. Les sujets devaient apprendre des con-traintes portant sur les clusters tandis que les cadres étaient irrelevants pour les généralisations. En d'autres termes, ils devaient apprendre des contraintes portant sur les consonnes C_1 et C_2 dans des mots avec la structure *c/a/*C_1C_2*/i/c*. Les tables 8.3 et 8.4 montrent les mots de familiarisation et les paires de test, respectivement.

Sujets

Seize sujets français (six femmes, 10 hommes, âgés de 17 à 25 ans pour un âge moyen de 21.3 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

8.3.2 Résultats et discussion

La figure 8.1 montre que la plupart des sujets n'ont pas généralisé les contraintes phonotactiques aux nouveaux clusters (51.9±10.7%, $t(15) = 0.7$, $p = 0.485$, ns). Il n'y avait pas de différence entre les groupes de sujets ($F(1,14) = 0.5$, $p = 0.493$, ns) non plus. La performance lors de l'expérience 11 était meilleure que celle lors de l'expérience 12 ($F(1,30) = 8.6$, $p < 0.007$).

Tandis que les sujets ont généralisé les contraintes phonotactiques quand les consonnes critiques étaient en PDB, de telles généralisations n'ont pas été observées quand les consonnes critiques étaient en milieu de mot. Ceci pourrait être le résultat d'un problème de traiter les consonnes en milieu de mot ; cette possibilité sera examinée lors de l'expérience 15. Avant de

TAB. 8.3 – Mots de familiarisation utilisés lors de l'expérience 12 en transcription SAMPA.

Groupe 1	Groupe 2
laksiR	laskiR
lakpiR	lastiR
latsiR	laStiR
latSiR	laSfiR
lafSiR	lapkiR
lafpiR	lapfiR
laksin	laskin
lakpin	lastin
latsin	lastin
latSin	laSfin
lafSin	lapkin
lafpin	lapfin
Raksil	Raskil
Rakpil	Rastil
Ratsil	RaStil
RatSil	RaSfil
RafSil	Rapkil
Rafpil	Rapfil
Raksin	Raskin
Rakpin	Rastin
Ratsin	RaStin
RatSin	RaSfin
RafSin	Rapkin
Rafpin	Rapfin
naksil	naskil
nakpil	nastil
natsil	naStil
natSil	naSfil
nafSil	napkil
nafpil	napfil
naksiR	naskiR
nakpiR	nastiR
natsiR	naStiR
natSiR	naSfiR
nafSiR	napkiR
nafpiR	napfiR

TAB. 8.4 – Paires de test utilisées lors de l'expérience 12 en transcription SAMPA.

Mots (groupe 1) Détracteurs (groupe 2)	Détracteurs (groupe 1) Mots (groupe 2)
Rifsal	Risfal
Rifsan	Risfan
RikSal	RiSkal
RikSan	RiSkan
Ritpal	Riptal
Ritpan	Riptan
lifsaR	lisfaR
lifsan	lisfan
likSaR	liSkaR
likSan	liSkan
litpaR	liptaR
litpan	liptan
nifsaR	nisfaR
nifsal	nisfal
nikSaR	niSkaR
nikSal	niSkal
nitpaR	niptaR
nitpal	niptal

passer à cette expérience, j'étudierai le rôle du début de mot et de la fin de mot séparément.

8.4 Expérience 13 : Rôle de la fin de mot

L'expérience 11 a montré que les sujets peuvent apprendre des restrictions portantes sur l'occurrence des consonnes en PDB. Or, plusieurs sujets ont rapporté d'avoir remarqué que certaines consonnes pouvaient arriver en fin de mot. Des analyses post-hoc ont confirmé ces impressions. L'objectif de l'expérience 13 était de répondre à la question de savoir si les sujets étaient sensibles exclusivement aux consonnes finales ou s'ils ont appris également des contraintes portant sur les consonnes initiales.

8.4.1 Matériels et méthodes

L'expérience 13 était comme l'expérience 11 sauf quant à la phase de test ; pendant cette phase, les sujets devaient choisir entre des mots avec des consonnes légales et au début et à la fin, et des mots avec des consonnes légales *seulement* à la fin. Si les sujets faisaient leurs choix exclusivement en fonction de la dernière consonne, ils devraient être au niveau du hasard — puisque toutes les deux alternatives ont des consonnes finales légales et la première consonne devrait être ignorée. Inversement, s'ils prêtaient attention et au début du mot et à la fin du mot, ils devraient préférer les items légaux.

Après une phase de familiarisation comme lors de l'expérience 11, les sujets ont dû choisir entre deux items. Les alternatives correctes étaient les mêmes que lors de l'expérience 11. Les autres alternatives étaient identiques aux choix corrects sauf pour leurs consonnes initiales — qui étaient choisies parmi les consonnes qui devaient apparaître en *fin* de mot. En d'autres termes, les alternatives incorrectes avaient la forme $\mathrm{C}^i_{②}/\mathrm{i/cc/a/C}^j_2$ (à comparer avec les items légaux avec la forme $\mathrm{C}^i_{①}/\mathrm{i/cc/a/C}^j_2$). Si les sujets prêtaient attention exclusivement à la dernière consonne d'un mot, ils devraient être au hasard ; s'ils prêtaient attention également à la première consonne, ils devraient choisir les items légaux. La table 8.5 montre les paires de test.

Sujets

Seize sujets français (12 femmes, quatre hommes, âgés de 18 à 31 ans pour un âge moyen de 20.9 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

TAB. 8.5 – Paires de test utilisées lors de l'expérience 13 en transcription SAMPA.

Groupe 1		Groupe 2	
Mots	Détracteurs	Mots	Détracteurs
fiRlas	SiRlas	SiRlak	fiRlak
fiRlas	piRlas	SiRlak	tiRlak
fiRnas	SiRnas	SiRnak	fiRnak
fiRnas	piRnas	SiRnak	tiRnak
filRas	SilRas	SilRak	filRak
filRas	pilRas	SilRak	tilRak
filnas	Silnas	Silnak	filnak
filnas	pilnas	Silnak	tilnak
finRas	SinRas	SinRak	finRak
finRas	pinRas	SinRak	tinRak
finlas	Sinlas	Sinlak	finlak
finlas	pinlas	Sinlak	tinlak
kiRlaS	piRlaS	piRlat	fiRlat
kiRlaS	siRlaS	piRlat	kiRlat
kiRnaS	piRnaS	piRnat	fiRnat
kiRnaS	siRnaS	piRnat	kiRnat
kilRaS	pilRaS	pilRat	filRat
kilRaS	silRaS	pilRat	kilRat
kilnaS	pilnaS	pilnat	filnat
kilnaS	silnaS	pilnat	kilnat
kinRaS	pinRaS	pinRat	finRat
kinRaS	sinRaS	pinRat	kinRat
kinlaS	pinlaS	pinlat	finlat
kinlaS	sinlaS	pinlat	kinlat
tiRlap	SiRlap	siRlaf	kiRlaf
tiRlap	siRlap	siRlaf	tiRlaf
tiRnap	SiRnap	siRnaf	kiRnaf
tiRnap	siRnap	siRnaf	tiRnaf
tilRap	SilRap	silRaf	kilRaf
tilRap	silRap	silRaf	tilRaf
tilnap	Silnap	silnaf	kilnaf
tilnap	silnap	silnaf	tilnaf
tinRap	SinRap	sinRaf	kinRaf
tinRap	sinRap	sinRaf	tinRaf
tinlap	Sinlap	sinlaf	kinlaf
tinlap	sinlap	sinlaf	tinlaf

8.4.2 Résultats et discussion

La figure 8.2 montre que les sujets n'avaient pas de préférence pour les items légaux (52.3±19.5%, $t(15) = 0.5$, $p = 0.65$, ns). Il n'y avait pas de différence entre les groupes de participants ($F(1,14) = 1.1$, $p = 0.319$, ns).

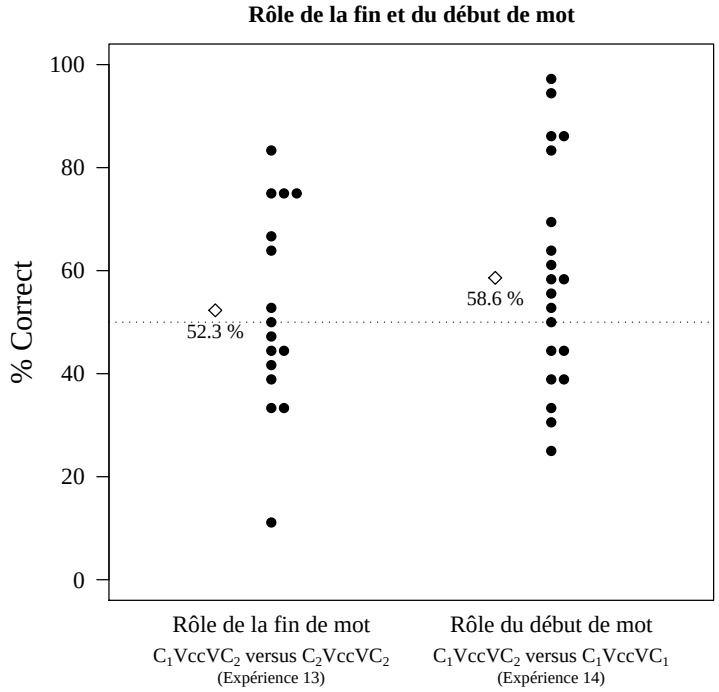


FIG. 8.2 – Résultats des expériences 13 et 14. Lors de l'expérience 13, les sujets devaient choisir entre des mots légaux et des mots avec une consonne *initiale* illégale. S'ils prêtaient attention seulement à la dernière consonne, ils devraient être au niveau du hasard parce qu'ils devraient ne pas remarquer la consonne illégale puisque celle-ci est en position initiale (et devrait donc être ignorée). L'expérience 14 a étudié le rôle du début de mot de la même manière ; les sujets devaient choisir entre des mots légaux et des mots avec une consonne finale illégale. Les sujets avaient une très légère tendance à préférer les mots légaux ; ceci suggère qu'ils ont prêté attention et aux consonnes initiales et aux consonnes finales.

Ces résultats ont deux explications possibles : les sujets auraient pu être au niveau du hasard ou bien parce qu'ils ne prêtaient pas attention à

la consonne initiale ou bien parce que les deux items d'une paire de test étaient trop similaires. Je départagerai ces possibilités en étudiant le rôle du *début* de mot.

8.5 Expérience 14 : Rôle du début de mot

8.5.1 Matériels et méthodes

L'expérience 14 a étudié le rôle du début de mot de la même manière dont l'expérience 13 a étudié le rôle de la fin de mot. La phase de familiarisation ainsi que les choix corrects pendant la phase de test étaient identiques à ceux de l'expérience 11. Les choix alternatifs avaient *uniquement* des consonnes légales initiales ; les consonnes finales étaient choisies parmi les consonnes réservées pour le début de mot. Ces items avaient donc la forme $C_1^i/i/cc/a/C^j_{①}$ (à comparer avec les items légaux de la forme $C_1^i/i/cc/a/C^j_{②}$). Si les sujets prêtaient attention seulement aux consonnes initiales, ils devraient être au hasard ; s'ils prêtaient attention également aux consonnes finales, ils devraient préférer les items légaux. La table 8.6 montre les paires de test.

Sujets

Vingt sujets français (11 femmes, neuf hommes, âgés de 20 à 50 ans pour un âge moyen de 26.6 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

8.5.2 Résultats

La figure 8.2 montre que les sujets avaient tendance à préférer les items légaux même si cette tendance n'était pas significative (58.6±21.6%, $t(19) = 1.8$, $p = 0.0912$, ns). Il n'y avait pas de différence entre les groupes de sujets

TAB. 8.6 – Paires de test utilisées lors de l'expérience 14 en transcription SAMPA.

Groupe 1		Groupe 2	
Mots	Détracteurs	Mots	Détracteurs
kilRaS	kilRaf	SilRak	SilRas
tilRap	tilRaf	pilRat	pilRas
filRas	filRat	silRaf	silRap
kilnaS	kilnaf	Silnak	Silnas
tilnap	tilnaf	pilnat	pilnas
filnas	filnat	silnaf	silnap
kiRlaS	kiRlaf	SiRlak	SiRlas
tiRlap	tiRlaf	piRlat	piRlas
fiRlas	fiRlat	siRlaf	siRlap
kiRnaS	kiRnaf	SiRnak	SiRnas
tiRnap	tiRnaf	piRnat	piRnas
fiRnas	fiRnat	siRnaf	siRnap
kinlaS	kinlaf	Sinlak	Sinlas
tinlap	tinlaf	pinlat	pinlas
finlas	finlat	sinlaf	sinlap
kinRaS	kinRaf	SinRak	SinRas
tinRap	tinRaf	pinRat	pinRas
finRas	finRat	sinRaf	sinRap
kilRaS	kilRat	SilRak	SilRap
tilRap	tilRak	pilRat	pilRaS
filRas	filRak	silRaf	silRaS
kilnaS	kilnat	Silnak	Silnap
tilnap	tilnak	pilnat	pilnaS
filnas	filnak	silnaf	silnaS
kiRlaS	kiRlat	SiRlak	SiRlap
tiRlap	tiRlak	piRlat	piRlaS
fiRlas	fiRlak	siRlaf	siRlaS
kiRnaS	kiRnat	SiRnak	SiRnap
tiRnap	tiRnak	piRnat	piRnaS
fiRnas	fiRnak	siRnaf	siRnaS
kinlaS	kinlat	Sinlak	Sinlap
tinlap	tinlak	pinlat	pinlaS
finlas	finlak	sinlaf	sinlaS
kinRaS	kinRat	SinRak	SinRap
tinRap	tinRak	pinRat	pinRaS
finRas	finRak	sinRaf	sinRaS

($F(1,18) = 0.1$, $p = 0.74$, ns) et le pourcentage de réponses correctes n'était pas différent de celui obtenu lors de l'expérience 13 ($F(1,34) = 0.8$, $p = 0.367$, ns).

8.5.3 Discussion

Les expériences 13 et 14 ont étudié les rôles respectifs du début et de la fin de mot. Lors des deux expériences, les sujets devaient choisir entre (a) des items qui étaient conformes aux patterns phonotactiques avec lesquels ils ont été familiarisés et (b) des items illégaux qui avaient ou bien des consonnes initiales illégales (expérience 13) ou bien des consonnes finales illégales (expérience 14). Si les généralisations lors de l'expérience 11 reposaient exclusivement sur la saillance des consonnes initiales ou finales, les sujets devraient accepter les mots dont la première *ou* la dernière consonne est légale — indépendamment de si l'autre consonne du cadre l'est également, simplement parce que l'autre consonne devrait être ignorée.

Les sujets avaient uniquement une préférence marginale pour les items légaux par rapport aux items avec une consonne *finale* illégale et n'avaient pas de telle préférence par rapport aux items avec une consonne *initiale* illégale. Or, la figure 8.2 montre qu'un sujet de l'expérience 13 (où les choix alternatifs avaient une consonne *initiale* illégale) déviait de plus de deux déviations standard de la moyenne ; en excluant ce sujet, on obtient une préférence de 55.0% pour les items légaux. Les sujets avaient donc une tendance à préférer les items légaux et lors de l'expérience 13 et lors de l'expérience 14 ; ceci suggère qu'ils ont prêté attention et aux consonnes initiales et aux consonnes finales même si déjà la présence d'une consonne légale initiale ou finale semble être suffisante pour empêcher une préférence forte pour les items légaux.

8.6 Expérience 15 : Traitement des consonnes en milieu de mot

Lors de l'expérience 12, les sujets n'ont pas généralisé les contraintes phonotactiques quand les consonnes cruciales étaient en milieu de mot. Dans la présente expérience, je me suis demandé si ces difficultés résultaient de problèmes de traiter les consonnes en milieu de mot ou si ces difficultés étaient spécifiques au processus calculant les contraintes phonotactiques elles-mêmes. En d'autres termes, les difficultés de généraliser les contraintes médiales pourraient être le résultat ou bien des limitations des représentations symboliques sous-jacentes ou bien de simples difficultés de percevoir et traiter les consonnes en milieu de mot.

Pour trancher entre ces alternatives, les sujets devaient *discriminer* les mêmes mots que pendant l'expérience 12 ; ils devaient donc faire les mêmes distinctions que lors de l'expérience 12 mais sans la nécessité de généraliser les contraintes phonotactiques. Si les difficultés de généraliser les contraintes étaient la conséquence de difficultés de traiter les consonnes en milieu de mot, les sujets devraient avoir les même difficultés pour discriminer les mots que pour généraliser leur structure. Inversement, si les difficultés observées lors de l'expérience 12 étaient le résultat des limitations intrinsèques des processus calculant les généralisations, aucun problème pour discriminer les mots ne devrait être observé.

8.6.1 Matériels et méthodes

Sujets

Seize sujets français (10 femmes, six hommes, âgés de 18 à 35 ans pour un âge moyen de 22.2 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

Familiarisation

La familiarisation était la même que pendant l'expérience 12 ; les sujets entendaient passivement les mots exemples.

Test

Les sujets ont été informés qu'ils entendraient des paires de mots martiens et que les mots d'une paire pouvaient être les mêmes ou différents. Ils devaient décider si les mots d'une paire étaient identiques ou différents. Les paires de test ont été construites de la manière suivante. Les items légaux de la phase de test de l'expérience 12 ont été présentés deux fois, une fois avec eux-mêmes (pour les essais 'identiques') et une fois avec les items illégaux avec lesquels ils ont été présentés pendant la phase de test de l'expérience 12 (pour les essais 'différents'). Les paires ont été présentées en ordre aléatoire.

8.6.2 Résultats et discussion

La figure 8.3 montre que les sujets ont discriminé les mots parfaitement bien (95.1±4.8%, $t(15) = 37.5$, $p = 3.02 \cdot 10^{-16}$) ; il n'y avait pas de différence entre les groupes de sujets ($F(1,14) = 0.7$, $p = 0.405$, ns). Ceci suggère que les difficultés observées lors de l'expérience 12 n'étaient pas le résultat d'un problème pour traiter les consonnes en milieu de mot ; il s'agit de difficultés intrinsèques des processus qui généralisent les contraintes phonotactiques.

8.7 Expérience 16 : Contraintes médiales avec classes naturelles

Lors des expériences précédentes, s_1 et s_2 étaient des classes de consonnes arbitraires qui ne jouent aucun rôle dans les langues naturelles. Il est donc concevable que les sujets pourraient apprendre facilement les contraintes

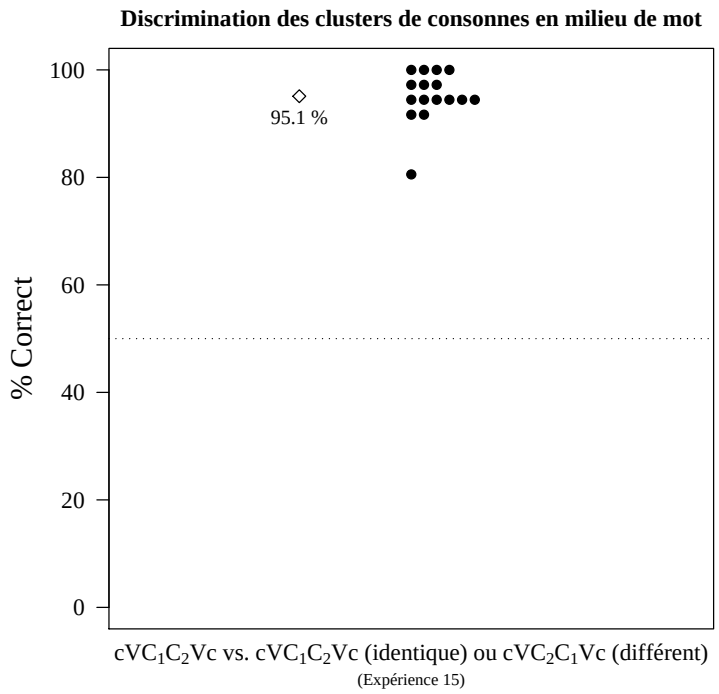


FIG. 8.3 – Résultats de l'expérience 15. Les sujets peuvent discriminer parfaitement bien des mots qui diffèrent seulement en leur cluster de consonnes médial.

phonotactiques en milieu de mot quand des classes naturelles de consonnes sont utilisées au lieu des classes arbitraires utilisées dans les autres expériences. Cette possibilité sera étudiée lors de l'expérience 16.

8.7.1 Matériels et méthodes

L'expérience 16 était identique à l'expérience 12 à l'exception des classes de consonnes que les sujets avaient à apprendre. Au lieu des classes arbitraires {k, t, f} et {s, ʃ, p}, j'ai utilisé une classe d'occlusifs {k, t, p} et une de fricatifs {s, ʃ, f}. Tous les clusters qui peuvent être générés avec ces classes sont légaux en français dans les deux directions et ne subissent pas d'assimilation de voisement. J'ai réservé les clusters /kʃ/, /tf/ et /ps/ (ainsi que leurs inversions) pour la phase de test. Les tables 8.7 et 8.8 montrent les mots de familiarisation et les paires de test, respectivement.

TAB. 8.7 – Mots de familiarisation utilisées lors de l'expérience 16 en transcription SAMPA.

Groupe 1	Groupe 2
laksiR	laskiR
lakfiR	lastiR
latsiR	laStiR
latSiR	laSpiR
lapSiR	lafkiR
lapfiR	lafpiR
laksin	laskin
lakfin	lastin
latsin	lastin
latSin	laSpin
lapSin	lafkin
lapfin	lafpin
Raksil	Raskil
Rakfil	Rastil
Ratsil	RaStil
RatSil	RaSpil
RapSil	Rafkil
Rapfil	Rafpil
Raksin	Raskin
Rakfin	Rastin
Ratsin	RaStin
RatSin	RaSpin
RapSin	Rafkin
Rapfin	Rafpin
naksil	naskil
nakfil	nastil
natsil	naStil
natSil	naSpil
napSil	nafkil
napfil	nafpil
naksiR	naskiR
nakfiR	nastiR
natsiR	naStiR
natSiR	naSpiR
napSiR	nafkiR
napfiR	nafpiR

TAB. 8.8 – Paires de test utilisées lors de l'expérience 16 en transcription SAMPA.

Mots (groupe 1) Détracteurs (groupe 2)	Détracteurs (groupe 1) Mots (groupe 2)
likSaR	liSkaR
litfaR	liftaR
lipsaR	lispaR
likSan	liSkan
litfan	liftan
lipsan	lispan
RikSal	RiSkal
Ritfal	Riftal
Ripsal	Rispal
RikSan	RiSkan
Ritfan	Riftan
Ripsan	Rispan
nikSal	niSkal
nitfal	niftal
nipsal	nispal
nikSaR	niSkaR
nitfaR	niftaR
nipsaR	nispaR

Sujets

Seize sujets français (huit femmes, huit hommes, âgés de 18 à 34 ans pour un âge moyen de 24.5 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

8.7.2 Résultats

La figure 8.4 montre que les sujets ont généralisé les contraintes phonotactiques aux nouveaux clusters (61.1±17.2%, $t(15) = 2.6$, $p = 0.021$). Il n'y avait pas de différence entre les groupes de sujets ($F(1,14) = 1.1$, $p = 0.309$). Le taux de réponses correctes lors de l'expérience 16 n'était pas différent

de celui lors de l'expérience 11 ($F(1,30) = 0.7$, $p = 0.426$) ; les sujets de l'expérience 16 avaient tendance à être meilleurs que ceux de l'expérience 12, mais cette tendance n'était pas significative ($F(1,30) = 3.3$, $p = 0.0785$).

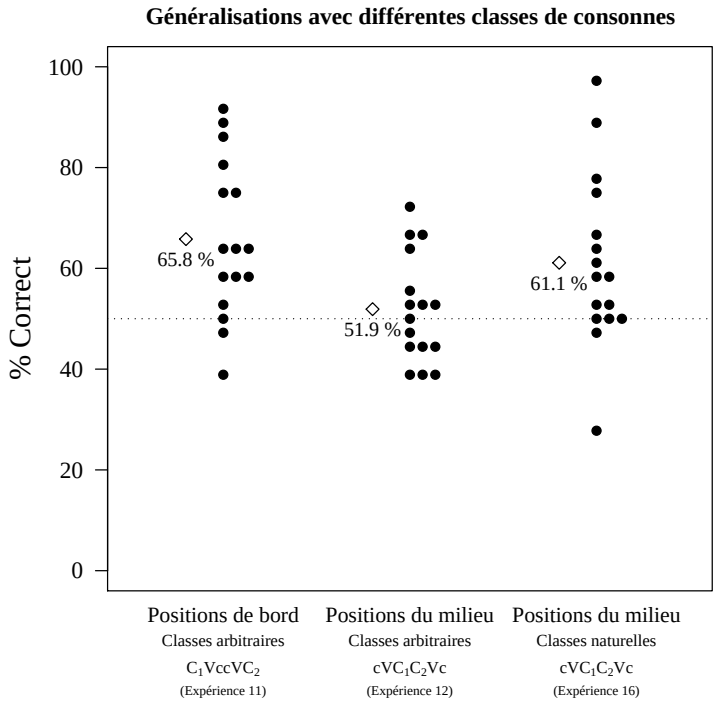


FIG. 8.4 – Résultats des expériences 11, 12 et 16. Quand des classes arbitraires de consonnes ont été utilisées, les sujets ont généralisé les contraintes phonotactiques seulement quand les consonnes critiques étaient en PDB (expérience 11) mais pas quand elles étaient en milieu de mot (expérience 12). Quand des classes naturelles de consonnes ont été utilisées, les sujets ont généralisé ces contraintes également en milieu de mot (expérience 16).

8.7.3 Discussion

Lors de l'expérience 16, et à l'inverse de l'expérience 12, les sujets ont généralisé les régularités phonotactiques également quand les consonnes cruciales étaient en milieu de mot. Ceci confirme que des difficultés psychophysiques ou attentionnels ne peuvent pas expliquer les échecs de l'ex-

périence 12.

La différence cruciale entre les expériences 12 et 16 — l'utilisation des *classes naturelles* de consonnes au lieu des classes arbitraires — pourrait avoir engendré deux types de traitement fondamentalement différents. Lors des expériences 11 et 12, les sujets devaient apprendre que les consonnes C_1 et C_2 étaient des *variables positionnelles* dont les valeurs devaient être des membres de deux classes de consonnes distinctes. La nature de telles généralisations peut être illustrée avec une analogie provenant de la syntaxe. Les locuteurs d'une langue savent que le slot de 'sujet' d'une phrase peut être rempli par un membre arbitraire de la classes des noms ; cette connaissance est indépendante de la co-occurrence de mots particuliers car les locuteurs savent qu'également des combinaisons très rares de mots comme « colorless green ideas sleep furiously » peuvent être grammaticales. Il y a donc une représentation par exemple du slot de 'sujet' qui est *indépendante* des mots qui le remplissent.

De la même manière, les sujets n'auraient pas pu apprendre les régularités des expériences 11 et 12 simplement en observant l'ordre des consonnes dans les cadres ou les clusters — car tous les items de test ont utilisé de *nouveaux* clusters (ou cadres pour l'expérience 11) qui n'ont pas été rencontrés lors de la phase de familiarisation. En d'autres termes, de telles régularités positionnelles peuvent être apprises seulement en considérant les positions comme des variables — et donc en utilisant un mécanisme symbolique ; les associations comme les probabilités de transition ne peuvent pas expliquer de telles généralisations car les sujets ont été testés avec de *nouveaux* clusters.

Lors de l'expérience 16, par contre, les sujets auraient pu généraliser les contraintes simplement en observant la co-occurrence d'items particuliers — mais dans ce cas les items critiques seraient les *classes naturelles* auxquelles les consonnes appartiennent ou leurs traits phonétiques et non pas les consonnes elles-mêmes. Tout ce que les sujets auraient dû

apprendre était l'ordre relatif des traits [+fricatif] et [+occlusif] ; ceci pourrait être accompli par des associations directionnelles pour lesquelles il y a de nombreuses démonstrations expérimentales (voir par exemple Bonatti, Peña, Nespor & Mehler, 2005; Ebbinghaus, 1885/1913; Fiser & Aslin, 2001, 2002a, 2002b; Hauser et al., 2001; Hunt & Aslin, 2001; Newport & Aslin, 2004; Newport et al., 2004; Peña et al., 2002; Saffran, Newport & Aslin, 1996; Saffran, Aslin & Newport, 1996; Saffran et al., 1999). Alternativement, un cluster [+fricatif][+occlusif] pourrait être plus *similaire* à un autre cluster [+fricatif][+occlusif] qu'à un cluster [+occlusif][+fricatif] ; par conséquent, les sujets auraient pu généraliser les contraintes phonotactiques en calculant la similarité entre les items de test et les items de familiarisation — parce qu'un item de chaque paire de test était toujours plus similaire aux items de familiarisation que l'autre. Inversement, de tels calculs de similarité n'auraient pas permis aux sujets des expériences 11 et 12 de généraliser les contraintes. Ceci suggère qu'alors que les sujets des expériences 11 et 12 devaient apprendre des régularités faisant appel à des variables positionnelles, les sujets de l'expérience 16 ont appris des associations entre des traits phonétiques ou ont utilisé des calculs de similarité.

8.8 Discussion Intermédiaire

La série d'expériences présentée dans cette partie avait comme objectif d'étudier les mécanismes psychologiques d'une opération symbolique dans un cas qui pourrait avoir un rapport avec le langage. Auparavant, j'ai étudié des structures avec répétitions pour montrer qu'elles sont généralisées par une 'primitive perceptive', une opération symbolique spécialisée et fortement sensible aux facteurs perceptifs. Or, si les primitives perceptives fonctionnent comme une boîte à outils computationnelle de l'esprit, on doit pouvoir trouver d'autres primitives qui ne font pas appel aux répétitions. Comme première étude de cas pour des généralisations qui pourraient avoir un rapport avec le langage, j'ai étudié la généralisation des contraintes phonotactiques. Le point de départ de ces expériences

était l'observation de Onishi et al. (2002) et Chambers et al. (2003) que de telles régularités peuvent être apprises après des expositions très courtes. Je me suis interrogé sur la généralité de telles généralisations et leurs mécanismes psychologiques sous-jacents ; en particulier, je me suis demandé si toutes les positions des phonèmes agissent comme des variables ou si c'est uniquement le cas des PDBs.

Les sujets devaient apprendre que les consonnes C_1 et C_2 devaient être des membres de deux classes de consonnes distinctes. Ils ont appris de telles régularités pour les mots de la forme C_1VccVC_2 mais pas pour les mots de la forme cVC_1C_2Vc. Ce-dernier échec ne peut pas être attribué à des difficultés psychophysiques pour traiter les phonèmes en position médiale (i) car les sujets peuvent *discriminer* parfaitement bien des mots qui diffèrent seulement en leurs consonnes médiales et (ii) parce qu'ils peuvent généraliser de telles contraintes quand des classes naturelles de consonnes sont utilisées au lieu des classes arbitraires ; cet échec semble donc être une propriété intrinsèque des processus symboliques qui calculent les généralisations.

8.8.1 Les PDBs sont-elles des représentations symboliques ?

Conformément à l'objectif de cette thèse, à savoir d'étudier les mécanismes psychologiques de la manipulation des symboles, on doit se demander si les généralisations que j'ai observées (au moins en PDB) reposent effectivement sur un mécanisme symbolique ou si elles pourraient être expliquées par un mécanisme purement associationniste. Les résultats présentés dans ce chapitre suggèrent en effet que les associations entre phonèmes ne peuvent pas expliquer les généralisations de l'expérience 11 — puisque les sujets devaient toujours choisir entre des items dont les consonnes critiques ne sont jamais apparues ensemble. De plus, l'ordre des voyelles a été inversé entre la phase de familiarisation et la phase de test et j'ai contrebalancé le matériel des stimuli de sorte que de l'expérience antérieure des sujets (par exemple les propriétés statistiques de la langue maternelle des

sujets) ne puisse pas expliquer ces résultats.

Or, comme nous l'avons vu à plusieurs reprises, faire appel à la 'nouveauté' d'un item de test dépend d'hypothèses représentationnelles particulières. Ceci peut être illustré avec l'expérience de Marcus et al. (1999). Ces auteurs ont proposé que la capacité des enfants de généraliser les structures avec répétitions résulte d'un mécanisme symbolique parce que les syllabes implémentant les structures pendant la phase de habituation et lors de la phase de test ne chevauchaient pas dans leurs traits phonétiques — de sorte que les items de test soient 'nouveaux'. Or, de tels arguments sont problématiques parce que le format de représentation de l'esprit n'est pas connu, et on ne sait donc pas si les items de test étaient effectivement 'nouveaux' dans ce format ; alors qu'il est certainement vrai que la plupart des théories linguistiques postulent ce type de traits, même la réalité psychologique des phonèmes est encore discutée. Par conséquent, si les hypothèses représentationnelles de Marcus et al. (1999) n'étaient pas correctes, leurs arguments seraient invalides (voir également Altmann, 2002; McClelland & Plaut, 1999 pour des observations similaires). Des arguments faisant appel à la 'nouveauté' d'un item sont donc problématiques et requièrent des vérifications des hypothèses sous-jacentes.

Deux observations rendent improbable que ma conclusion que les PDBs agissent comme des variables dépend de telles hypothèses représentationnelles. Premièrement, les sujets ont généralisé les contraintes avec les classes arbitraires de consonnes quand les consonnes critiques étaient en PDB mais pas en milieu de mot. Pour les mécanismes associationnistes, par contre, généraliser revient à traiter des phonèmes particuliers puisque de tels mécanismes n'ont pas de représentations explicites des structures ; des difficultés pour les généralisations devraient donc refléter des difficultés de traiter les phonèmes en milieu de mot. Comme je n'ai pas trouvé d'évidence pour des difficultés de traiter les consonnes en milieu de mot, un mécanisme associationniste devrait généraliser les contraintes en milieu de mot s'il peut les généraliser en PDB. Par conséquent, à moins qu'il

soit équipé d'une opération qui traite spécifiquement les PDBs, un tel mécanisme fait les mêmes prédictions qu'un mécanisme symbolique général à savoir que toutes les positions devraient être traitées uniformément bien.

Deuxièmement, quand j'ai utilisé des classes naturelles des consonnes de sorte que les représentations des phonèmes chevauchaient probablement, les sujets ont pu généraliser également les contraintes en milieu de mot ; ceci suggère que les représentations des phonèmes des classes arbitraires ne permettaient pas à un mécanisme associationniste de généraliser les contraintes. Par conséquent, au moins les PDBs fonctionnent comme des variables positionnelles quantifiées sur des classes de consonnes distinctes. Les PDBs pourraient être les seules positions qui fonctionnent véritablement comme des variables parce qu'elles sont faciles à identifier — étant les seules positions avant ou après desquelles il n'y a 'rien'. Toutes les autres positions pourraient être plus difficiles à identifier, au moins dans les mots plus longs car elles pourraient être définies par rapport aux PDBs comme points de repère — ou bien en 'comptant' (ou en estimant de manière analogique) les positions ou bien par des associations 'retardées'.

Les résultats rapportés dans ce chapitre permettent également de clarifier une ambiguïté qui s'est produite pour l'interprétation des expériences 4 à 10. J'ai montré que les sujets généralisent facilement la structure ABCDE*FF* mais pas la structure ABC*DD*EF. Si l'on fait appel à une distinction entre les *variables* et les *opérations* (voir par exemple Fodor, 1975; Marcus, 2001; Pylyshyn, 1984), ces résultats sont compatibles avec deux interprétations légèrement différentes. D'un coté, seule la primitive détectant les répétitions pourrait être contrainte par les facteurs perceptifs alors que les représentations des variables sur lesquelles cette primitive opère pourraient être générales comme dans un ordinateur ; d'autre coté, les variables pourraient être contraintes par les facteurs perceptifs aussi bien que la primitive. Cette ambiguïté ne se présente pas pour les expériences rapportées dans ce chapitre — car les représentations symboliques que j'ai étudiées sont des séquences de variables. Comme ces variables sont contraintes par

les facteurs perceptifs, il est plausible qu'également les représentations des variables dans les expériences avec les structures avec répétitions ne soient pas générales comme dans un ordinateur et que soient contraintes par des facteurs perceptifs et la primitive détectant les répétitions et les représentations des variables.

8.8.2 Processus symboliques ou associationnistes en milieu de mot ?

Alors que les sujets n'ont pas généralisé les contraintes phonotactiques en milieu de mot quand les contraintes étaient construites à partir des classes de consonnes arbitraires, ils les ont généralisées avec des classes naturelles. Ce-dernier résultat, implique-t-il qu'également les positions en milieu de mot peuvent fonctionner comme variables positionnelles ? Bien que je ne puisse pas exclure cette interprétation définitivement, elle n'est pas nécessaire. En effet, lors de l'expérience utilisant les classes naturelles, les sujets auraient pu apprendre l'ordre relatif des traits phonétiques ou calculer la similarité entre les clusters dans les mots de la phase de familiarisation et de la phase de test. Ceci suggère que les généralisations avec les classes naturelles ne requièrent pas de calculs symboliques faisant appel à des variables mais que des opérations associationnistes seraient suffisantes ; de telles opérations pourraient être moins sensibles aux contraintes perceptives que les représentations symboliques que j'ai étudiées dans ce chapitre.

8.8.3 Une autre primitive perceptive ?

Les considérations précédentes suggèrent que les items en PDBs sont traités par une opération symbolique ; puisqu'elle résulte probablement des propriétés du système perceptif, elle est de toute vraisemblance une opération spécialisée traitant seulement les PDBs. Je propose donc qu'elle fait partie du répertoire des primitives perceptives. Tout de même, de la même manière qu'une machine de Turing est construite de composants

très simples, l'interaction de nombreuses mais simples primitives perceptives pourrait avoir comme résultat un système computationnel puissant. Une primitive qui est sensible aux PDBs d'un mot serait de toute évidence utile pour l'affixation en morphologie inflexionnelle, et l'on peut considérer mes résultats comme la première démonstration expérimentale directe d'une opération symbolique qui pourrait supporter l'affixation. Il est donc possible que les primitives perceptives puissent être utiles pour le langage, mais il est clair qu'il faut chercher encore d'autres cas d'études avant d'arriver à une conclusion définitive. L'objectif de la dernière série d'expériences sera de commencer à étudier cette question.

Chapitre 9

Extraction de classes de syllabes d'un flux de parole continu

Ce chapitre a comme objectif de déterminer si les sujets peuvent extraire une régularité faisant appel à des *classes de syllabes* d'un flux de parole perceptivement continu. Le point de départ était les travaux de Peña et al. (2002) suggérant que la méthode de l'apprentissage des langues artificielles peut être utilisée pour étudier à la fois des processus associationnistes et non-associationnistes.

Comme on verra dans le chapitre suivants, les résultats de Peña et al. (2002) fournissent un autre exemple de l'influence des facteurs perceptifs sur des généralisations. Or, avant de pouvoir mesurer ces effets, il faut d'abord clarifier comment les expériences de Peña et al. (2002) doivent être interprétées. Ces clarifications sont l'objectif du présent chapitre. Comme les expériences qui seront présentées ci-après sont très différentes des autres expériences présentées dans cette thèse, je les résumerai avant de les décrire en détail pour que le lecteur puisse sauter directement au chapitre suivant s'il le souhaite.

Comme on l'a vu dans l'introduction, Peña et al. (2002) ont familiarisé des adultes avec des séquences de syllabes composées d'une concaténa-

tion de pseudo-mots trisyllabiques. Dans chaque mot, la première syllabe prédisait la dernière avec certitude, tandis que la syllabe au milieu était variable ; les mots avaient donc la forme A_iXC_i. La langue artificielle utilisée par Peña et al. (2002) comportait trois familles de mots caractérisées par des combinaisons différentes entre les syllabes A et C. Ils ont utilisé trois syllabes X variables dans la position au milieu, résultant en neuf mots au total.

Les sujets pouvaient utiliser les TPs entre la première et la dernière syllabe d'un mot pour *segmenter* les séquences de parole (c'est-à-dire pour extraire les mots) mais pas pour *généraliser* la dépendance entre la première et la dernière syllabe d'un mot — bien que ces TPs soient en principe suffisantes pour ces généralisations. Même quand les sujets ont été exposés à une séquence de parole continue pour 30 minutes, ils n'ont pas seulement échoué de généraliser la dépendance, mais ils ont même choisi l'alternative statistiquement favorisée. Les sujets ont réussi de généraliser la dépendance entre les premières et les dernières syllabes des mots seulement quand les mots étaient séparés par des silences ; pour cela, des silences subliminaux étaient suffisants. Sous ces conditions, déjà une familiarisation de seulement deux minutes pouvait induire les généralisations. Il semble donc que les indices de segmentation subliminaux étaient nécessaires et suffisants pour les généralisations et que les sujets ont appris une dépendance de la forme « si la première syllabe est /pu/, la dernière syllabe est /ki/ » (les *règles* A_iC_i).

Alternativement aux règles A_iC_i, les sujets auraient pu apprendre que des membres de deux classes de syllabes distinctes devaient apparaître en des positions différentes (la *règle des classes*). Au lieu d'apprendre les règles A_iC_i, les sujets pourraient avoir appris que la première et la dernière syllabe d'un mot sont des variables qui prennent leurs valeurs de deux classes distinctes. Ces classes consistent en les syllabes qui peuvent apparaître en première et en dernière position. Les sujets auraient pu apprendre ces classes de syllabes et que leurs membres doivent apparaître

en des positions différentes, par exemple que A $\in$ {pu, be, ta} ; ils auraient pu traiter les mots avec la structure A_iXC_i comme exemples particuliers d'items conformes à cette régularité.

Si les sujets ont effectivement appris la règle des classes, on peut se poser la même question que lors des expériences sur les régularités phonotactiques : comme les positions qui fonctionnent comme des variables sont précisément la première et la dernière PDB des mots, on peut se demander si de telles généralisations sont limitées aux PDBs. J'étudierai cette question ainsi que les limitations perceptives des calculs des TPs dans le chapitre suivant.

9.1 Les expériences

Dans toutes les expériences rapportées dans ce chapitre, les sujets ont été familiarisés avec des flux de parole consistant en les mêmes pseudo-mots que lors de l'expérience de Peña et al. (2002). Les expériences 17 et 18 ont étudié la question de savoir si les sujets ont extrait la règles des classes. Après la familiarisation, les sujets devaient décider lequel de deux items trisyllabiques était plus susceptible d'être apparu dans le flux de familiarisation. Ils devaient choisir entre un *mot de classe* et un *mot partiel*. La première et la dernière syllabe d'un mot de classe sont apparues dans ces positions respectives — mais jamais dans le même mot ; de plus, la syllabe au milieu n'a jamais été rencontrée dans cette position mais toujours en début ou en fin de mot. Les mots de classe avaient donc la forme $A_iX'C_j$; ils respectaient la règle des classes (puisque les syllabes A et C apparaissaient en position initiale et finale, respectivement) mais ne sont pas apparus dans le flux. L'autre alternative, les mots partiels, est apparue dans les flux de familiarisation mais coupait une frontière de mot[1] et

[1]Si deux mots consécutifs dans le flux de familiarisation étaient par exemple $A_iX^{\mu}C_iA_jX^{\nu}C_j$, on peut en former les mots partiels $X^{\mu}C_iA_j$ (un 'mot partiel de type 21' car il comprend deux syllabes du premier mot et une syllabe du deuxième mot) ou $C_iA_jX^{\nu}$ (un 'mot partiel de type 12').

ne respectait donc pas la règle des classes. Si les généralisations observées par Peña et al. (2002) reposaient sur la règle des classes et non pas sur les règles A_iC_i, les sujets devraient généraliser la règle des classes quand ils sont familiarisés avec un flux où les mots sont séparés par des silences (subliminaux) de 25 ms mais pas quand ils sont familiarisés avec un flux continu ; ils devraient donc préférer les mots de classe aux mots partiels après une familiarisation avec un flux 'segmenté' (expérience 17) mais pas après une familiarisation avec un flux continu (expérience 18). C'est précisément le résultat que j'ai obtenu. Après une familiarisation avec un flux segmenté, les sujets ont préféré les mots de classe aux mots partiels ; ils ont donc appris que la première et la dernière syllabe d'un mot devaient appartenir à des classes distinctes. Après une familiarisation avec un flux continu, par contre, les sujets étaient au hasard. Par conséquent, les généralisations de Peña et al. (2002) ne reposaient pas sur une dépendance entre des syllabes particulières (par exemple entre /pu/ comme première syllabe est /ki/ comme dernière syllabe) mais sur la règle des classes.

Les expériences 19 et 20 ont étudié un aspect des prédictions des mécanismes associationnistes et symboliques des généralisations en contrastant les prédictions des deux modèles suivants. D'un coté, les généralisations pourraient être le résultat d'un mécanisme statistique ; d'autre coté, il est possible que des mécanismes *distincts* sont responsables pour l'analyse de la distribution des syllabes et pour l'extraction des généralisations. D'abord, il convient de noter qu'il est improbable qu'un mécanisme associationniste puisse expliquer des généralisations faisant appel à des classes — car un tel mécanisme n'est sensible qu'aux (co-) occurrences des syllabes particulières, par exemple en calculant les TPs ; il dépend donc de la possibilité 'd'échantillonner' les flux auxquels il est exposé. Un mécanisme non-associationniste, par contre, pourrait avoir besoin seulement de peu d'exposition pour projeter des généralisations concernant la structure sous-jacente du flux. L'hypothèse qu'un mécanisme non-associationniste est responsable des généralisations fait donc la prédiction suivante. Quand les sujets sont familiarisés avec des flux segmentés comme lors des ex-

périences de Peña et al. (2002), la préférence pour les items respectant la règle des classes (c'est-à-dire les mots de classe) par rapport aux items rencontrés lors de la familiarisation mais pas respectant la règle des classes (c'est-à-dire les mots partiels) devrait être plus prononcée après des familiarisations *courtes* qu'après des familiarisations longues. La raison en est que la règle des classes devrait être extraite rapidement, après quoi la familiarité avec cette règle (et donc avec les mots de classe) devrait croître seulement de manière minimale. Par contre, les représentations en mémoire des (sous-)séquences de parole que les sujets ont effectivement rencontrées devraient être renforcées pour des flux plus longs — même si ces séquences traversent des frontières de mot comme les mots partiels[2]. Par conséquent, si la familiarité avec les mots de classe est maximale relativement rapidement et change relativement peu après alors que la familiarité avec les mots partiels augmente avec le temps, la préférence pour les mots de classe par rapport aux mots partiels devrait *décroître* avec le temps — car les représentations en mémoire des mots partiels (et donc des choix alternatifs) continuent d'être renforcées tandis que celles des mots de classe pourraient ne pas changer. Par corollaire, les mots de classe devraient être préférés aux mots partiels après une familiarisation avec des flux segmentés courts mais pas avec des flux longs. J'ai évalué ces prédictions en familiarisant les sujets avec des flux segmentés de différentes durées, anticipant que la préférence pour les mots de classe devrait décroître pour les familiarisations longues. Lors des expériences 19 et 20, j'ai familiarisé les sujets avec des flux segmentés de 30 et de deux minutes, respectivement, anticipant que les sujets préféreraient les mots de classe après la familiarisation avec le flux court mais pas avec le flux long. L'expérience 21 était une réplication de l'expérience 20. Les résultats ont confirmé les prédictions du modèle incorporant un mécanisme non-associationniste en plus d'un mécanisme statistique : la préférence pour les mots de classe était plus prononcée après des familiarisations courtes qu'après des familiari-

[2]En effet, Peña et al. (2002) ont montré que les mots partiels sont préférés après des familiarisations avec de longs flux continus ; ceci suggère que les représentations en mémoire des mots partiels ont été renforcées au cours du temps.

sations longues.

L'expérience 22 était une expérience contrôle. Avec cette expérience, je me suis demandé si les sujets prêtaient attention et à la première et à la dernière syllabe d'un mot et non pas seulement à une des deux afin d'extraire la règle des classes. Les résultats suggèrent qu'ils prêtaient attention et à la première et à la dernière syllabe.

Avec les expériences 23 à 25, j'ai étudié la relation entre les règles A_iC_i et la règle des classes. Il convient d'abord de noter que les items respectant les règles A_iC_i respectent automatiquement aussi la règle des classes ; en effet, les règles A_iC_i sont des exemplaires particuliers de la règle des classes — qui sont particulièrement fréquents puisqu'ils sont les *seuls* exemplaires rencontrés lors de la familiarisation (on se rappellera que les syllabes A et C dans un mot de classe appartiennent à deux familles différentes). Or, en principe, les règles A_iC_i pourraient être des règles autonomes qui sont indépendantes de la règle des classes. Ces deux possibilités peuvent être départagées en demandant aux sujets de choisir entre deux types d'items, à savoir entre les mots de règle et les mots de classe. Un mot de règle est comme un mot de classe sauf qu'il respecte une règle A_iC_i en plus de la règle des classes ; il a donc la forme $A_iX'C_i$ (à comparer avec les mots de classe de la forme $A_iX'C_j$). La différence entre les mots de règle et les mots de classe est donc que les syllabes A et C appartiennent à la même famille dans les mots de règle tandis qu'elles appartiennent à des familles différentes dans les mots de classe. Cette différence a deux implications. D'abord, les mots de règle obéissent à une règle A_iC_i en plus de la règle des classes alors que les mots de classe n'obéissent qu'à la règle des classes. Deuxièmement, la TP entre la première et la dernière syllabe est 1.0 dans les mots de règle et 0.0 dans les mots de classe.

Si les règles A_iC_i étaient des règles autonomes, les sujets devraient préférer les mots de règle aux mots de classe seulement après une familiarisation avec un flux segmenté — car les expériences de Peña et al. (2002)

(ainsi que les expériences qui seront présentés dans ce chapitre) montrent que les généralisations ne peuvent être extraites qu'à partir d'un flux segmenté. Par contre, si les règles A_iC_i étaient simplement des exemplaires fréquentes de la règle des classes ou si les mots de règle étaient préférés aux mots de classe parce que leur TP entre la première et la dernière syllabe était plus élevée (qui est 1.0 dans les mots de règle et 0.0 dans les mots de classe), les sujets devraient préférer les mots de règle également après une familiarisation avec un flux continu ; un tel résultat confirmerait également que les sujets peuvent extraire des TPs entre des syllabes non-adjacentes puisque c'est la seule différence entre les mots de règle et les mots de classe. Les sujets ont préféré les mots de règle aux mots de classe aussi bien après des familiarisations avec des flux segmentés qu'après des familiarisations avec des flux continus. Par conséquent, les mots de règle sont préférés aux mots de classe à cause de la TP entre la première et la dernière syllabe, et non pas parce que les règles A_iC_i serait des règles autonomes. Les généralisations observées par Peña et al. (2002) reposaient donc sur l'extraction de la règle des classes et non pas sur les règles A_iC_i.

Dans la suite, j'ai montré avec une expérience contrôle, des considérations relativement formelles et des simulations extensives avec des réseaux de neurones que des modèles purement associationnistes ne peuvent pas expliquer la préférence pour les mots de classe.

En conclusion, les sujets apprennent après une familiarisation avec un flux segmenté que la première et la dernière syllabe d'un mot doivent être appartenir à des classes de syllabes distinctes. Ces généralisations sont rapides et ne peuvent pas être expliquées par des modèles purement associationnistes. En même temps que les généralisations, les sujets peuvent extraire des TPs entre des syllabes non-adjacentes. Il y a donc deux processus analysant les flux de parole, à savoir un processus non-associationniste rapide pour extraire les généralisations (quand les flux sont segmentés), et un processus associationniste plus lent qui analyse la distribution des syllabes (pour les flux segmentés et continus). Le chapitre suivant étudiera le

mécanisme psychologique du premier de ces processus. Dans la suite, je donnerai les détails des expériences du présent chapitre, mais il est possible de passer directement au chapitre suivant.

9.2 Extraction d'une dépendance entre des classes de syllabes

Les expériences 17 et 18 ont étudié la question de savoir si les sujets acceptent les mots de classe après une exposition à un flux subliminalement segmenté (expérience 17) ou continu (expérience 18). Les sujets devraient accepter les mots de classe uniquement s'ils ont extrait la règle des classes.

9.2.1 Expérience 17 : Extraction de classes après une familiarisation avec un flux segmenté

Matériels et méthodes

Sujets. Vingts sujets italiens (11 femmes, neuf hommes, âgés de 21 à 29 ans pour un âge moyen de 23.3 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

Appareils. Les données présentées dans ce chapitre on été collectées avec un ordinateur Pentium utilisant le langage de programmation EXPE (Pallier et al., 1997). Les sujets ont été testés individuellement dans une pièce tranquille. Les stimuli ont été présentés avec des casques.

Matériels. Les stimuli ont été synthétisés avec le synthétiseur de parole MBROLA (Dutoit et al., 1996) en utilisant la base de diphones *fr2*. Afin d'éviter des indices directs dévoilant les débuts de mot, le flux a été synthétisé en augmentant l'amplitude pendant les cinq premières secondes

et en la diminuant pendant les cinq dernières. Les mots avaient une longueur de 696 ms (longueur des syllabes : 232 ms) et une fréquence du premier formant de 200 Hz.

Familiarisation. Pendant la phase de familiarisation, les sujets étaient confrontés à un flux de syllabes d'environ 10 minutes ; le flux était une concaténation de neuf 'mots' trisyllabiques. Ces mots étaient séparés de silences subliminaux de 25 ms. Chaque mot était répété 100 fois. Le flux était le même que lors de l'expérience 3 de Peña et al. (2002).

Les neuf mots ont été construits à partir de trois familles dans lesquelles la première et la dernière syllabe étaient, respectivement, /pu/ et /ki/, /be/ et /ga/ ainsi que /ta/ et /du/. Pour toutes les familles, la syllabe du milieu pouvait être /li/, /Ra/ ou /fo/ ; ceci a donné lieu aux neuf mots suivants avec la structure A_iXC_i (les caractères en gras indiquent les syllabes qui définissent les familles) : /**pu**li**ki**/, /**pu**Ra**ki**/, /**pu**fo**ki**/, /**be**li**ga**/, /**be**Ra**ga**/, /**be**fo**ga**/, /**ta**li**du**/, /**ta**Ra**du**/, /**ta**fo**du**/. J'appellerai ces mots des *mots de familiarisation* puisqu'ils sont apparus pendant la familiarisation. La TP entre chaque A_i et l'X adjacent ou entre chaque X et le C_i adjacent était 0.33. La TP entre la dernière syllabe d'un mot et la première syllabe du mot suivant était 0.5 puisque les répétitions des familles étaient exclues. La TP entre chaque A_i et le C_i correspondant était toujours 1.0.

Les sujets ont été informés qu'ils entendraient une séquence de paroles d'une langue imaginaire et qu'ils devraient écouter attentivement cette séquence. Ils ont été informés également de la tâche qu'ils avaient à remplir pendant la phase de test.

Test. Les sujets ont entendu 12 pairs de mots, présentées deux fois en ordre randomisé. Ils avaient la tâche de choisir l'item dont ils pensaient qu'il était plus probable qu'il soit apparu lors de la phase de familiarisation ; je leur ai demandé de deviner s'ils n'étaient pas sûrs.

En chaque paire de test, un item était un *mot de classe* tandis que l'autre était un *mot partiel*. Dans un mot de classe, la première et la dernière syllabe sont apparues dans ces positions respectives mais jamais dans cette combinaison ; la syllabe du milieu n'est jamais apparue en milieu de mot pendant la familiarisation mais seulement en position initiale ou finale. Par exemple, dans le mot de classe /putaga/, /pu/ était la première syllabe de la famille /pu/…/ki/, /ga/ la dernière syllabe de la famille /be/…/ga/ alors que /ta/ n'est jamais apparu en milieu d'un mot de familiarisation mais comme première syllabe de la famille /ta/…/du/. Les mots de classe avaient donc la structure $A_iX'C_j$; les sujets pouvaient les accepter seulement s'ils ont appris la règle des classes et s'ils la généralisaient aux nouveaux items.

L'autre item d'une paire de test, le mot partiel, est apparu dans le flux de familiarisation mais coupait une frontière de mot. Ces items pouvaient être construits de deux manières différentes : ou bien en prenant les deux dernières syllabes d'un mot de familiarisation et la première d'un autre ('type 21') ou bien en prenant la dernière syllabe d'un mot de familiarisation et les deux premières d'un autre ('type 12'). J'appelle ces items les mots partiels parce qu'ils consistent en des parties de deux mots de familiarisation. Ils ont été rencontrés lors de la familiarisation, mais — puisqu'ils traversent une frontière de mot — ils ne respectent pas la règle des classes.

Si les sujets préféraient les mots de classe, ils auraient appris que la première ainsi que la dernière syllabe des mots pouvaient être des combinaisons arbitraires de syllabes qui sont apparues dans ces positions pendant la familiarisation ; en d'autres termes, ils auraient appris que ces positions agissent comme des variables quantifiées sur des classes de syllabes distinctes.

Les paires de test ont été présentées deux fois, une fois avec le mot de

classe comme premier item et une fois avec le mot partiel d'abord. Les deux items d'une paire ont été séparés par un silence de 1.5 ms. Les essais commençaient 2 ms après une réponse de sujet. La table 9.1 montrent les paires de test.

TAB. 9.1 – Paires de test utilisées lors des expériences 17 à 21 en transcription SAMPA.

Class-Words	Part-Words
putaga	kibefo
puduga	likibe
pubedu	kitali
pugadu	Rakita
betaki	gapuRa
beduki	fogapu
bepudu	fogata
bekidu	gatali
tabeki	Radupu
tagaki	dupufo
tapuga	lidube
takiga	dubeRa

Résultats et discussion

La figure 9.1 montre les résultats de l'expérience 17. Les sujets préféraient les mots de classe aux mots partiels (59.4±15.5%, $t(19) = 2.7$, $p = 0.014$). La préférence ne dépendait pas du type de mot partiel qui était le choix alternatif ($t(19) = 0.42$, $p > 0.6$, ns).

9.2.2 Expérience 18 : Extraction de classes après une familiarisation avec un flux continu

L'objectif de l'expérience 18 était d'évaluer si les sujets préférerait les mots de classe également après une familiarisation avec un flux *continu*. Elle était identique à l'expérience 17 sauf que le flux de familiarisation était continu.

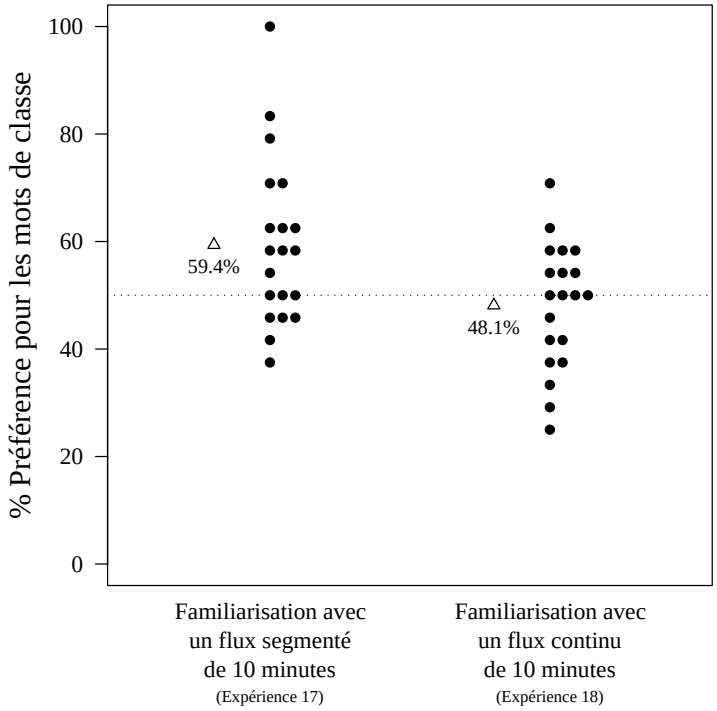


FIG. 9.1 – Résultats des expériences 17 (familiarisation de 10 minutes avec silences de 25 ms entre les mots) et 18 (familiarisation de 10 minutes avec un flux continu). Les sujets préfèrent les mots de classe aux mots partiels quand ils sont familiarisés avec un flux segmenté mais pas après avoir été familiarisés avec un flux continu.

Matériels et méthodes

Sujets. Vingt sujets italiens (13 femmes, sept hommes, âgés de 19 à 29 ans pour un âge moyen de 22.4 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

Résultats

La figure 9.1 montre les résultats de l'expérience 18. Les sujets n'avait aucune préférence pour les mots de classe (48.1±11.7%, $t(19) = -0.7$, $p > 0.48$, ns). Dans cette expérience non plus, la préférence ne dépendait pas

du type de mot partiel qui était le choix alternatif ($t(19) = 0.18$, $p > 0.8$, ns).

Une ANOVA conjointe des expériences 17 et 18 avec la présence des silences subliminaux comme facteur inter-sujet a montré que la préférence pour les mots de classe était plus élevée lors de l'expérience 17 que lors de l'expérience 18 ($F(1,38) = 6.7$, $p = 0.013$).

Discussion

Lors de l'expérience 17, les sujets préféraient les mots de classe aux mots partiels ; lors de l'expérience 18 cette préférence est disparue. Comme la seule différence entre les deux expériences était la présence ou l'absence des silences subliminaux entre les mots, ce résultat suggère que les sujets ont généralisé la règle des classes quand le flux de familiarisation était segmenté de manière subliminale mais pas quand il était continu[3]. Ceci confirme que les généralisations sont induites par les indices de segmen-

[3]Par accident, certains fragments des items de test étaient des mots italiens ('tali' et 'foga' pour les mots partiels ; 'pube' et 'beta' pour les mots de classe). Or, ces fragments étaient reconnaissables seulement lors d'une présentation écrite et n'étaient pas reconnus par un informateur de langue maternelle italienne lors d'une présentation auditive quand je lui ai demandé s'il avait détecté des mots italiens 'cachés'. Afin de vérifier si les items de test correspondant ont été catégorisés comme mots à cause de leur chevauchement partiel avec des mots italiens, j'ai calculé une ANOVA pour chaque expérience avec la préférence pour les mots de classe comme variable dépendante et le type de l'item dans lequel le fragment était caché (mot de classe ou partiel) comme facteur intra-sujet. Si les sujets avaient découvert les mots italiens, ils devraient accepter plus les items de test qui les contiennent ; ceci devrait augmenter la préférence pour les mots de classe quand les mots italiens sont dans les mots de classe et la préférence pour les mots partiels quand ils sont dans les mots partiels. Dans l'idéal, les sujets accepteraient et les mots de classe et les mots partiels contenant les mots italiens comme étant apparus dans le flux de familiarisation. Si les sujets avaient détecté les mots italiens, on s'attendrait donc à un effet principal du type des items de test contenant les mots italiens. Ni l'expérience 17 ($F(1,19) < 0.5$, $p > 0.5$, ns, ANOVA à mesures répétées) ni l'expérience 18 ($F(1,19) = 0.005$, $p > 0.9$, ns, ANOVA à mesures répétées) n'ont montré ce pattern de résultats. On peut donc conclure que les sujets n'ont pas détecté les mots italiens.

tation subliminaux entre les mots et ne sont pas disponibles sinon[4].

9.3 Mécanismes unique ou à deux voies ?

Ensemble, les expériences 17 et 18 suggèrent que les silences subliminaux peuvent induire l'extraction d'une régularité faisant appel à des classes de syllabes. Or, on peut se poser la question quel genre de méca-

[4]Une critique possible de cette conclusion pourrait faire appel aux propriétés statistiques de l'italien. Les mots de classe que j'ai utilisés — de même que les mots de règle utilisés par Peña et al. (2002) — commençaient par une consonne stop et il est probable que de nombreux mots italiens commencent également par de telles consonnes. Comme il n'y a pas de corpus numérisé pour l'italien, j'ai vérifié les fréquences dans un corpus français (New, Pallier, Ferrand & Matos, 2001). Tandis que 18.03% des mots français commencent par une consonne qui peut être en position d'onset d'une syllabe 'A', 19.86% commencent par une consonne qui peut être en onset d'une syllabe C et 15.84% commencent par une consonne qui peut être en onset d'une syllabe X. Ces valeurs étaient similaires à celles obtenues dans un corpus espagnol (M. Peña, communication personnelle) et s'appliquent donc probablement également à l'italien. Par conséquent, les sujets auraient pu choisir les mots de classe à cause des propriétés statistiques de leur langue maternelle (au moins quand l'alternative était un mot partiel de type 12), et non pas parce qu'ils sont appris la règle des classes. Au fait, Peña et al. (2002) ont présenté une expérience contrôle pour cette possibilité en utilisant un flux où la plupart des mots devenait des mots partiels et vice versa (note 17) . Cette manipulation n'a pas changé leurs résultats. Mes expériences 17 et 18 offrent un contrôle interne suggérant qu'une telle interprétation est peu probable. La moitié des mots partiels commençait par une consonne liquide tandis que l'autre moitié commençait par une consonne stop. Si la préférence pour les items commençant par une consonne stop avait une influence sur mes résultats, la préférence pour les mots de classe aurait dû être plus prononcée quand les mots de classe étaient comparés aux mots partiels commençant par une consonne liquide que quand ils étaient comparés aux mots partiels commençant par une consonne stop. Il n'y avait aucune trace d'une telle tendance. Un argument similaire pourrait être avancé pour exclure que mes résultats dépendent d'une préférence pour les items finissant par une consonne stop. La moitié des mots partiels finissaient par une syllabe commençant par une consonne stop et l'autre moitié par une syllabe commençant par une consonne liquide ; par conséquent, la préférence pour les mots de classe devrait dépendre de la dernière syllabe du choix alternatif. Il n'y avait aucune trace d'un tel effet. Il est donc peu probable que la distribution statistique des positions des phonèmes peut expliquer les résultats présentés dans ce chapitre.

nisme est responsable pour ces généralisations. Il est tout à fait possible que ces généralisations sont le fruit d'un mécanisme purement associationniste ; il est cependant également possible que ces computations soient effectuées par un autre mécanisme non-associationniste.

Comme on l'a vu plus haut, ces deux possibilités font des prédictions distinctes. Si les sujets calculaient les généralisations grâce à un mécanisme purement associationniste, ils devraient bénéficier d'une plus grande exposition aux stimuli ; par conséquent, la préférence pour les mots de classe devrait être positivement corrélée avec la durée de familiarisation. Un tel modèle serait fort parcimonieux puisque nombre d'expériences ont illustré l'étendue de la sensitivité humaine aux distributions statistiques (voir par exemple Aslin et al., 1998; Cleeremans & McClelland, 1991; Fiser & Aslin, 2001, 2002a, 2002b; Hunt & Aslin, 2001; Rosch, Mervis, Gray, Johnson & Boyes-Braem, 1976; Saffran, Newport & Aslin, 1996; Saffran, Aslin & Newport, 1996; Saffran et al., 1999). Par contre, si les généralisations sont projetées par un mécanisme qui extrait les régularités rapidement et qui coexiste et entre en compétition avec un système registrant la distribution statistique des syllabes dans le signal, les mots de classe devraient être préférés aux mots partiels après des familiarisations *courtes* mais moins après des familiarisations longues — car la familiarité avec les mots de classe devrait atteindre son maximum relativement rapidement alors que les représentations en mémoire des mots partiels continuent d'être renforcées. J'ai contrasté ces prédictions en familiarisant les sujets avec des flux segmentés de 30 minutes (expérience 19) et de deux minutes (expérience 20).

9.3.1 Expérience 19 : Extraction des classes après une familiarisation avec un flux long

L'expérience 19 était identique à l'expérience 17 sauf que le flux de familiarisation était présenté trois fois, donnant lieu à une durée de familiarisation totale de 30 minutes. Pour procéder à la présentation suivante du

flux, les sujets devaient appuyer sur une touche.

Matériels et méthodes

Sujets. Vingt sujets italiens (16 femmes, quatre hommes, âgés de 20 à 32 ans pour un âge moyen de 24.5 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

Résultats et discussion

La figure 9.2 montre les résultats de l'expérience 19. Les sujets n'avaient pas de préférence pour les mots de classe (54.5±18.1%, $t(19) = 1.1$, $p = 0.283$, ns). Dans cette expérience non plus, la préférence ne dépendait pas du type de mot partiel qui était le choix alternatif ($t(19) = 1.3$, $p > 0.19$, ns).

La figure 9.2 montre la présence de deux sujets déviant clairement des autres par 1.8 et 2.5 déviations standard, respectivement. Si l'on exclut ces sujets, on obtient une préférence pour les mots de classe de 50.1%.

9.3.2 Expérience 20 : Extraction des classes après une familiarisation avec un flux court

Pendant l'expérience 20, les sujets devaient choisir entre des mots de classe et des mots partiels après un familiarisation avec un flux segmenté de deux minutes.

Matériels et méthodes

Sujets. Vingt sujets italiens (11 femmes, neuf hommes, âgés de 19 à 46 ans pour un âge moyen de 26.9 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

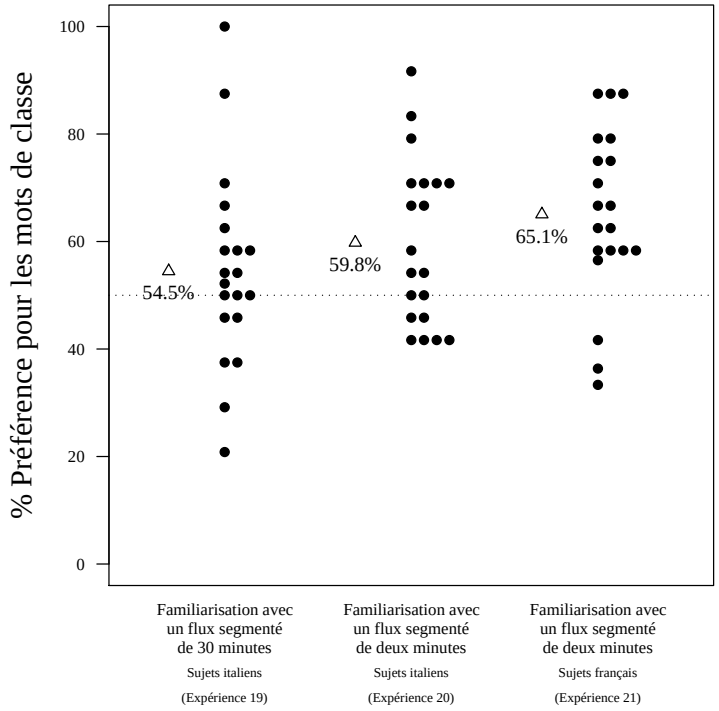


FIG. 9.2 – Résultats des expériences 19, 20 et 21. Les sujets préfèrent les mots de classe aux mots partiels après une familiarisation avec un flux segmenté de deux minutes (expériences 20 et 21) mais pas après une familiarisation avec un flux segmenté de 30 minutes (expérience 19).

Résultats et discussion

Comme le montre la figure 9.2, les sujets préféraient les mots de classe (59.8±15.4%, $t(19) = 2.8$, $p = 0.01$). La préférence ne dépendait pas du type de mot partiel qui était le choix alternatif ($t(19) = 1.0$, $p > 0.31$, ns) ; ceci permet d'exclure des problèmes avec les propriétés statistiques des sons de la langue maternelles des sujets.

9.3.3 Expérience 21 : Extraction de classes après une familiarisation avec un flux court II

J'ai répliqué l'expérience 20 (où les sujets étaient de langue maternelle italienne) avec des sujets français.

Matériels et méthodes

Sujets. Vingt sujets français (12 femmes, huit hommes, âgés de 19 à 30 ans pour un âge moyen de 22.7 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

Résultats et discussion

Les sujets avaient une forte préférence pour les mots de classe (65.1±15.9%, $t(19) = 4.2$, $p < 0.00045$) ; la préférence ne dépendait pas du type de mot partiel qui était le choix alternatif ($t(1,19) = 1.3$, $p > 0.22$, ns). Je limiterai cependant la discussion suivante aux sujets italiens pour être certain de comparer des groupes de sujets comparables.

9.3.4 Discussion

Les sujets ont nettement préféré les mots de classe aux mots partiels après une familiarisation de seulement deux minutes ; ceci confirme le résultat de Peña et al. (2002) que les généralisations sont disponibles après des familiarisations courtes. De même, ils préféraient les mots de classe après une familiarisation avec un flux de 10 minutes. Par contre, ils n'avaient pas de préférence pour les mots de classe après une familiarisation avec un flux de 30 minutes (figure 9.3). Ceci suggère que la préférence pour les mots de classe disparaît pour les familiarisations longues.

De plus, la figure 9.3 montre que plus de sujets familiarisés avec un flux de deux minutes qu'avec un flux de 30 minutes avaient une préférence pour les mots de classe qui était significative selon un test binomial[5], et que plus de sujets familiarisés avec un flux de 30 minutes qu'avec un flux de deux minutes avaient une préférence significative pour les mots par-

[5]Une préférence intra-sujet pour les mots de classe d'au moins 70.8% est significative selon un test binomial unidirectionnel.

tiels. Le nombre net de sujets préférant les mots de classe (c'est-à-dire la différence entre le nombre de sujets choisissant les mots de classe et de ceux choisissant les mots partiels) était différent entre les familiarisations de deux minutes et de 30 minutes (7 versus 1, $\chi^2(1) = 5.6$, $p = 0.018$).

Finalement, même si je n'ai pas exclu même des sujets déviant de plus de 2.5 déviations standard de la moyenne dans les analyses précédente, on obtient une corrélation négative entre la préférence pour les mots de classe et la durée de familiarisation si l'on exclut les deux outliers apparents dans la figure 9.3[6]. Ces analyses avaient des résultats encore plus forts en considérant la réplication de l'expérience 20 avec les sujets français[7].

Dans leur ensemble, ces résultats suggèrent que la préférence pour les mots de classe décroît et disparaît quand la durée de familiarisation augmente. Ceci confirme la prédiction d'un modèle comportant (i) un mécanisme non-associationniste projetant rapidement les généralisations et (ii)

[6]Des corrélations pour des expériences comme celles présentées ici sont généralement calculées à partir des moyennes des différentes conditions expérimentales ; ceci donnerait un grand coefficient de corrélation (r = -0.98). Or, comme on ne dispose que de trois points de données, et puisqu'une ligne droite a deux paramètres pour les approcher, on a presque une garantie d'obtenir de bons coefficients de corrélation. Afin d'éviter ce problème, j'ai évalué le coefficient de corrélation avec un test de permutation. J'ai attribué les sujets aléatoirement aux différentes durées de familiarisation (un sujet de l'expérience 17 pouvait par exemple être attribué à l'expérience 20) avant de calculer la corrélation entre la préférence pour les mots de classe et la durée de familiarisation en utilisant *tous* les sujets comme points de données. J'ai généré une distribution de tels coefficients de corrélation à partir de 100,000 'attributions' randomisées des sujets aux conditions ; cette distribution avait l'air gaussienne lors d'une inspection visuelle. A partir de cette distribution, j'ai calculé la valeur de Z pour le coefficient de corrélation résultant de l'attribution 'vraie' des sujets. Le score de Z suggère que la préférence pour les mots de classe était corrélée négativement avec la durée de familiarisation (Z = -1.7, p = 0.046).

[7]Huit sujets ont préféré les mots de classe selon un test binomial, et aucun n'avait une préférence pour les mots partiels ; le nombre net de sujets préférant les mots de classe est différent de celui obtenu lors de l'expérience 19 : $\chi^2(1) = 7.0$, $p = 0.008$. La corrélation entre la préférence pour les mots de classe et la durée de familiarisation était également négative : Z = -2.5, p = 0.006.

un mécanisme distinct qui registre les propriétés statistiques des stimuli ; les sujets peuvent donc extraire la règle des classes rapidement, mais les familiarisations longues diminuent la préférence pour les mots de classe parce qu'elles renforcent les représentations en mémoire des mots partiels — et donc des items de test alternatifs. Ceci n'implique pas nécessairement que la représentation de la règle des classes s'affaiblit avec le temps (même si je ne peux pas exclure cette possibilité), mais plutôt que les représentations des choix alternatifs sont renforcées. En effet, Peña et al. (2002) ont montré que les sujets préfèrent des mots partiels aux mots de règle après des familiarisations longues avec des flux *continus* ; ceci suggère que les représentations des mots partiels sont effectivement renforcées par de longues familiarisations. Par conséquent, si la familiarité avec les mots de classe augmente au début plus rapidement que celle avec les mots partiels mais plus lentement — ou même négativement — sur une échelle de temps plus longue, on prédit les résultats rapportés ici. Par contre, un mécanisme monolithique traitant tous les items de la même manière ne peut pas expliquer ces résultats.

9.4 Expérience 22 : Généralisations ou biais perceptif ?

Les expériences 17 à 21 suggèrent que les sujets apprennent une régularité faisant appel à des classes quand ils sont familiarisés avec des flux subliminalement segmentés. Or, une interprétation alternative est que les sujets ne prêtent attention qu'à la première ou à la dernière syllabe des mots à cause de leur saillance. Même si je montrerai que les computations sous-jacentes font appel à des classes de syllabes également dans ce cas, l'objectif de l'expérience 22 est d'exclure cette possibilité.

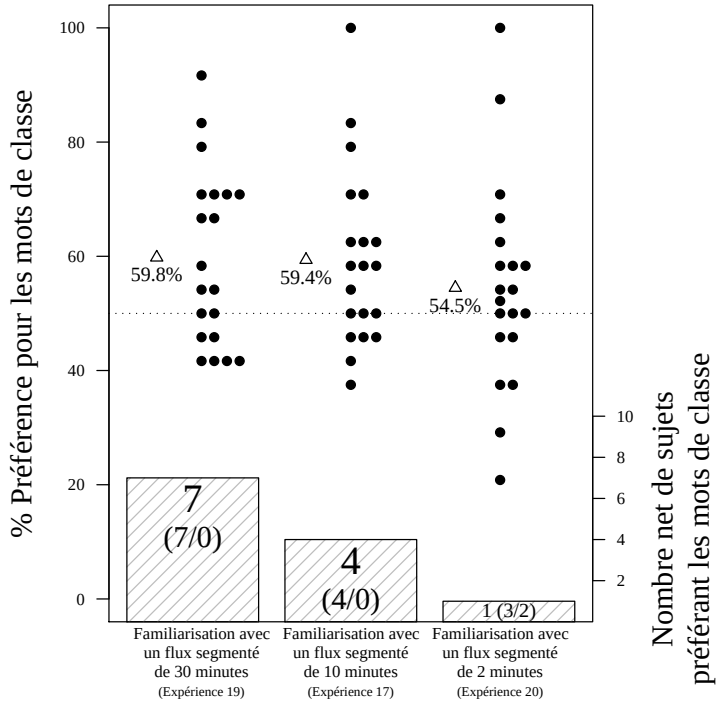


FIG. 9.3 – Résultats des expériences 17, 19 et 20. La préférence pour les mots de classe est négativement corrélée avec la durée de familiarisation. De plus, le nombre net de sujets préférant les mots de classe selon un test binomial intra-sujet (c'est-à-dire la différence entre les nombres de sujets préférant les mots de classe et les mots partiels, respectivement) est plus élevé pour les familiarisations courtes que pour les familiarisations longues. Les chiffres entre parenthèses indiquent les nombres de sujets préférant les mots de classe et les mots partiels, respectivement.

9.4.1 Matériels et méthodes

Sujets

Vingt sujets français (neuf femmes, 11 hommes, âgés de 20 à 27 ans pour un âge moyen de 22.8 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

Familiarisation

La phase de familiarisation était identique à celle de l'expérience 20 ; les sujets ont été familiarisés avec un flux segmenté de deux minutes.

Test

Pendant la phase de test, les sujets devaient choisir entre des items avec la structure A_iC_jX et des items avec la structure XA_iC_j ; les deux items d'une paire avaient les mêmes syllabes. 18 paires ont été présentées deux fois en différents ordres ; l'ordre des paires a été randomisé. La table 9.2 montre les paires de test retenues. Si les sujets prêtaient attention seule-

TAB. 9.2 – Paires de test utilisées lors de l'expérience 22 en transcription SAMPA.

Syllabe légale	
Initiale	Finale
bedufo	fobedu
beduli	libedu
beduRa	Rabedu
bekifo	fobeki
bekili	libeki
bekiRa	Rabeki
pudufo	fopudu
puduli	lipudu
puduRa	Rapudu
pugafo	fopuga
pugali	lipuga
pugaRa	Rapuga
tagafo	fotaga
tagali	litaga
tagaRa	Rataga
takifo	fotaki
takili	litaki
takiRa	Rataki

ment à la dernière syllabe d'un mot, ils devraient choisir les items avec la structure XA_iC_j – car la dernière syllabe dans ces items est 'légale' et

la première syllabe devrait être ignorée. De même, si les généralisations reposaient seulement sur la première syllabe, les sujets devraient choisir les items avec la structure A_iC_jX. Par contre, si la première et la dernière syllabe étaient importantes toutes les deux, les sujets ne devraient avoir aucune préférence.

9.4.2 Résultats et discussion

Comme le montre la figure 9.4, les sujets n'avaient pas de préférence (52.8±10.1%, $t(19) = 1.2$, $p = 0.234$, ns).

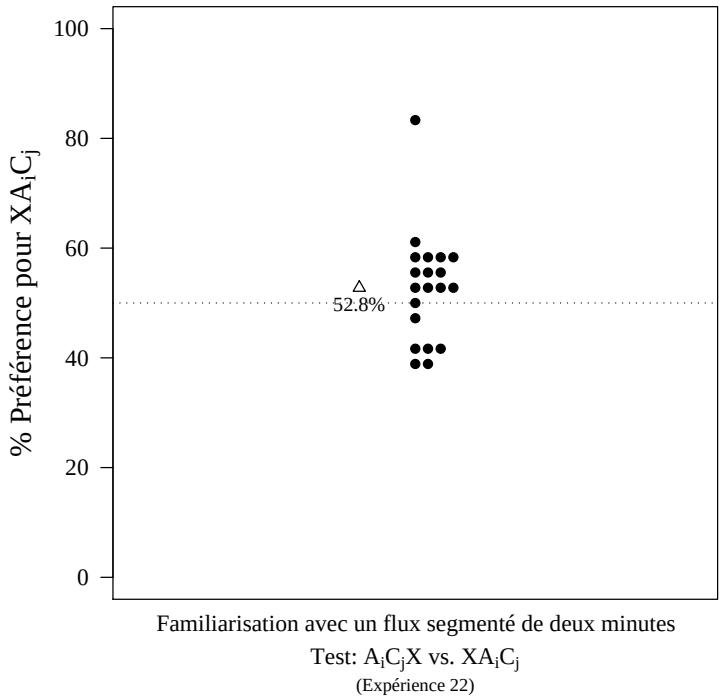


FIG. 9.4 – Résultats de l'expérience 22. Les sujets n'ont pas de préférence pour les items de la forme A_iC_jX ou XA_iC_j.

Si les généralisations des expériences 17 à 21 reposaient seulement sur la première syllabe, les sujets auraient dû préférer les items avec la structure A_iC_jX par rapport aux items avec la structure XA_iC_j ; si les généralisations

sations reposaient seulement sur la dernière syllabe, la préférence inverse aurait dû être observée. Par contre, les sujets n'avaient aucune préférence pour aucun des items ; ceci suggère qu'ils ont prêté attention et à la première syllabe et à la dernière lors des expériences 17 à 21.

9.5 La relation entre les règles A_iC_i et la règle des classes

Les expériences 17 à 22 suggèrent que les sujets ont appris une régularité faisant appel à des classes de syllabes : ils ont appris que des membres d'une classe de syllabes pouvaient apparaître en début de mot tandis que les membres d'une autre classe de syllabes pouvaient apparaître en fin de mot. Ces généralisations semblent être induites par les silences subliminaux entre les mots pendant la phase de familiarisation. Cette conclusion découle de plusieurs observations. Les sujets ont généralisé la règle des classes après une familiarisation avec un flux segmenté de 10 minutes mais pas après une familiarisation avec un flux continu de même durée. De même, ils ont généralisé les règles A_iC_i après une exposition à des flux segmentés de deux ou 10 minutes mais pas après une exposition à des flux continus des même durées (Peña et al., 2002; Peña, 2003). En plus, quand les sujets ont été familiarisés massivement avec un flux continu de 30 minutes, ils n'avaient pas seulement aucune préférence pour les mots de classe mais ils préféraient même les mots partiels (Peña et al., 2002). Ces résultats suggèrent que les silences subliminaux entre les mots ont induit des computations qui n'étaient pas disponibles après une familiarisation avec un flux continu.

Alors que mes résultats suggèrent que les sujets ont extrait une régularité faisant appel à des classes de syllabes, Peña et al. (2002) ont proposé que les sujets ont appris les règles A_iC_i après une exposition à un flux subliminalement segmenté. Les règles A_iC_i sont des régularités de la forme « si la première syllabe est /pu/, la dernière est /ki/ ». Par conséquent,

les items qui sont conformes à une règle $A_i C_i$ sont également conformes à la règle des classes mais — contrairement aux mots de classe — ils ont également une TP de 1.0 entre leur première et leur dernière syllabe. Dans les expériences suivantes, je me suis demandé si les règles $A_i C_i$ étaient des règles symboliques proprement dites et autonomes de la règle des classes, ou si elles sont simplement des exemplaires fréquents de la règle des classes.

D'un coté, les règles $A_i C_i$ pourraient être des véritables règles comme la dépendance entre l'article et le suffixe en 'IL bambin-O'. Dans ce cas, on s'attendrait à ce que les règles $A_i C_i$ puissent être apprises seulement après une familiarisation avec un flux segmenté et non pas avec un flux continu car les généralisations sont disponibles seulement après les familiarisations avec des flux segmentés. D'autre coté, les sujets pourraient faire des calculs statistiques en plus de l'extraction de la règle des classes. Cette possibilité peut être illustrée avec un exemple linguistique. Les locuteurs connaissent par exemple les classes de mots 'nom' et 'verbe' et leur relations, mais ils savent également qu'il est plus probable pour certains exemplaires de la classe 'nom' d'être combinés avec des exemplaires spécifiques de la classe 'verbe'. Par exemple, ils savent que 'poisson' et 'oiseau' appartiennent à la classe des noms et 'nager' et 'voler' à la classe des verbes, mais ils savent également que 'poisson' arrive plus fréquemment avec 'nager' qu'avec 'voler' et que l'inverse s'applique à 'oiseau'. Cette connaissance ne peut être acquise qu'en échantillonnant les co-occurrences des exemplaires des classes 'nom' et 'verbe'. De la même manière, les sujets auraient pu apprendre la règle des classes comme seule véritable règle tout en remarquant la co-occurrence fréquente des syllabes présentes dans une règles $A_i C_i$; les généralisations des expériences de Peña et al. (2002) (c'est-à-dire les règles $A_i C_i$) pourraient donc être expliquées en termes d'une régularité faisant appel aux classes augmentée d'une sensitivité statistique aux TPs entre des syllabes non-adjacentes. Dans ce cas, les sujets pourraient avoir généralisé les règles $A_i C_i$ dans l'expérience de Peña et al. (2002) parce que (i) ils ont appris la règle des classes et, en plus de cette

règle, (ii) ils ont remarqué que les combinaisons entre syllabes initiales et finales qui apparaissaient dans les règles A_iC_i étaient particulièrement fréquentes (parce qu'ils étaient les *seules* combinaisons que le sujets ont rencontrées).

Pour évaluer ces possibilités, j'ai étudié les conditions sous lesquelles les sujets préfèrent les 'mots de règle' aux mots de classe ; les mots de règle sont identiques aux mots de classe sauf que la première et la dernière syllabe provenaient de la *même* famille. Ils avaient donc la structure $\mathrm{A}_i\mathrm{X'C}_i$ (tandis que les mots de classe avaient la structure $\mathrm{A}_i\mathrm{X'C}_j$) ; ils obéissent à une règle A_iC_i en plus de la règle des classes et la TP entre leur première et leur dernière syllabe est 1.0. Si et les règles A_iC_i et la règle des classes étaient des régularités représentées indépendamment sans que des computations statistiques soient effectuées en plus des généralisations, les sujets devraient préférer les mots de règle par rapport aux mots de classe seulement après une familiarisation avec un flux segmenté — car les résultats de Peña et al. (2002) et de moi-même montrent que les généralisations ne sont disponibles qu'après une familiarisation avec un flux segmenté. Par contre, si les mots de règle sont préférés aux mots de classe parce que la TP entre la première et la dernière syllabe y est plus élevée que dans les mots de classe, la préférence devrait également être observée après une familiarisation avec un flux continu — car les computations statistiques sont disponibles également après des familiarisations avec de tels flux.

Les expériences 23 à 25 ont étudié la question de savoir si les sujets préfèrent les mots de règle aux mots de classe après une exposition ou bien à un flux segmenté (expérience 23) ou bien à un flux continu (expériences 24 et 25).

9.5.1 Expérience 23 : Règles $\mathbf{A}_i\mathbf{C}_i$ versus règle des classes après une familiarisation segmentée

Je me suis demandé si les mots de règle seraient préférés aux mots de classe après une familiarisation avec un flux segmenté de deux minutes.

Matériels et méthodes

Sujets. Vingt sujets français (13 femmes, sept hommes, âgés de 19 à 27 ans pour un âge moyen de 22.3 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

Familiarisation. La familiarisation était la même que lors de l'expérience 20 ; les sujets ont entendu un flux de deux minutes où les mots étaient séparés par des silences de 25 ms.

Test. Lors de chacun des 24 essais, les sujets devaient choisir entre un mot de règle et un mot de classe. Les mots de règle étaient identiques aux mots de classe sauf que leur première et leur dernière syllabe appartenaient à la même famille ; par conséquent, la TP entre leur première et leur dernière syllabe est 1.0 alors qu'elle est 0 pour les mots de classe. Contrairement aux mots de classe qui n'obéissent qu'à la règle des classes, les mots de règle obéissent également à une règle A_iC_i.

La moitié des paires de test partageaient leurs deux premières syllabes et ne différaient qu'en leur dernière syllabe ; pour l'autre moitié, c'était la première syllabe qui différait. La table 9.3 montre les paires de test retenues ; chaque paire a été présentée trois fois.

TAB. 9.3 – Paires de test utilisées lors des expériences 23 à 25 en transcription SAMPA.

Mots de règle	Mots de classe
beduga	beduki
bekiga	takiga
bepuga	bepudu
pubeki	pubedu
pugaki	tagaki
putaki	betaki
tabedu	tabeki
takidu	bekidu

Résultats et discussion

Comme le montre la figure 9.5, les sujets préféraient les mots de règle aux mots de classe (60.0±10.4%, $t(19) = 4.3$, $p < 3.6e\text{-}4$). Il n'y avait pas de différence entre les paires de test avec chevauchement initial ou final ($F(1,19) = 0.796$, $p > 0.38$, ns).

L'expérience 23 montre que les sujets préféraient les mots de règle aux mots de classe après une familiarisation avec un flux segmenté. Si les règles A_iC_i sont des règles autonomes, cette préférence devrait disparaître après une familiarisation avec un flux continu. Par contre, si la différence cruciale entre les mots de règle et les mots de classe est la TP entre la première et la dernière syllabe, les sujets devraient préférer les mots de règle également après une familiarisation avec un flux continu. J'ai testé ces prédictions lors des expériences 24 et 25.

9.5.2 Expérience 24 : Règles $\mathbf{A}_i\mathbf{C}_i$ versus règle des classes après une familiarisation continue I

Dans cette expérience, je me suis demandé si les mots de règle seraient préférés aux mots de classe après une familiarisation avec un flux continu de dix minutes.

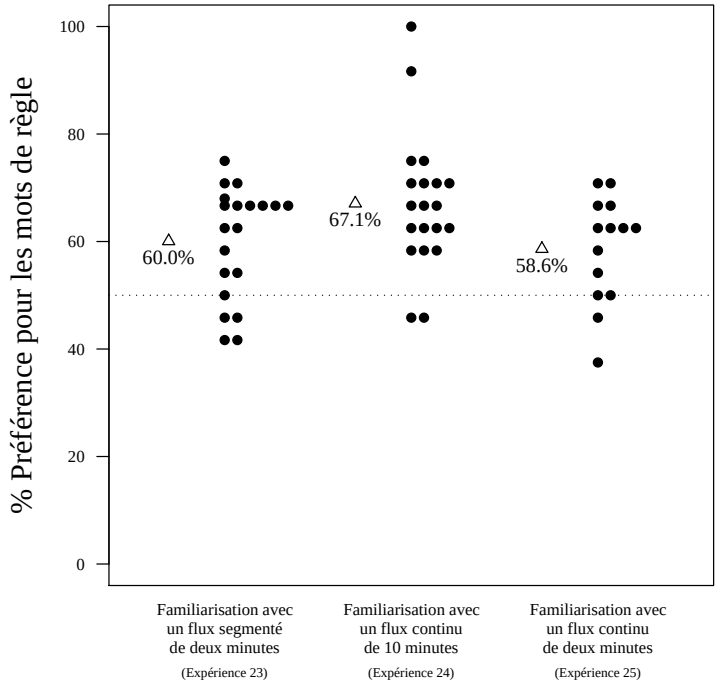


FIG. 9.5 – Résultats des expériences 23, 24 et 25. Les sujets préfèrent les mots de règle aux mots de classe après familiarisation avec un flux segmenté de deux minutes (expérience 23), un flux continu de 10 minutes (expérience 24) ou un flux continu de deux minutes (expérience 25).

Matériels et méthodes

Sujets. Vingt sujets français (11 femmes, neuf hommes, âgés de 18 à 38 ans pour un âge moyen de 26.2 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

Familiarisation. La phase de familiarisation était la même que lors de l'expérience 18.

Test. La phase de test était la même que lors de l'expérience 23.

Résultats et discussion

Comme le montre la figure 9.5, les sujets préféraient les mots de règle aux mots de classe (67.1±12.7%, $t(19) = 6.0$, $p = 9.1e\text{-}6$). Il y avait une tendance forte mais pas significative de préférer les mots de règle plus lors de l'expérience 24 que lors de l'expérience 23 ($F(1,38) = 3.6$, $p = 0.064$, ns).

9.5.3 Expérience 25 : Règles $\mathbf{A}_i\mathbf{C}_i$ versus règle des classes après une familiarisation continue II

Dans cette expérience, je me suis demandé si les mots de règle seraient préférés aux mots de classe après une familiarisation avec un flux continu de seulement deux minutes.

Matériels et méthodes

Sujets. Quatorze sujets italiens (neuf femmes, cinq hommes, âgés de 22 à 51 ans pour un âge moyen de 27.1 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

Résultats et discussion

Comme le montre la figure 9.5, les sujets préféraient les mots de règle aux mots de classe (58.6±9.9%, $t(13) = 3.3$, $p = 0.006$).

9.5.4 Discussion

Les sujets préféraient les mots de règle aux mots de classe après des familiarisations avec des flux segmentés ou continus ; ceci suggère qu'ils peuvent calculer des associations entre la première et la dernière syllabe d'un mot en plus de généraliser la règle des classes. Les règles A_iC_i pourraient donc ne pas être des régularités autonomes mais simplement des exemplaires fréquents de la règle des classes. Ceci n'implique pas que les

régularités linguistiques comme l'accord en genre et en nombre reposent sur des mécanismes statistiques — puisque de telles régularités sont généralement décrites en termes des propriétés *syntactiques* des constituants correspondants qui ne peuvent pas être décrites par l'ordre linéaire des constituants (voir par exemple Chomsky, 1957; G. A. Miller & Chomsky, 1963).

Les expériences 23 à 25 confirment que les sujets sont sensibles aux TPs entre syllabes non-adjacents dans un flux continu comme l'ont conclu Peña et al. (2002) de leur expérience 1. Newport et Aslin (2004) ont proposé que cette conclusion est invalide à cause d'un problème avec le matériel de Peña et al. (2002). Les sujets auraient pu répondre à des indices phonétiques au lieu de répondre aux TPs entre les syllabes non-adjacentes.

En effet, Peña et al. (2002) ont présenté une expérience contrôle pour cette possibilité en changeant la familiarisation de sorte que les indices phonétiques jouent *contre* les TPs non-adjacentes (Peña et al., 2002, note 17). Les expériences 23 à 25 offrent une autre stratégie pour contrôler l'influence des facteurs phonétiques et phonologiques sur les choix des sujets. Au lieu de manipuler la familiarisation, ces expériences ont gardé la familiarisation constante mais ont éliminé les indices phonétiques et phonologiques en utilisant des items de test partageant *tous* ces indices. Les mots de règle et les mots de classe dans une paire de test partageaient ou bien les deux première syllabes ou bien les deux dernières syllabes ; la syllabe qui distinguait les deux items appartenait à la même classe de syllabes (elle était ou bien une syllabe A ou bien une syllabe C) et avait donc des propriétés phonologiques et phonétiques identiques ; en particulier, les mots de règle comme les mots de classe avaient la structure 'Stop-Liquid-Stop' pour les consonnes en onset de leurs syllabes. Par conséquent, en absence de tout indice phonologique ou phonétique favorisant les mots de règle par rapport aux mots de classe, la préférence pour les mots de règle ne peut être expliquée que grâce à la sensitivité des sujets aux TPs entre les syllabes non-adjacentes.

En fait, il existe une littérature abondante qui supporte la conclusion qu'une telle sensitivité existe effectivement. Ceci découle d'expériences sur l'apprentissage de séquences (voir par exemple Ebbinghaus, 1885/1913), sur le phénomène 'pointe-de-la-langue' (voir par exemple R. Brown & McNeill, 1966) et de la recherche sur les fonctions de hippocampe (voir par exemple Dusek & Eichenbaum, 1997; Fortin et al., 2002; Greene et al., 2001). La conclusion que les sujets sont sensitifs aux TPs entre syllabes non-adjacentes est donc compatible avec de nombreux résultats antérieurs[8].

9.6 Un mécanisme associationniste peut-il expliquer l'acquisition de la règle des classes ?

Ensemble, les résultats des expériences 17 à 25 suggèrent que les sujets apprennent la règle des classes rapidement mais seulement s'ils sont exposés à un flux segmenté tandis que leur sensitivité aux règles A_iC_i est le résultat de leur faculté de calculer des TPs entre syllabes non-adjacentes simultanément avec la règle des classes. J'ai proposé que l'extraction des classes de syllabes et de la règle des classes reposent sur un mécanisme non-associationniste qui projète rapidement des généralisations. D'abord, je présenterai des arguments qui suggèrent que les modèles association-

[8]Sans entrer plus en détails, les arguments de Perruchet, Tyler, Galland et Peereman (2004) ne changent pas cette conclusion. Leur modèle (Perruchet & Vinter, 1998) est en réalité une machine de chunking récursive dont il est trivial de montrer formellement que leur modèle est computationnellement plus puissant qu'un mécanisme sensible uniquement aux TPs de n^{ième} ordre (où n est un nombre entier), indépendamment de ce que pensent Perruchet et al. (2004) ; il ne serait donc guère étonnant s'il pouvait apprendre des TPs entre des syllabes non-adjacents. Or, il est très discutable si leur modèle peut reproduire les résultats de Peña et al. (2002) car ceci dépend fortement (i) du choix des quatre paramètres arbitraires du modèle et (ii) du choix de la procédure d'analyse (comme je l'ai vérifié avec 246,420 simulations échantillonnant les paramètres de mon implémentation de leur modèle au lieu de leurs 14 simulations avec un jeu de paramètres 'convenablement' choisi) ; si l'on choisit une procédure standard, le modèle échoue tout simplement.

nistes ne sont pas suffisants pour expliquer la préférence pour les mots de classe ; ensuite, j'illustrerai ces considérations avec un ensemble de simulations avec un réseau de neurones.

9.6.1 Force associative entre items

Si un modèle associationniste préfère les mots de classe aux mots partiels, une mesure de la force associative entre les syllabes doit favoriser les mots de classe par rapport aux mots partiels. Or, toutes ces mesures favorisent les mots partiels. Les mots partiels sont apparus dans le flux — alors que les mots de classe contiennent des syllabes de trois mots *différents* ; ils ne contiennent donc pas de chunk qui soit apparu dans le flux. Par conséquent, toute mesure de la force des associations entre les syllabes (TPs, force de chunk etc.) favorise les mots partiels par rapport aux mots de classe — et non pas vice versa ; les modèles associationnistes devraient donc préférer les mots partiels.

9.6.2 Expérience 26 : Les silences subissent-ils des computations statistiques ?

Même si les associations entre syllabes ne peuvent pas expliquer la préférence pour les mots de classe, les silences subliminaux dans les flux segmentés pourraient être inclus dans les computations associationnistes, et ceci pourrait expliquer pourquoi les sujets ont préféré les mots de classe. Peña et al. (2002, note 27) ont présenté une expérience contrôle pour cette objection en montrant les sujets préfèrent les mots de règle aux mots partiels même quand les mots partiels contiennent un silence dans la position appropriée (par exemple $C_i\#A_jX$, où # représente un silence de 25 ms).

Or, il est possible que les silences *entourant* les items de test sont la raison pour la préférence pour les mots de règle ou de classe (F. Calvo-Garzón, soumis). Si la représentation d'un mot de classe *pendant la phase de test* est $\#A_iX'C_j\#$, et si la représentation d'un mot partiel *pendant la phase*

de test comporte les silences de la même manière, les TPs entre les syllabes et les silences favorisent les mots de classe par rapport aux mots partiels. Or, dans l'expérience de Peña et al. (2002) où les mots partiels comprenaient un silence, les mots partiels (au moins de type 21) étaient toujours favorisés par rapport aux mots de règle[9] ce qui suggère que les silences entourant les items de test ne sont pas importants pour les choix des sujets, au moins dans l'expérience susvisée. Plus généralement, les silences entourant les items de test peuvent expliquer la préférence pour les mots de classe seulement sous deux conditions. Premièrement, la représentation des silences doit être entièrement indépendante de leur forme acoustique ; deuxièmement, on doit postuler *deux* représentations distinctes des silences, une pour induire les généralisation et une autre qui peut subir des computations statistiques. Je développerai ces arguments ci-après en plus détail :

1. Les silences dans les flux avaient une durée de 25 ms alors que les silences pendant la phase de test étaient 60 fois plus longues. Si les silences étaient des items comme les syllabes, il devrait être possible d'augmenter la durée des syllabes par le même facteur, mais, en fait, de telles syllabes de 14 s étaient simplement inintelligibles.
2. Si les sujets représentaient les silences comme items dans les calculs de TP indépendamment de leur durée, les sujets ne devraient jamais percevoir *deux* items de test pendant un essai — mais seulement un grand item de la forme #mot de classe#mot partiel# ou #mot partiel#mot de classe#. Par conséquent, si la durée des silences était irrelevante, il serait simplement impossible pour les sujets d'effectuer la tâche de la phase de test.
3. Les sujets pourraient représenter la séparation entre les items de test comme 60 silences de 25 ms et pourraient percevoir deux items

[9]En comptant, on obtient les sommes suivantes des TPs de premier, deuxième et troisième ordre, respectivement : mots de règle : 1.33, 1.0, 1.33 ; mots partiels de type 12 : 1.66, 0.83, 0.33 ; mots partiels de type 21 : 1.66, 1.5, 0.33.

comme séparés après un certain nombre de silences intermédiaires. Or, comme les silences sont par hypothèse des items justement comme les syllabes, l'expérience de percevoir 2400 silences par minute devrait être la même que celle de percevoir 2400 *syllabes* par minute — ce qui semble pour le moins contre-intuitif.

4. Supposons que les sujets entendent un bruit de basse fréquence à peine perceptible pendant la phase de test entière — comme un disque dur qui commence à tourner pendant la phase de test à cause d'une augmentation du nombre d'opérations I/O. Puisque les items de test ne seraient plus entourés par des silences (mais par du bruit), la préférence pour les mots de classe devraient disparaître. Un tel résultat est cependant assez peu probable — car ce sont bien les items de test que doivent choisir les sujets, et un bruit de fond (ou un 'silence de fond') ne fait manifestement pas partie de ces items.

5. Tout de même, on pourrait considérer que la forme précise des 'silences' n'est pas important et que les sujets pourraient accepter un bruit comme équivalent d'un silence. Or, comme les silences sont par hypothèse des items comme les syllabes, il devrait être possible de changer également les labels des syllabes. Par exemple, simplement en changeant les labels des syllabes, il devrait être possible d'utiliser des ensembles de syllabes entièrement différentes pour la phase de familiarisation et la phase de test et d'observer une préférence pour les mots de classe quand même — ce qui est manifestement impossible.

6. Finalement, il est possible que les sujets ont utilisé les silences comme items dans les calculs de TP, mais que les silences agissent également comme des 'séparateurs' s'ils sont suffisamment longs, par exemple entre les items de test. Or, ceci revient au modèle que je propose : les silences ont des effets différents comme la séparation des items de test ou l'induction des généralisations ; l'objectif des expériences présentées dans ce chapitre est précisément de commencer à étudier quels types de processus les silences pourraient engendrer. Or, alors

qu'il est certainement possible qu'il existe une représentation supplémentaire des silences qui peut subir un traitement statistique, il n'y a pas d'évidence pour une telle représentation ; elle n'est cependant pas nécessaire non plus — car les résultats rapportés ici peuvent être expliqués sans que l'on postule une telle représentation supplémentaire.

Ces considérations suggèrent qu'il est raisonnable de rejeter la possibilité que des calculs statistiques avec les silences pourraient avoir un rôle causal pour la préférence pour les mots de classe.

Pour terminer la discussion du papier de Calvo-Garzón (soumis), il convient de noter qu'il rapporte également des simulations avec un réseau de neurones qui contredisent ceux que je présenterai dans la suite ; sans donner plus de détails, ces différences résultent d'erreurs dans ses simulations puisqu'il choisit de mauvaises lignes de base (ou plutôt pas de lignes de base du tout), tout en omettant toute évaluation statistique de ses résultats ; en incorporant ses erreurs, j'obtiendrais des résultats similaires.

Comme des résultats expérimentaux sont plus convaincants que des considérations a priori, j'ai étudié le rôle des silences entourant les items de test en répliquant l'expérience 20 mais en utilisant des items de test qui étaient précédés et suivis immédiatement par un ton pure. Plus précisément, des tons purs de 50 Hz avec une durée de 232 ms étaient 'collés' directement avant et après chaque item de test ; les fichiers de son correspondant ont simplement été concaténés avec la commande 'cat'. Comme cette manipulation abolit les transitions entre les silences et les syllabes, les TPs avec les silences ont été éliminées également. Par conséquent, si les sujets continuent de préférer les mots de classe par rapport aux mots partiels, les TPs avec les silences ne peuvent jouer aucun rôle causal pour cette préférence.

Matériels et méthodes

Sujets. Vingt sujets italiens (14 femmes, six hommes, âgés de 19 à 41 ans pour un âge moyen de 22.8 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

Résultats et discussion

Comme le montre la figure 9.6, les sujets préféraient les mots de classe aux mots partiels (57.9±16.6%, $t(19) = 2.1$, $p = 0.046$). Dans cette expérience non plus, la préférence ne dépendait pas du type de mot partiel qui était le choix alternatif ($t(19) = 1.5$, $p > 0.15$, ns). Même si les résultats de l'expérience 26 étaient seulement marginalement significatifs (ce qui n'est pas surprenant puisque le bruit qui entourait les items de test devrait gêner les sujets indépendamment du modèle choisi), huit sujets ont préféré les mots de classe suivant un test binomial et aucun sujet n'a préféré les mots partiels ; le nombre net de sujets préférant les mots de classe est donc comparable (en effet supérieur) à celui obtenu lors de l'expérience 20.

Comme lors de l'expérience 20, les sujets ont préféré les mots de classe aux mots partiels après une familiarisation avec un flux segmenté de deux minutes bien que les items de test aient été entourés de tons pures. Comme cette manipulation abolit les TPs avec les silences, les silences entourant les items de test ne peuvent pas être responsables de la préférence pour les mots de classe. De plus, ces résultats confirment que les sujets peuvent extraire la règle des classes rapidement après un flux de seulement deux minutes.

En tout état de cause, des modèles statistiques uniformes ne peuvent pas expliquer pourquoi la préférence pour les mots de classe *disparaît* pour les durées de familiarisation longues ; si les sujets calculaient simplement des TPs indifféremment sur les syllabes et les silences, toute préférence

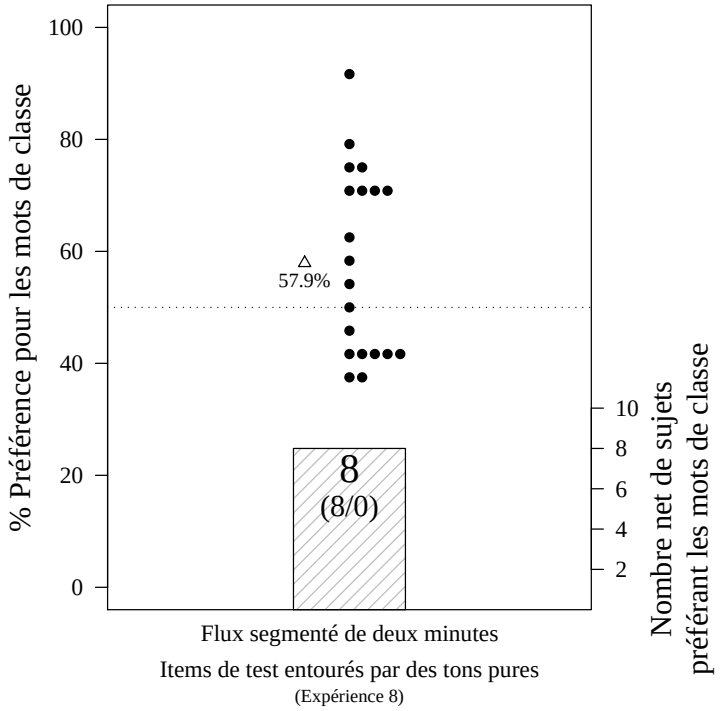


FIG. 9.6 – Résultats de l'expérience 26. Les sujets préfèrent les mots de classe aux mots partiels après une familiarisation avec un flux segmenté de deux minutes même quand les items de test sont immédiatement entourés de tons purs.

devraient être renforcée après plus d'exposition — et non pas être affaiblie. Ces considérations suggèrent que les computations associationnistes portant indifféremment sur les syllabes et sur les silences ne peuvent pas expliquer les résultats présentés ici.

9.6.3 Expérience 27 : Simulations avec un Simple Recurrent Network

Dans cette section, j'illustrerai la conclusion que les modèles associationnistes ne peuvent pas expliquer la préférence pour les mots de classe avec un Simple Recurrent Network (SRN ; Elman, 1990) ; j'ai choisi ce réseau parce qu'il est fréquemment utilisé et parce qu'il est relativement simple. Ceci n'implique pas que les mécanismes associationnistes sau-

raient être réduits aux SRNs ; les considérations dans la section précédente montrent cependant que d'autres mécanismes associationnistes devraient se comporter de la même manière que les SRNs par rapport à mes expériences.

Nous avons vu les principes de base d'un SRN dans la section 2.3 (page 28). De tels modèles peuvent apprendre des séquences temporelles en prédisant l'élément suivant dans une séquence ; dans les cas de mes expériences, le réseau devait apprendre à prédire les syllabes dans les flux de familiarisation et ont été testé ensuite avec les items de test. Pendant la phase de test, le réseau 'entendait' deux syllabes d'un item de test et devait prédire la troisième.

Dans le reste de cette section, je me suis demandé si un SRN peut apprendre d'accepter les mots de classe quand le flux de familiarisation est segmenté. Afin d'échantillonner l'espace des paramètres du modèle, j'ai étudié cette question grâce à 24.000 simulations avec deux SRNs différents. Je n'ai pas essayé de simuler le rôle de la durée de familiarisation parce qu'il n'y a pas de relation évidente entre la quantité d'exposition que ce type de réseau requiert pour apprendre une tâche et la quantité des vrais sujets requièrent.

Architecture et entraînement

Les syllabes étaient représentées comment des vecteurs binaires orthonormaux par paires de neuf ou 10 dimensions (en fonction des simulations). Les réseaux 'entendaient' des 'séquences de syllabes' dans ce format dont les propriétés statistiques étaient les mêmes que dans les flux des expériences rapportés dans ce chapitre ; tous les flux contenaient 100 répétitions de chaque mot, à savoir 900 mots au total. Le réseau a été entraîné avec l'algorithme de rétro-propagation de prédire l'élément suivant dans les séquences.

Quatre flux de syllabes différents ont été utilisés ; la différence entre ces flux était la présence ou l'absence des 'silences' entre les mots et la manière dont les silences ont été représentés. Un flux était continu, comme lors de l'expérience 18. Dans deux autres flux, les silences étaient représentés par des vecteurs de longueur 0 (appelés des 'vecteurs 0') . Dans un de ces flux, le réseau devait prédire le vecteur 0 lui-même, dans l'autre il avait à prédire la syllabe A *suivant* le vecteur 0. En d'autres termes, dans la sous-séquence $A_i X^\mu C_i 0 A_j X^\nu C_j \ldots$, le reseau devait prédire ou bien le silence (c'est-à-dire le '0') ou bien l'A_j après le silence. Dans le quatrième flux, les silences étaient représentés par un neurone supplémentaire. Dans la moitié des simulations avec ce-dernier flux, les silences n'ont pas été inclus lors de la phase de test alors qu'ils ont été inclus dans les autres simulations. J'ai utilisé deux réseaux, un avec cinq neurones cachés et un autre avec 27 neurones cachés. Afin d'échantillonner l'espace des paramètres du réseau, j'ai utilisé 120 combinaisons différentes de taux d'apprentissage et de cycles d'entraînement. Pour chaque combinaison, j'ai lancé 20 simulations, représentant 20 sujets. Pendant la phase de test, le réseau devait prédire la troisième syllabe des items de test à partir des deux première syllabes ; en d'autres termes, si les syllabes d'un item de test étaient $\sigma_1\sigma_2\sigma_3$, le réseau entendait $\sigma_1\sigma_2$ et devait prédire σ_3. Dans la moitié des simulations avec un neurone supplémentaire représentant les silences, les items de test avaient quand même la forme $\sigma_1\sigma_2\sigma_3$; dans les autres simulations, le réseau entendait $\#\sigma_1\sigma_2$ et devait prédire σ_3.

J'ai utilisé le succès lors des prédictions pour un type d'items de test (par exemple pour les mots de classe) comme mesure de la familiarité du réseau avec cet item de test. Même si la tâche de prédiction n'est probablement pas un modèle psychologique des tâches dans mes expériences, je m'intéresse seulement à la performance *relative* pour les différents types d'items de test (par exemple pour les mots de classe et les mots partiels) que je considère comme une mesure de la familiarité relative du modèle avec ces types d'items de test. Les détails des simulations peuvent être trouvés dans l'annexe B.

Results

Les résultats critiques sont les performances relatives pour les mots de classe, les mots de règle et les mots partiels ; je présenterai donc seulement ces interactions. J'identifierai la performance relative pour deux types d'items de test avec la préférence des réseaux pour un des types. Pour l'interprétation des résultats suivants, il convient de se rappeler que les mots partiels peuvent être de deux types. On peut choisir ou bien une syllabe du premier mot et deux syllabes du deuxième mot ('type 12') ou bien deux syllabes du premier mot et une syllabe du deuxième mot ('type 21'). Cette distinction est importante parce que ces types des mots partiels ont différentes lignes de base (voir annexe B pour plus de détails).

La figure 9.7 montre les résultats pour le réseau avec cinq neurones cachés et la figure 9.8 pour le réseau avec 27 neurones cachés. Les couleurs représentent les valeurs de F des comparaisons entre les types d'items de test (par exemple entre les mots de règle et les mots de classe). Des régions rouges et bleues indiquent, respectivement, que la performance était meilleure pour les premier ou le deuxième type d'items de test d'une comparaison (c'est-à-dire les valeurs de F d'une comparaison ont été multipliées par –1 si la performance était meilleure pour le deuxième type d'items de test). La valeur de F correspondant à $p = 0.05$ est ± 4.1 ; pour une meillure présentation, les valeurs absolues de toutes les valeurs de F dont la valeur absolue dépassait 18.9 (correspondant à $p = 0.0001$), y compris l'infinité, ont été remplacées par 18.9.

Chaque ligne montre une comparaison particulière entre des types d'items de test (du haut vers le bas) : mots de classe versus mots partiels de type 12 ('CW vs. PW12'), mots de classe versus mots partiels de type 21 ('CW vs. PW21'), mots de règle versus mots de classe ('RW vs. CW') et mots partiels de type 12 versus mots partiels de type 21 ('PW12 vs. PW21'). Chaque colonne représente un type de simulation particulier (de gauche à droit) : simulations avec un flux continu ('continuous'), avec un flux où les

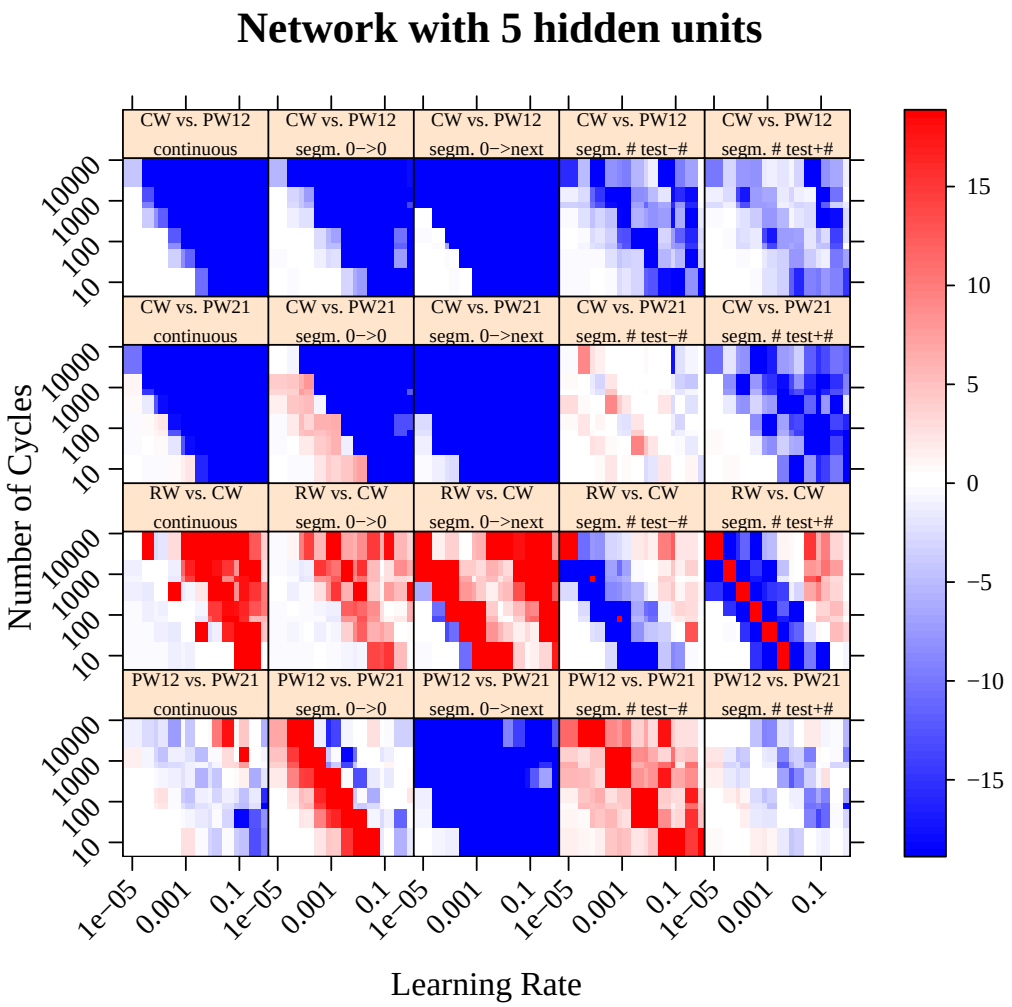


FIG. 9.7 – Résultats des simulations avec un Simple Recurrent Network avec (SRN) cinq unités cachées. Chaque ligne montre une comparaison particulière entre des types d'items de test (mots de classe versus mots partiels de type 12, mots de classe versus mots partiels de type 21, mots de règle versus mots de classe et mots partiels de type 12 versus mots partiels de type 21) ; chaque colonne représente un type de familiarisation particulier (voir le texte pour plus de détails). Les couleurs encodent les valeurs de F (multipliées par le signe approprié) ; ± 4.1 correspond à $p = 0.05$ et ± 18.9 à $p = 0.0001$. Les tons rouges et bleus indiquent que la performance était meilleure pour le premier et le deuxième type d'items d'une comparaison, respectivement. Les résultats critiques sont que les réseaux préfèrent en général les mots de classe aux mots partiels des deux types (ou n'avaient pas de préférence dans certaines simulations) et qu'ils préfèrent les mots de règle aux mots de classe.

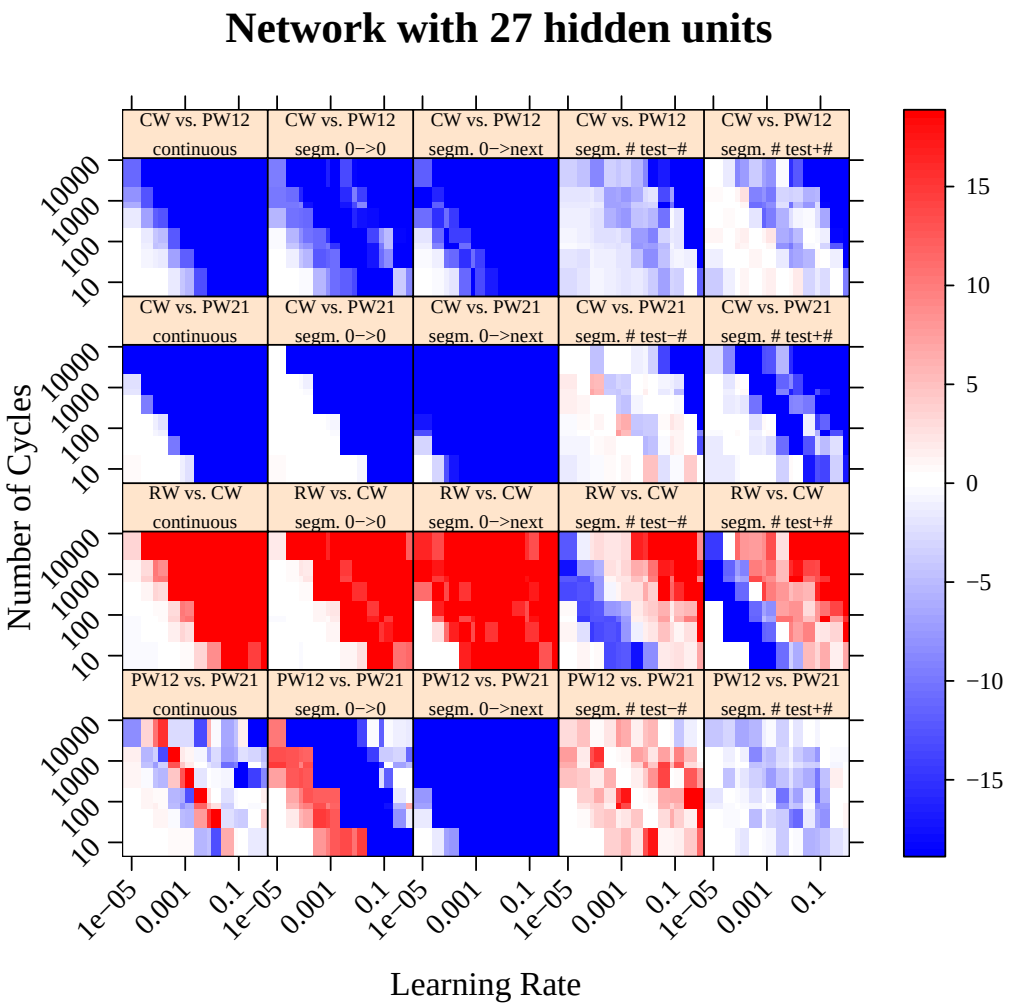


FIG. 9.8 – Résultats des simulations Simulations avec un Simple Recurrent Network (SRN) avec 27 unités cachées. Chaque ligne montre une comparaison particulière entre des types d'items de test (mots de classe versus mots partiels de type 12, mots de classe versus mots partiels de type 21, mots de règle versus mots de classe et mots partiels de type 12 versus mots partiels de type 21) ; chaque colonne représente un type de familiarisation particulier (voir le texte pour plus de détails). Les couleurs encodent les valeurs de F (multipliées par le signe approprié) ; ± 4.1 correspond à $p = 0.05$ et ± 18.9 à $p = 0.0001$. Les tons rouges et bleus indiquent que la performance était meilleure pour le premier et le deuxième type d'items d'une comparaison, respectivement. Les résultats critiques sont que les réseaux préfèrent en général les mots de classe aux mots partiels des deux types (ou n'avaient pas de préférence dans certaines simulations) et qu'ils préfèrent les mots de règle aux mots de classe.

silences sont représentés par un vecteur 0 et le réseau doit prédire le vecteur 0 ('segm. 0->0'), avec un flux où les silences sont également représenté par un vecteur 0 mais le réseau doit prédire la syllabe *suivante* le vecteur 0 ('segm. 0->next') ainsi qu'avec un flux où les silences sont représentés par un symbole supplémentaire (#) ; dans la moitié des simulations avec ce-dernier flux, le silence n'était pas inclus dans les items de test ('segm. test−#') tandis qu'il était inclus dans l'autre moitié des simulations ('segm. # test+#').

Les résultats pour les deux réseaux sont très similaires, je les discuterai donc ensemble. La première ligne montre que les réseaux étaient généralement beaucoup meilleurs pour les mots partiels de type 12 que pour les mots de classe ; quand ceci n'était pas le cas, il n'y avait pas de différence. Il est intéressant de noter que l'avantage pour les mots partiels a été observé aussi bien quand les flux étaient segmentés que quand ils étaient continus. La deuxième ligne montre qu'également les mots partiels de type 21 sont généralement traités mieux que les mots de classe[10]. Il semble donc que les réseaux préfèrent les mots partiels des deux types aux mots de classe.

La troisième ligne montre la performance relative pour les mots de règle et les mots de classe. Dans les simulations où les silences n'étaient pas représentés par un symbole supplémentaire, les réseaux étaient meilleurs pour les mots de classe que pour les mots partiels ; en d'autres termes, ils pouvaient exploiter la TP entre la première et la dernière syllabe. Les simu-

[10]Dans certaines simulations avec le réseau avec cinq neurones cachés et un flux où les silences étaient représentés par un vecteur 0 que le réseau devait prédire, j'ai observé un avantage pour les mots de classe. Or, les valeurs de p correspondant étaient proches du seuil de significativité (0.05) — ce qui est à contraster avec la valeur p médiane de 5.9×10^{-8} quand la performance était meilleure pour les mots partiels de type 21. Comme ma méthode d'évaluation exagère les différences proche du hasard, il semble raisonnable que ces différences marginales soient en réalité du bruit. Les mêmes considérations s'appliquent aux simulations avec des avantages marginaux pour les mots de classe qui ont été observé dans les simulations où les silences étaient représentés par un symbole supplémentaire et les silences n'étaient pas inclus lors de la phase de test.

lations où les silences étaient représentés par un symbole supplémentaire n'ont pas d'interprétation claire. Dans les simulations avec le réseau avec cinq neurones cachés, les valeurs de p significatives étaient ou bien relativement grandes par rapport aux autres simulations (c'est-à-dire proches du seuil de significativité) ou bien 0 ; ceci suggère que les réseaux n'avaient ou bien pas de préférence pour aucun des items ou bien qu'ils étaient tellement en-dessous du hasard pour un des items que toutes les différences ont été considérées comme infinies par le schéma d'encodage[11]. Les résultats pour le réseau avec 27 neurones cachés étaient similaires (quoique avec moins de valeurs de p de 0), mais le réseau préférait les mots de règle aux mots de classe systématiquement pour des taux d'apprentissage et nombres de cycles d'entraînement élevés. Les réseaux préféraient donc les mots de règle aux mots de classe, mais ils étaient perturbés par le symbole supplémentaire pour les silences.

La quatrième ligne montre qu'un SRN prédit des différences entre les deux types de mots partiels, ce que je n'ai observé dans aucune expérience.

[11]Les valeurs de p étaient considérées comme zéro si la variance d'un des items de test étaient zéro ; la différence correspondante peut être considérée comme infinie dans ce cas. Les valeurs de p de zéro apparaissaient quand le réseau ne prédisait aucun item de test correctement ; ceci était plus fréquent pour les mots de règle que pour les mots de classe parce que les mots de classe donnent au réseau deux occasions de plus de prédire une syllabe non-incorrecte par rapport aux mots de règle : le réseau prédisait relativement systématiquement un silence comme troisième syllabe aussi bien pour les mots de règle que pour les mots de classe, probablement parce que les silences suivent chacune des syllabes constituant les items de test (quoique non pas immédiatement). Au moins une sortie prédite était donc fausse relativement systématiquement. Comme il y a trois syllabes finales possibles pour les mots de classe mais une seule pour les mots de règle, les mots de classe donnent aux réseaux deux occasions de plus de faire au moins une prédiction correcte, et donc d'avoir un cosinus fini. Pour les mots de règle, par contre, le cosinus est 0 dès que le réseau prédit le silence (erroné). Comme le réseau prédisait les silences relativement systématiquement, il n'est pas surprenant de trouver quelques simulations sans variance. Ceci était la raison pour laquelle le réseau était meilleur pour les mots de classe que pour les mots de règle dans ces simulations — alors que sa performance était en réalité en-dessous du hasard pour les deux types d'item.

Résumé

Les réseaux préféraient les mots partiels aux mots de classe montrant ainsi précisément l'inverse du comportement des sujets quand ces-derniers ont été familiarisés avec les flux segmentés. Les réseaux préféraient également les mots de règle aux mots de classe, confirmant ainsi leur sensitivité aux TPs entre syllabes non-adjacentes. De plus, sauf quand les silences étaient représentés par un symbole supplémentaire, il n'y avait pas d'effet clair des silences dans les flux de familiarisation sur la performance relative pour les mots de classe, les mots partiels et les mots de règle ; le rajout d'un symbole supplémentaire pour le silence semble simplement perturber les computations statistiques — aussi bien pour la performance relative pour les mots de classe et les mots partiels que pour la performance relative pour les mots de règle et les mots de classe. Comme les sujets dans mes expériences préféraient les mots de règle aux mots de classe sous toutes les conditions de familiarisation, il semble raisonnable de conclure que les silences ne perturbent pas les mécanismes *psychologiques* responsables de mes résultats.

Ensemble avec les considérations de la section précédente, les simulations suggèrent que les calculs de TP avec (ou sans) les silences ne fournissent pas de modèle capable d'expliquer mes résultats (ou ceux de Peña et al., 2002). Il semble donc que tout mécanisme censé expliquer la préférence pour les mots de classe doit comprendre au moins une certaine notion de *variables* et de *classes de syllabes* dont doivent faire partie les valeurs de ces variables. De plus, la notion des variables doit être plus générale que des 'slots' ordonnés dans une séquence de syllabes car Peña et al. (2002, footnote 29) ont montré que les généralisations ne sont pas équivalentes à des contingences de bas niveau entre syllabes comme les associations retardées ou les positions ordinales dans les mots.

Avec les notions des variables et des classes, le modèle pourrait apprendre à choisir les valeurs des variables par des opérations statistiques

ou non-statistiques. Tout de même, mes résultats montrent que le mécanisme d'apprentissage correspondant a une *dynamique* très différente des mécanismes qui calculent les associations entre les syllabes.

9.7 Discussion intermédiaire

Les expériences rapportées dans ce chapitre ont étudié la question de savoir quelles représentations peuvent être extraites d'un flux de parole quasiment continu. Les résultats suggèrent que, lorsque les sujets sont familiarisés avec un flux de parole continu, ils peuvent apprendre que la première ainsi que la dernière syllabe de chaque mot fonctionnent comme des variables qui sont quantifiées sur des classes de syllabes distinctes ; les classes sont constituées des syllabes qui peuvent apparaître dans ces positions respectives. En d'autres termes, les sujets ont appris des régularités de la forme A $\in$ {pu, be, ta} et C $\in$ {ki, ga, du}, où A et C sont des variables positionnelles dans les mots de la forme AXC ; des régularités faisant appel à des classes sont omniprésentes en syntaxe, par exemple la régularité qu'un membre arbitraire de la classe des noms peut remplir le slot de 'sujet' dans une phrase.

On peut s'interroger sur la nature de ces généralisations ainsi que sur le rôle des indices de segmentation subliminaux. Par exemple, ces généralisations pourraient refléter des computations en morphologie ou syntaxe. Apprendre les syllabes qui peuvent apparaître en fin ou début de mot ressemble par exemple l'affixation en morphologie. Ou, en syntaxe, les généralisations pourraient être liées à l'hypothèse du 'bracketing' (voir par exemple Morgan, 1986). Cette hypothèse repose sur l'observation que les stimuli auxquels sont exposés les jeunes enfants ne sont pas de chaînes de mots comme c'est souvent le cas dans le cadre de la théorie de l'apprénabilité mais des stimuli *structurés* ; la prosodie pourrait par exemple donner des indications sur les bouts de son qui forment les *constituants*. Morgan (1986) a montré que les hypothèses sur la complexité des phrases que les

enfants doivent savoir traiter pour apprendre une langue peuvent être relâchées si les enfants reçoivent des stimuli structurés et non pas simplement des chaînes de mots. Les silences dans mes expériences pourraient également être des 'marqueurs' définissant la portée d'une analyse et simplifiant ainsi l'extraction de régularités 'syntactiques'. De tels marqueurs pourraient être nécessaires pour apprendre des régularités faisant appel à des classes de mots dans un signal de parole.

Alternativement, les silences pourraient être requis pour induire des classes d'une analyse distributionnelle. Pour qu'une telle analyse puisse réussir, des indices multiples et convergeants semblent être nécessaires (voir par exemple Mintz, 2002). Les silences pourraient être des indices suffisants pour qu'une analyse distributionnelle puisse réussir. Ceci suggère qu'une analyse distributionnelle pourrait ne pas être suffisante en soi pour induire des classes de mots, mais qu'elle pourrait nécessiter un guidage par des indices spécifiques comme les silences subliminaux dans mes expériences.

Indépendamment de si les généralisations ont un rapport avec un langage, on retrouve la distinction qui était déjà à la base des expériences rapportées dans les parties 3 et 4 : les généralisations pourraient refléter ou bien un mécanisme symbolique général opérant sous une variété de conditions d'entrée ou bien un mécanisme plus spécifique limité aux positions de bord — étant donné que les syllabes critiques (c'est-à-dire les syllabes A et C) étaient précisément dans ces positions. Cette-dernière possibilité expliquerait également pourquoi la préférence pour les mots de classe décroît pour de longues durées de familiarisation car les sujets pourraient apprendre d'abord les syllabes en PDB à cause de leur saillance tandis que l'importance relative des représentations des syllabes dans les autres positions pourrait augmenter plus tard[12].

[12]Ceci n'implique pas que les sujets ignorent les syllabes en milieu de mot après des expositions brèves. En effet, Peña et al. (2002) ainsi que Peña (2003) ont montré que les sujets préfèrent les mots de familiarisation aux mots partiels après une familiarisation avec

Dans le chapitre suivant, j'étudierai la possibilité que les généralisations pourraient être limitées aux PDBs. Lors des expériences rapportées dans le présent chapitre, les sujets devaient apprendre que les syllabes A et C devaient appartenir à des classes différentes dans les mots de la forme $\mathbf{A}_i$X$\mathbf{C}_i$; les syllabes critiques étaient donc en position initiale et finale. Dans le chapitre suivant, les sujets devront apprendre des régularités similaires — c'est-à-dire que les syllabes A et C doivent appartenir à des classes distinctes ; ils doivent apprendre ces régularités ou bien dans des mots de la forme $\mathbf{A}_i$XYZ$\mathbf{C}_i$ (où les syllabes critiques sont en PDB) ou bien dans des mots de la forme X$\mathbf{A}_i$Y$\mathbf{C}_i$Z (où les syllabes critiques sont en milieu de mot).

un flux continu de deux minutes mais pas les mots de règle aux mots partiels ; comme l'unique différence entre les mots de familiarisation et les mots de règle est leur syllabe au milieu, les sujets doivent avoir prêté attention à le syllabe au milieu tôt pendant la familiarisation.

Chapitre 10

Extraction des classes en PDB et milieu de mot

Ce chapitre étudiera les mécanismes psychologiques des généralisations faisant appel aux classes de syllabes observées dans le chapitre précédent. S'agit-il d'opérations symboliques générales — à l'instar de l'inférence scientifique ou des opérations dans un ordinateur — ou s'agit-il d'opérations plus spécialisées et limitées susceptibles d'être affectées par des facteurs perceptifs ? Pour répondre à ces questions, il convient de noter que les syllabes critiques pour la règle des classes apparaissaient en position de bord (PDB) — les sujets devaient apprendre que la première et la dernière syllabe d'un mot devaient appartenir à des classes distinctes (par exemple que A $\in$ {pu, be, ta}). Dès lors, on peut se poser la question de savoir si de telles généralisations sont possibles uniquement en PDB ou également en milieu de mot. Pour répondre à cette question, les sujets devaient extraire l'analogue de la règle des classes entre les syllabes A et C dans les mots de la forme $\mathbf{A}_i$XYZ$\mathbf{C}_i$ (où les syllabes critiques sont en PDB ; expérience 28) ou dans des mots de la forme X$\mathbf{A}_i$Y$\mathbf{C}_i$Z (où les syllabes critiques sont en milieu de mot ; expérience 29) après une familiarisation avec des flux segmentés. L'expérience 30 étaient une réplication de ces expériences en familiarisant les sujets avec des flux *continus*. L'expérience 31 a étudié la question de savoir si les sujets peuvent faire des

calculs statistiques en milieu de mot ; pour cela, ils ont dû choisir entre les mots de règle et les mots de classe quand les syllabes critiques (c'est-à-dire les syllabes A et C) étaient en milieu de mot.

10.1 Expérience 28 : Généralisations en PDB

10.1.1 Matériels et Méthodes

Cette expérience a étudié la question de savoir si les sujets peuvent extraire une régularité faisant appel à des classes de syllabes avec des mots plus longs quand les syllabes critiques sont en PDB. Plus spécifiquement, les sujets devaient apprendre que les syllabes A et C devaient appartenir à des classes distinctes dans les mots de la forme $\mathbf{A}_i$XYZ$\mathbf{C}_i$. Les syllabes A et C venaient de quatre familles $\mathrm{A}_i \ldots \mathrm{C}_i$ différentes (exactement comme les syllabes A et C dans les mots de la forme $\mathrm{A}_i\mathrm{XC}_i$ du chapitre précédent venaient de trois familles différentes ; il était nécessaire d'utiliser quatre familles au lieu d'en utiliser trois afin de pouvoir construire les mots de classe). Les syllabes X, Y et Z étaient de syllabes de remplissage (exactement comme la syllabe X dans les mots de la forme $\mathrm{A}_i\mathrm{XC}_i$). La TP entre la première et la dernière syllabe était 1.0 tandis que toutes les autres TPs étaient plus petites (voir tableau 10.2).

Pour construire cette expérience, il s'est avéré nécessaire de procéder à certains changements par rapport aux expériences du chapitre précédent. D'abord, j'ai choisi d'autres syllabes pour que les mots ne commencent pas exclusivement par des consonnes stop. Deuxièmement, il faillait choisir une autre distribution positionnelle des syllabes afin de pouvoir construire les mots de classe ; j'ai choisi quatre familles $\mathrm{A}_i \ldots \mathrm{C}_i$ au lieu de trois familles dans les expériences précédentes. Trois syllabes différentes et mutuellement exclusives pouvaient apparaître dans les positions X, Y et Z (voir tableau 10.1). Afin de limiter le nombre de mots possibles, chaque syllabe X pouvait être suivie seulement de *deux* des trois syllabes Y ; de même, chaque syllabe Y pouvait être suivie seulement de deux syllabes Z

(voir la figure 10.1). Grâce à cette modification, le nombre de mots pouvait être limité à 48. Les TPs entre les syllabes X et Y ainsi qu'entre les syllabes Y et Z étaient donc 0.5. Troisièmement, il s'est avéré que les silences subliminaux n'étaient pas suffisants pour induire les généralisations avec les mots pentasyllabiques ; afin d'observer des généralisations robustes, j'ai dû recourir à des silences nettement perceptibles d'au moins 500 ms au lieu des silences de 25 ms des expériences précédentes. J'ai finalement choisi des silences de 1 s, mais mes expériences pilotes montrent que les résultats ne changeraient pas avec des silences de 500 ms.

TAB. 10.1 – Syllabes utilisées lors de l'expérience 28

A	X	Y	Z	C
ba	fa	do	bo	de
fu	Re	ly	gu	gi
my	zu	ne	zi	lo
Ri				na

$$\begin{array}{ccccc} X_1 & \rightarrow & Y_2 & \rightarrow & Z_1 \\ & & & \rightarrow & Z_3 \\ & \rightarrow & Y_3 & \rightarrow & Z_1 \\ & & & \rightarrow & Z_2 \end{array}$$

FIG. 10.1 – Principe des transitions entre les syllabes de remplissage (XYZ) lors de l'expérience 28. Toute syllabe X pouvait être suivie de deux syllabes Y et toute syllabe Y pouvait être suivie de deux syllabes Z.

Sujets

Quatorze sujets français (sept femmes, sept hommes, âgés de 19 à 34 ans pour un âge moyen de 24.2 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

TAB. 10.2 – TPs entre les syllabes utilisées lors de l'expérience 28. Les lettres entre parenthèses indiquent les syllabes 'cibles' des TPs. Dans 'X' dans la première colonne de la première ligne indique par exemple que la TP de premier ordre partant d'une syllabe A 'aboutit' sur une syllabe X.

Ordre des TPs ('syllabe cible')	A	X	Y	Z	C
1	0.33 (X)	0.5 (Y)	0.5 (Z)	0.25 (C)	0.33 (A′)
2	0.33 (Y)	2×0.25 1×0.5 (Z)	0.25 (C)	†0.25 (A′)	†0.33 (C′)
3	0.33 (Z)	0.25 (C)	†0.25 (A′)	†0.33 (X′)	†0.33 (Y′)
4	1.0 (C)	†0.25 (A′)	†0.33 (X′)	†0.33 (Y′)	†0.33 (Z′)

†Ces valeurs représentent les moyennes des TPs entre ces positions avec une certaine variabilité. Il s'est avéré impossible d'équilibrer toutes les TPs entre deux positions exactement compte tenu des autres contraintes. Par exemple, chaque mot apparaissait exactement deux fois, les syllabes ne pouvaient pas faire partie de deux mots consécutifs etc. Aucune de ces TPs n'approchait 1.0 de sorte que la TP entre la première et la dernière syllabe était bien unique.

Familiarisation

Les sujets ont été familiarisés avec un flux de 3.45 min contenant deux répétitions de chacun des 48 mots ; aucune syllabe ne pouvait être utilisée en deux mots consécutifs. Les sujets ont été informés qu'ils entendraient un monologue en martien et qu'ils devraient découvrir les mots martiens qu'il contenait.

Test

Les sujets devaient choisir entre les mots de classe et les mots partiels ; ils devaient décider laquelle de ces alternatives était un mot martien. Les mots de classe avaient la forme $A_iX'YZ'C_j$ (où X′ et Z′ ne sont jamais apparues dans leurs positions respectives parce qu'elles étaient des syllabes A et C, respectivement) ; les syllabes A_i, C_j, X′ et Z′ provenaient de quatre familles différentes (les familles étant les combinaison entre les syllabes A et C). Je n'ai utilisé que deux types de mots partiels, à savoir $Y^{\mu}Z^{\mu}C_iA_jX^{\nu}$ ainsi que $Z^{\mu}C_iA_jX^{\nu}Y^{\nu}$. Il y avait 24 paires de test. Dans chaque paire, le

mot de classe partageait les syllabes A, C et Y avec le mot partiel. La moitié des essais commençait avec un mot de classe et l'autre moitié avec un mot partiel. La table 10.3 montre les paires de test retenues.

TAB. 10.3 – Paires de test utilisées lors de l'expérience 28

Mot de classe	Mot partiels	Type de mot de classe	Type de mot partiel
bamydonade	dogudebafa	$A_iA_jYC_kC_l$	$Y^\mu Z^\mu C_iA_jX^\nu$
Rilodofugi	dogugiRiRe	$A_iC_jYA_kC_l$	$Y^\mu Z^\mu C_iA_jX^\nu$
badelyRigi	lygugibaRe	$A_iC_jYA_kC_l$	$Y^\mu Z^\mu C_iA_jX^\nu$
Rimydofulo	ziloRizudo	$A_iA_jYA_kC_l$	$Z^\mu C_iA_jX^\nu Y^\nu$
fugidoRilo	dogulofufa	$A_iC_jYA_kC_l$	$Y^\mu Z^\mu C_iA_jX^\nu$
bafunemyna	nezinabazu	$A_iA_jYA_kC_l$	$Y^\mu Z^\mu C_iA_jX^\nu$
mylolynade	lygudemyzu	$A_iC_jYC_kC_l$	$Y^\mu Z^\mu C_iA_jX^\nu$
bagineRide	gudebafane	$A_iC_jYA_kC_l$	$Z^\mu C_iA_jX^\nu Y^\nu$
bafulynagi	zigibafaly	$A_iA_jYC_kC_l$	$Z^\mu C_iA_jX^\nu Y^\nu$
myRilydelo	lygulomyzu	$A_iA_jYC_kC_l$	$Y^\mu Z^\mu C_iA_jX^\nu$
Ridenegilo	neboloRiRe	$A_iC_jYC_kC_l$	$Y^\mu Z^\mu C_iA_jX^\nu$
fulolygina	gunafufaly	$A_iC_jYC_kC_l$	$Z^\mu C_iA_jX^\nu Y^\nu$
fubalygina	lygunafuRe	$A_iA_jYC_kC_l$	$Y^\mu Z^\mu C_iA_jX^\nu$
mybanedena	gunamyzune	$A_iA_jYC_kC_l$	$Z^\mu C_iA_jX^\nu Y^\nu$
Ribanemyde	nezideRifa	$A_iA_jYA_kC_l$	$Y^\mu Z^\mu C_iA_jX^\nu$
fuRinemylo	gulofuzune	$A_iA_jYA_kC_l$	$Z^\mu C_iA_jX^\nu Y^\nu$
Ridenelogi	gugiRifane	$A_iC_jYC_kC_l$	$Z^\mu C_iA_jX^\nu Y^\nu$
bagidodena	bonabaRedo	$A_iC_jYC_kC_l$	$Z^\mu C_iA_jX^\nu Y^\nu$
myfudobana	dozinamyfa	$A_iA_jYA_kC_l$	$Y^\mu Z^\mu C_iA_jX^\nu$
myRilyfulo	zilomyRely	$A_iA_jYA_kC_l$	$Z^\mu C_iA_jX^\nu Y^\nu$
mynadobade	bodemyzudo	$A_iC_jYA_kC_l$	$Z^\mu C_iA_jX^\nu Y^\nu$
Rimydolode	bodeRiRedo	$A_iA_jYC_kC_l$	$Z^\mu C_iA_jX^\nu Y^\nu$
funadobagi	zigifuRedo	$A_iC_jYA_kC_l$	$Z^\mu C_iA_jX^\nu Y^\nu$
funanelogi	nezigifuRe	$A_iC_jYC_kC_l$	$Y^\mu Z^\mu C_iA_jX^\nu$

10.1.2 Résultats et discussion

Comme le montre la figure 10.2, les sujets préféraient les mots de classe aux mots partiels (63.7±9.9%, $t(13) = 5.2$, $p < 0.0002$) ; il n'y avait pas de différence entre les préférences pour les mots de classe en fonction du type de mot partiel présent dans une paire de test ($t(13) = -0.2$, $p = 0.813$, test

apparié).

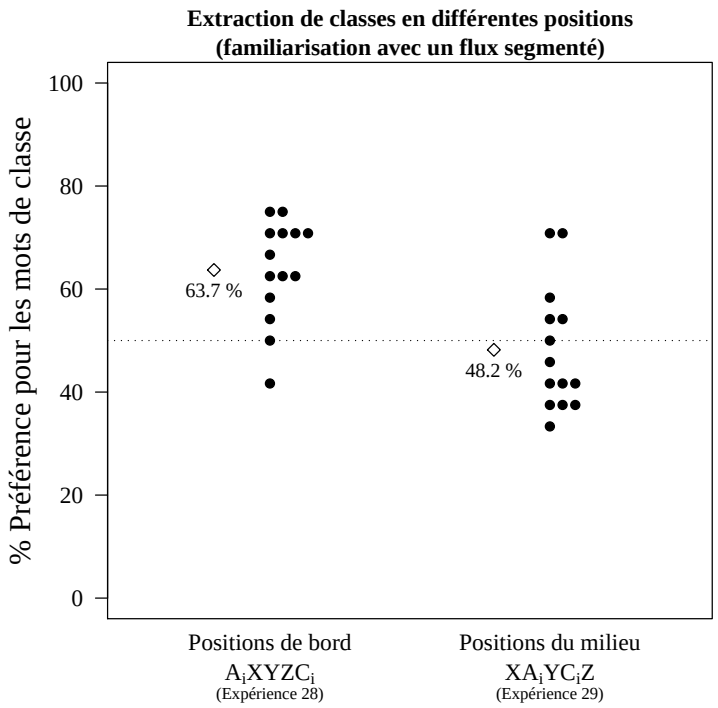


FIG. 10.2 – Résultats des expériences 28 et 29. Quand ils sont familiarisés avec des flux segmentés, les sujets apprennent la règle des classes quand les syllabes critiques sont en PDB (expérience 28) mais pas quand elles sont en milieu de mot (expérience 29).

10.2 Expérience 29 : Généralisations en milieu de mot

10.2.1 Matériels et méthodes

L'expérience 29 était identique à l'expérience 28 sauf que les sujets devaient apprendre que les syllabes A et C devaient appartenir à des classes différentes dans des mots de la forme X$\mathbf{A}_i$Y$\mathbf{C}_i$Z. De nouveau, la particularité de la relation entre chaque A_i et C_i était que la TP entre ces syllabes

était 1.0. Afin d'éviter des mots français dans les stimuli, /na/ a été utillisée comme syllabe Z et non pas comme syllabe C, /zi/ comme syllabe C et non pas comme syllabe Z, /fa/ comme syllabe Z et non pas comme syllabe X et /gu/ comme syllabe X et non pas comme syllabe Z. Le pattern des TPs dans ces mots est résumé dans le tableau 10.4.

TAB. 10.4 – TPs entre les syllabes utilisées lors de l'expérience 29 (voir le tableau 10.4 pour plus de détails).

Ordre des TPs ('syllabe cible')	A	X	Y	Z	C
1	0.25 (A)	0.33 (Y)	0.25 (C)	0.33 (Z)	†0.33 (A′)
2	0.5 (Y)	1.0 (C)	0.5 (Z)	†0.33 (X′)	†0.25 (A′)
3	0.25 (C)	0.33 (Z)	†0.33 (X′)	†0.33 (A′)	†0.33 (Y′)
4	2×0.25 1×0.5 (Z)	†0.33 (X′)	†0.25 (A′)	†0.33 (Y′)	†0.25 (C′)

†Ces valeurs représentent les moyennes des TPs entre ces positions avec une certaine variabilité. Il s'est avéré impossible d'équilibrer toutes les TPs entre deux positions exactement compte tenu des autres contraintes. Par exemple, chaque mot apparaissait exactement deux fois, les syllabes ne pouvaient pas faire partie de deux mots consécutifs etc. Aucune de ces TPs n'approchait 1.0 de sorte que la TP entre la première et la dernière syllabe était bien unique.

Les mots de classe avaient la forme $X'A_iYC_jZ'$, où X' et Z' étaient en réalité des syllabes A et C et ne sont donc jamais apparues en position initiale ou finale. A_i et C_j provenaient de deux familles différentes mais apparaissaient dans les positions dans lesquelles elles ont été rencontrées lors de la familiarisation ; par conséquent, les seules syllabes qui apparaissaient en leurs positions correctes étaient A_i, Y et C_j. A_i et C_j appartenaient cependant à des familles différentes ; les TPs entre les syllabes A et C étaient donc détruites. Les mots de classe pouvaient avoir une des structures suivantes : $A_iA_jYC_kA_l$, $A_iA_jYC_kC_l$, $C_iA_jYC_kA_l$ ou $C_iA_jYC_kC_l$; chacune de ces structures apparaissait autant que les autres dans les paires de test.

Les mots partiels retenus étaient de la forme $C_iZ^{\mu}X^{\nu}A_jY^{\nu}$ ainsi que

$Y^{\mu}C_iZ^{\mu}X^{\nu}A_j$; les syllabes A, C et Y étaient partagées par le mot de classe et le mot partiel dans chaque paire de test. Certaines transitions entre les syllabes X et Z dans les mots partiels étaient plus fréquentes que d'autres ; j'ai donc inclus la fréquence de ces transition dans l'analyse des résultats en formant un groupe 'fréquent' avec une TP moyenne entre X et Z de 0.416 et un groupe 'rare' avec une TP moyenne entre X et Z de 0.168[1]. La table 10.5 montre les paires de test.

10.2.2 Résultats

Comme le montre la figure 10.2, les sujets n'avaient aucune préférence pour les mots de classe (48.2±12.1%, $t(13) = -0.6$, $p = 0.59$, ns) ; il n'y avait pas de différence entre les préférences pour les mots de classe en fonction du type de mot partiel présent dans une paire de test ($F(1,13) = 1.3$, $p = 0.269$, ns ; ANVOA à mesures répétées) ni de la fréquence des transitions dans les mots partiels ($F(1,13) = 1.4$, $p = 0.264$, ns) ni une interaction entre ces deux facteurs ($F(1,13) < 0.01$, $p = 0.928$).

La préférence pour les mots de classe était plus élevée lors de l'expérience 28 que lors de l'expérience 29 ($F(1,26) = 13.8$, $p < 0.001$).

10.2.3 Discussion

Les expériences 28 et 29 ont étudié la question de savoir si l'extraction des classes de syllabes d'un flux quasiment continu est limitée aux PDBs, ou si elle peut être observée également en milieu de mot. Pour cela, les sujets devaient apprendre que les syllabes A et C devaient appartenir à des classes différentes dans les mots de la forme $\mathbf{A}_i$XYZ$\mathbf{C}_i$ (où les syllabes critiques sont en PDB ; expérience 28) ou dans les mots de la forme X$\mathbf{A}_i$Y$\mathbf{C}_i$Z (où les syllabes critiques sont en milieu de mot ; expérience 29).

[1]Il s'est avéré impossible de générer un flux avec seulement deux répétitions de chaque mot où toutes les TPs soient les mêmes, mais, comme on verra lors de la présentation des résultats, la différence entre les TPs n'avait aucune influence sur la préférence (inexistante) pour les mots de classe.

TAB. 10.5 – Paires de test utilisées lors de l'expérience 29

Mot de classe	Mot partiel	Type de mot de classe	Type de mot partiel	TP Z → X
giRidolofu	dolofaguRi	$C_iA_jYC_kA_l$	$Y^\mu C_i Z^\mu X^\nu A_j$	high
baRilygide	lygifazuRi	$A_iA_jYC_kC_l$	$Y^\mu C_i Z^\mu X^\nu A_j$	high
Rifudologi	dolofagufu	$A_iA_jYC_kC_l$	$Y^\mu C_i Z^\mu X^\nu A_j$	high
loRilygide	ginaguRily	$C_iA_jYC_kC_l$	$C_i Z^\mu X^\nu A_j Y^\nu$	high
gibanedeRi	debogubane	$C_iA_jYC_kA_l$	$C_i Z^\mu X^\nu A_j Y^\nu$	low
lomylyzide	zinaRemyly	$C_iA_jYC_kC_l$	$C_i Z^\mu X^\nu A_j Y^\nu$	high
bamydodeRi	deboRemydo	$A_iA_jYC_kA_l$	$C_i Z^\mu X^\nu A_j Y^\nu$	high
myfuneloRi	lofazufune	$A_iA_jYC_kA_l$	$C_i Z^\mu X^\nu A_j Y^\nu$	high
myRinedelo	nedenazuRi	$A_iA_jYC_kC_l$	$Y^\mu C_i Z^\mu X^\nu A_j$	low
deRidologi	lofaReRido	$C_iA_jYC_kC_l$	$C_i Z^\mu X^\nu A_j Y^\nu$	low
zifudogiba	doginagufu	$C_iA_jYC_kA_l$	$Y^\mu C_i Z^\mu X^\nu A_j$	high
zimylylofu	lylobozumy	$C_iA_jYC_kA_l$	$Y^\mu C_i Z^\mu X^\nu A_j$	high
zimynedelo	nedeboRemy	$C_iA_jYC_kC_l$	$Y^\mu C_i Z^\mu X^\nu A_j$	high
mybanezide	zibozubane	$A_iA_jYC_kC_l$	$C_i Z^\mu X^\nu A_j Y^\nu$	high
fubanegizi	ginazubane	$A_iA_jYC_kC_l$	$C_i Z^\mu X^\nu A_j Y^\nu$	low
bafudozigi	zibozufudo	$A_iA_jYC_kC_l$	$C_i Z^\mu X^\nu A_j Y^\nu$	high
debanegizi	negiboReba	$C_iA_jYC_kC_l$	$Y^\mu C_i Z^\mu X^\nu A_j$	high
lomylyzifu	lyzifaRemy	$C_iA_jYC_kA_l$	$Y^\mu C_i Z^\mu X^\nu A_j$	low
Rifulygiba	gifaRefuly	$A_iA_jYC_kA_l$	$C_i Z^\mu X^\nu A_j Y^\nu$	low
mybanezifu	nezinaReba	$A_iA_jYC_kA_l$	$Y^\mu C_i Z^\mu X^\nu A_j$	high
baRilydemy	defaguRily	$A_iA_jYC_kA_l$	$C_i Z^\mu X^\nu A_j Y^\nu$	high
gifulyzilo	lyzibogufu	$C_iA_jYC_kC_l$	$Y^\mu C_i Z^\mu X^\nu A_j$	low
fumydoloRi	dolonazumy	$A_iA_jYC_kA_l$	$Y^\mu C_i Z^\mu X^\nu A_j$	low
zibalydemy	denagubaly	$C_iA_jYC_kA_l$	$C_i Z^\mu X^\nu A_j Y^\nu$	high

Ces expériences étaient exactement analogues aux expériences avec les mots trisyllabiques de la forme A_iXC_i ; dans les deux cas, les syllabes A et C venaient de familles $A_i \ldots C_i$ tandis que les syllabes X, Y, Z étaient des syllabes de 'remplissage' (dans les mots de la forme A_iXC_i, il y avait évidemment seulement la position X). Les items de test ont été construits également de la même manière ; par exemple, les mots de classe avaient la forme $A_iX'C_j$ pour les mots trisyllabiques mais les formes $A_iX'YZ'C_j$ ou $X'A_iYC_jZ'$ pour les mots pentasyllabiques.

Comme lors des expériences avec les mots trisyllabiques, les sujets de-

vaient choisir entre les mots de classe et les mots partiels après avoir été familiarisés avec un flux de parole segmenté (où les silences étaient cependant plus longs que dans les expériences avec les mots trisyllabiques). Les mots de classe respectaient la règle des classes mais ne sont pas apparus dans les flux de familiarisation ; en d'autres termes, les syllabes A et C étaient dans les positions où elles ont été rencontrées lors de la familiarisation mais les relations de TP entre toutes les syllabes étaient presque entièrement abolies[2]. Les mots partiels, par contre, sont apparus dans les flux de familiarisation mais ne respectaient pas la règle des classes puisqu'ils traversaient une frontière de mot. Les résultats ont montré que les sujets préfèrent les mots de classe seulement quand les syllabes critiques sont en PDBs et non pas quand elles sont en milieu de mot.

Avant de conclure que les généralisations que j'ai observées avec les mots trisyllabiques étaient effectivement induites par les PDBs, il faut exclure que la différence entre les expériences 28 et 29 soit due à des préférences différentes pour les items de test ; pour cela, ces expériences seront répliquées en familiarisant les sujets avec un flux *continu*.

[2]La raison pour laquelle les TPs n'étaient pas entièrement abolies était que les syllabes Y dans les mots de classe restaient en leur position appropriée ; il y avait donc des TPs finies entre les syllabes A et les syllabes Y des mots de classe ainsi qu'entre leurs syllabes Y et leurs syllabes C. J'ai fait ce choix afin de pouvoir limiter le nombre des combinaisons $A_i \ldots C_i$. En remplaçant seulement les syllabes X et Z par des syllabes A et C dans les mots de classe, on a besoin de quatre familles différentes pour que les syllabes A_i, C_i, X′ et Z′ appartiennent à des familles différentes. Si les syllabes Y avaient été remplacées également par une syllabe A ou C, on aurait besoin d'au moins cinq familles $A_i \ldots C_i$. Afin de rester le plus proche possible du nombre de familles du chapitre 9, j'ai donc décidé de laisser les syllabes Y en place dans les mots de classe.

10.3 Expérience 30 : Généralisations après une familiarisation avec un flux continu

Les expériences 28 et 29 ont montré que les sujets peuvent extraire la règle des classes seulement quand les syllabes correspondantes apparaissaient en PDB mais pas quand elles apparaissaient en milieu de mot. Avant d'accepter cette conclusion, il est nécessaire de vérifier que ces résultats ne reposent pas simplement sur une préférence pour certains items de test qui est indépendante de la phase de familiarisation. Pour cela, j'ai répliqué ces expériences mais en familiarisant les sujets avec des flux *continus*. Chaque sujet a participé à deux conditions expérimentales, à savoir à la réplication de l'expérience 28 avec un flux continu et à la réplication de l'expérience 29 avec un flux continu ; l'ordre des conditions a été contrebalancé entre les sujets.

10.3.1 Matériels et méthodes

Sujets

Douze sujets français (cinq femmes, sept hommes, âgés de 14 à 44 ans pour un âge moyen de 29.0 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

10.3.2 Résultats

Comme le montre la figure 10.3, les sujets préféraient les mots partiels aux mots de classe (préférence pour les mots de classe : 38.0±13.4%, $t(23) = -4.4$, $p = 0.0002$). La préférence pour les mots partiels n'est pas surprenant puisque les mots partiels sont apparus dans les flux tandis que les mots de classe contenaient des syllabes de *quatre mots différents*. Les sujets devaient donc choisir entre des items 'bizarres' et des items qui sont apparus dans les flux ; comme il n'y avait plus de PDBs pour rendre les mots de classe

moins 'bizarres', n'importe quel modèle prédirait que les sujets devraient choisir les mots partiels.

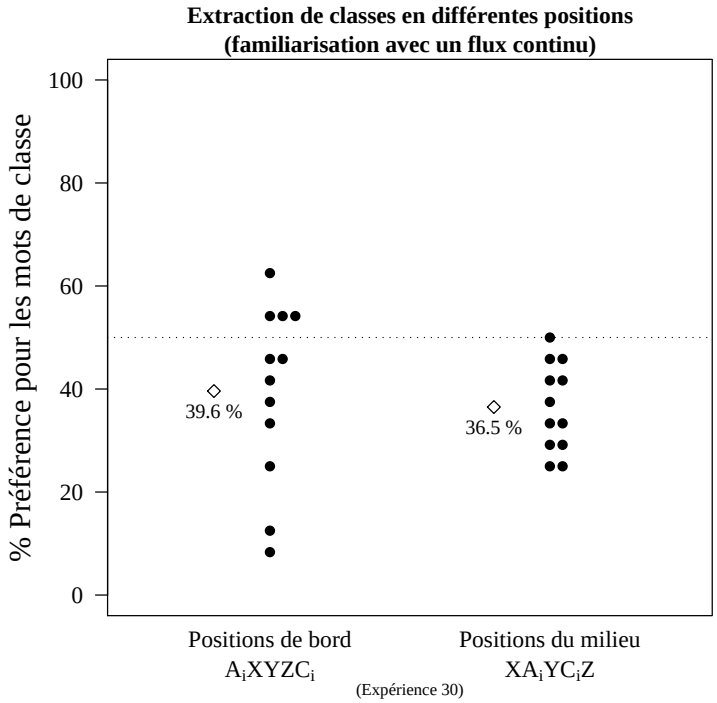


FIG. 10.3 – Résultats de l'expérience 30. Lorsqu'ils sont familiarisés avec des flux continus, les sujets n'apprennent pas la règle des classes mais choisissent les alternatives statistiquement favorisées.

Une ANOVA à mesures répétées avec la condition (syllabes critiques en PDB ou en milieu de mot) comme facteur intra-sujet et l'ordre (d'abord la condition PDB ou d'abord la condition milieu de mot) comme facteur inter-sujet ne révélait ni un effet de la condition ($F(1,10) = 0.266$, $p = 0.617$, ns), ni de l'ordre ($F(1,10) = 0.004$, $p > 0.9$, ns) ni une interaction entre ces facteurs ($F(1,10) = 0.7$, $p > 0.4$). Dans la condition 'PDB' (préférence pour les mots de classe : 39.6±17.1%), il n'y avait pas d'effet du type de mot partiel dans les paires de test ($t(11) = 0.9$, p = 0.39, ns ; test de t apparié) ; dans la condition 'milieu de mot' (36.5±8.5%), il n'y avait ni un effet du type de mot partiel dans les paires de test ($F(1,11) = 0.2$, $p > 0.6$, ns) ni de la

fréquence des transitions dans les mots partiels ($F(1,11) < 0.6$, $p > 0.4$, ns) ni une interaction entre ces facteurs ($F(1,11) = 1.5$, $p > 0.3$, ns)

10.3.3 Discussion

Les expériences 28 à 30 ont étudié la question de savoir si les sujets peuvent apprendre que certaines positions dans les mots fonctionnent comme des variables quantifiées sur des classes de syllabes distinctes seulement quand les syllabes correspondantes sont en PDB ou également quand elles se trouvent en d'autres positions. Quand ils ont été familiarisés avec un flux segmenté, les sujets ont généralisé de telles régularités quand les syllabes critiques étaient en PDB mais pas quand elles étaient en milieu de mot ; quand ils ont été familiarisés avec un flux continu, par contre, les sujets ont préféré les items qui sont effectivement apparus dans le flux mais ne respectaient pas la régularité faisant appel aux classes de syllabes. Ceci suggère que les généralisations que j'ai observées avec les mots trisyllabiques étaient induites par les PDBs où se trouvaient les syllabes critiques ; les facteurs perceptifs peuvent donc induire des généralisations faisant appel aux classes de syllabes.

Avant de discuter les implications de ce résultat plus en détail, j'étudiera la question de savoir si les computations statistiques sont limitées de la même manière que les computations faisant appel aux classes de syllabes. Pour cela, j'ai demandé aux sujets de choisir entre les mots de règle et les mots de classe quand les syllabes critiques sont en *milieu de mot*.

10.4 Expérience 31 : Associations en milieu de mot

Cette expérience cherche à répondre à la question de savoir si les calculs associationnistes sont limités aux PDBs comme les calculs symboliques que j'ai observés dans ce chapitre, ou s'ils peuvent être observés

également en milieu de mot. Pour cela, j'ai familiarisé les sujets avec le flux de l'expérience 29 avant de leur demander de choisir entre des mots de règle et les mots de classe. Les mots de règle sont identiques aux mots de classe sauf que leurs syllabes A et C appartiennent à la même famille ; ils avaient donc la structure $X'A_iYC_iZ'$ (ce qui est à comparer avec la structure $X'A_iYC_jZ'$ des mots de classe). Dans la moitié des paires de test, les mots de règle différaient des mots de classe en leur syllabe initiale ; pour l'autre moitié, c'était la syllabe finale qui différait. Dans le cas des mots trisyllabiques, les expériences 23 à 25 ont montré que les sujets préfèrent les mots de règle aux mots de classe grâce à la TP élevée entre les syllabes A et C ; si de tels calculs sont possibles également en milieu de mot, les sujets devraient préférer les mots de règle aux mots de classe également pour les mots pentasyllabiques où les syllabes critiques apparaissent en milieu de mot. Si les calculs statistiques étaient limités de la même manière que les généralisations faisant appel aux classes de syllabes, cette préférence ne devrait pas être observable.

10.4.1 Matériels et méthodes

La table 10.6 montre les 24 paires de test.

Sujets

Quatorze sujets français (11 femmes, trois hommes, âgés de 18 à 30 ans pour un âge moyen de 23.4 ans) ont participé à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une audition normale et une vision normale ou normale après correction ; aucun n'a signalé une atteinte neurologique ou psychiatrique.

10.4.2 Résultats et discussion

Comme le montre la figure, 10.4 les sujets préféraient les mots de règle aux mots de classe (58.0±7.4%, $t(13) = 4.1$, $p = 0.001$). Il n'y avait pas de différence en fonction de si les deux items d'une paire de test différaient en

TAB. 10.6 – Paires de test utilisées lors de l'expérience 31. Si la position des syllabes partagées est initiale, le mot de règle et le mot de classe ne diffèrent qu'en leur avant-dernière syllabe ; sinon, ils ne diffèrent qu'en leur deuxième syllabe.

Mot de règle	Mot de classe	Type de mot de classe	Position des syllabes partagées
Ribadolode	Rimydolode	$A_iA_jYC_kC_l$	final
fuRinezimy	fubanezimy	$A_iA_jYC_kA_l$	final
myfulydeRi	mybalydeRi	$A_iA_jYC_kA_l$	final
zimynegiba	zifunegiba	$C_iA_jYC_kA_l$	final
bafulydemy	baRilydemy	$A_iA_jYC_kA_l$	final
gibanelode	giRinelode	$C_iA_jYC_kC_l$	final
loRinezifu	loRinegifu	$C_iA_jYC_kA_l$	initial
giRinezilo	gifunezilo	$C_iA_jYC_kC_l$	final
fumydogiRi	fubadogiRi	$A_iA_jYC_kA_l$	final
bafudodezi	bafudogizi	$A_iA_jYC_kC_l$	initial
demynegilo	deRinegilo	$C_iA_jYC_kC_l$	final
mybadolode	mybadozide	$A_iA_jYC_kC_l$	initial
Ribalylogi	Ribalydegi	$A_iA_jYC_kC_l$	initial
deRilyzigi	deRilylogi	$C_iA_jYC_kC_l$	initial
fubalylozi	fubalygizi	$A_iA_jYC_kC_l$	initial
bamynegifu	bamynezifu	$A_iA_jYC_kA_l$	initial
zifulydelo	zimylydelo	$C_iA_jYC_kC_l$	final
zibanelomy	zifunelomy	$C_iA_jYC_kA_l$	final
lofudodegi	lofudozigi	$C_iA_jYC_kC_l$	initial
myfudodeRi	myfudoloRi	$A_iA_jYC_kA_l$	initial
Rimydogilo	Rimydodelo	$A_iA_jYC_kC_l$	initial
giRilyziba	giRilydeba	$C_iA_jYC_kA_l$	initial
deRilyziba	demylyziba	$C_iA_jYC_kA_l$	final
zimydogifu	zimydolofu	$C_iA_jYC_kA_l$	initial

leur syllabe A ou en leur syllabe C ($t(13) = 0.2$, $p > 0.8$, ns ; test de t apparié).

Ces résultats suggèrent que les computations statistiques ne sont pas limitées de la même manière que les généralisations que j'ai observées ; en même temps, cette expérience montre que les sujets peuvent bien traiter des syllabes en milieu de mot. Ceci rend peu probable que l'impossibilité de trouver des généralisations en milieu de mot ne soit pas due à des

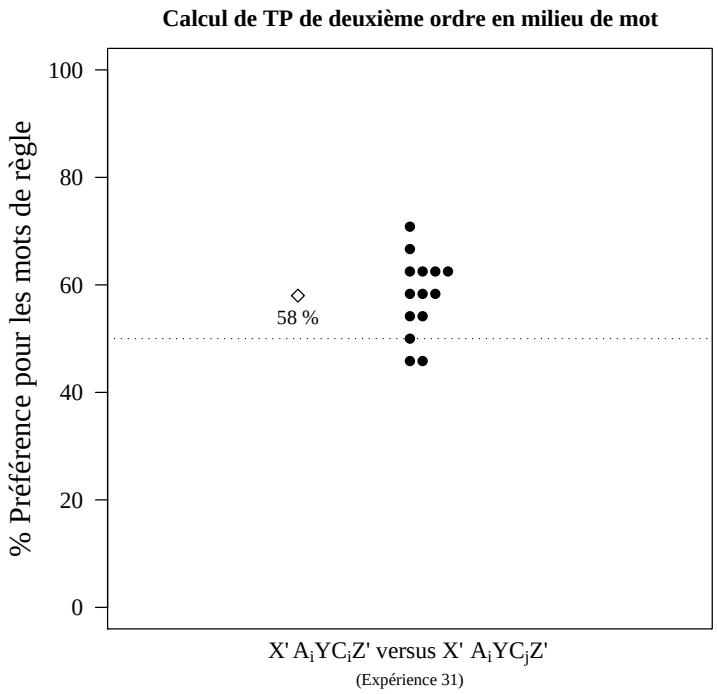


FIG. 10.4 – Résultats de l'expérience 31. Les sujets préfèrent les mots de règle aux mot de classe (et sont donc sensibles aux TPs entre syllabes non-adjacentes) quand les syllabes critiques sont en milieu de mot.

problèmes psychophysiques brutes.

10.5 Discussion intermédiaire

Quel est le répertoire des facultés computationnelles nécessaires pour apprendre des structures aussi complexes que celles du langage ? Les études sur l'apprentissage des langes artificielles qui utilisent des flux de parole continus ont grandement contribué à ce que l'on sait à ce jour sur ce type de questions ; elles ont par exemple montré que les adultes ainsi que les enfants humains peuvent utiliser des indices statistiques pour couper de la parole continue en des mots (voir par exemple Aslin et al., 1998; Saffran, Newport & Aslin, 1996; Saffran, Aslin & Newport, 1996), mais également que les adultes humains ne peuvent pas extraire même des généralisations

très simples quand ils ont exposés au même type de familiarisation. Par contre, les sujets trouvent de telles généralisations très rapidement quand ils sont exposés à un flux segmenté de manière subliminale (Peña, 2003; Peña et al., 2002). Dans ce chapitre, j'ai étudié trois questions concernant la nature des représentations que les sujets peuvent extraire quand ils sont exposés à un flux segmenté de parole artificielle. (i) Les sujets peuvent-ils généraliser une régularité faisant appel à des classes de syllabes ou sont-ils restreints à ne traiter que les dépendances entre des syllabes particulières ? (ii) De même, un mécanisme associationniste peut-il expliquer l'apprentissage d'une régularité faisant appel à des classes de syllabes ou faut-il postuler un mécanisme d'apprentissage distinct ? (iii) Finalement, quel est le mécanisme psychologique de telles généralisations ? S'agit-il de processus symboliques généraux ou plutôt de processus spécialisés et limités ? En d'autres termes, est-il possible qu'une *primitive perceptive* analyse également les flux de parole segmentés ?

10.5.1 La nature des dépendances apprises

Lors des expérience du chapitre précédent, les sujets ont été familiarisés avec des flux de syllabes consistant en des pseudo-mots avec la structure A_iXC_i, où $A_i \ldots C_i$ pouvait être une de trois combinaisons de syllabes fixées et X une de trois syllabes variables. Je me suis posé la question de savoir si les sujets pouvaient apprendre que les membres d'une classe de syllabes pouvaient apparaître en début de mot et les membres d'une autre classe de syllabes en fin de mot. Si ceci était le cas, la première ainsi que la dernière syllabe d'un mot agiraient comme des variables positionnelles quantifiées sur des classes distinctes (c'est-à-dire $A \in$ {pu, be, ta} et $C \in$ {ki, ga, du}) ; c'est cette régularité que j'ai appelée la *règle des classes*.

Après la familiarisation, j'ai demandé aux sujet de choisir entre des *mots de clase* (des items avec la structure $A_iX'C_j$, où X' n'est jamais apparu en milieu de mot pendant la familiarisation) et des *mots partiels*, c'est-à-dire des chunks de syllabes qui ont été rencontrés dans le flux de familiarisa-

tion mais qui traversaient une frontière de mots. Les mots de classe respectaient donc la règle des classes mais ne sont jamais apparus lors de la familiarisation tandis que les mots partiels ne respectaient pas cette règle mais sont apparus dans le flux de familiarisation et étaient donc statistiquement favorisés.

Les sujets préféraient les mots de classe aux mots partiels — généralisant ainsi la règle des classes aux nouveaux items — quand ils ont été familiarisés avec un flux où les mots étaient séparés par des silences subliminaux (expériences 17 et 20) mais pas quand ils ont été familiarisés avec un flux continu (expérience 18). Ceci suggère que les silences subliminaux ont induit l'extraction d'une régularité faisant appel à des classes de syllabes.

Les expériences suivantes ont montré que les sujets peuvent calculer les TPs entre des syllabes non-adjacentes en même temps que les généralisations. Plus spécifiquement, les sujets préféraient les mots de règle (c'est-à-dire des items avec la structure $A_iX'C_i$ où, contrairement aux mots de classe, les syllabes A et C appartiennent à la même famille et sont donc liées par une TP de 1.0) par rapport aux mots de classe après des familiarisations avec des flux continus ou segmentés. Comme les généralisations sont uniquement disponibles après une familiarisation avec un flux segmenté mais pas après une familiarisation avec un flux continu, la préférence pour les mots de règle ne peut être expliquée que par des calculs statistiques. En effet, la TP entre la première et la dernière syllabe est 1 pour les mots de règle et 0 pour les mots de classe ; ceci suggère que la préférence des sujets pour les mots de règle était le résultat de leur sensitivité aux TPs entre la première et la dernière syllabe. Ceci confirme — contrairement à ce qu'ont proposé Newport et Aslin (2004) — que les adultes humains sont effectivement sensibles aux TPs de deuxième ordre (voir également par exemple Ebbinghaus, 1885/1913 pour la même conclusion).

Ces résultats suggèrent (i) que les sujets peuvent utiliser les indices

subliminaux dans un flux de parole pour extraire les classes de syllabes ainsi qu'une régularité faisant appel à ces classes et (ii) qu'ils peuvent extraire simultanément des dépendances entre les items adjacents et non-adjacents grâce aux calculs statistiques. Ces composants expliquent également la préférence pour les mots de règle par rapport aux mots partiels qu'ont observée Peña et al. (2002) si les sujets (i) ont extrait la règle des classes (que les mots de règle respectent) et (ii) ont calculé des TPs entre des syllabes non-adjacentes.

Ensuite, je me suis interrogé sur le mécanisme psychologique des généralisations observées. S'agit-il d'un mécanise symbolique général — à l'instar des opérations dans un ordinateur ou de l'inférence scientifique — ou s'agit-il plutôt d'un mécanisme plus spécialisé qui repose sur la saillance des PDBs ? Pour répondre à cette question, j'ai examiné si les sujets peuvent généraliser la règle des classes seulement en PDB ou si cette capacité peut être observée également en d'autres positions. Plus spécifiquement, alors que les sujets du précédent chapitre devaient apprendre la règle des classes à partir des mots de la forme A_iXC_i, les sujets de ce chapitre devaient généraliser des règles similaires ou bien dans les mots de la forme A_iXYZC_i ou bien dans les mots de la forme XA_iYC_iZ. Ces expériences étaient exactement comme les expériences avec les mots trisyllabiques. Alors que les syllabes A et C pouvaient venir de trois familles différentes dans les mots de la forme A_iXC_i, elles pouvaient provenir de quatre familles différentes dans les mots des formes A_iXYZC_i ou XA_iYC_iZ ; le choix d'utiliser quatre familles au lieu d'en utiliser trois était nécessaire afin de pouvoir construire les items de test. De même, tandis qu'il y avait trois syllabes de 'remplissage' pour la position X dans les mots de la forme A_iXC_i, il y en avait trois pour chacune des positions X, Y et Z dans les mots pentasyllabiques. Les items de test ont été construits également de manière analogue ; par exemple, les mots de classe (qui avaient la forme $A_iX'C_j$ pour les mots trisyllabiques) avaient les formes $A_iX'YZ'C_j$ ou $X'A_iYC_jZ'$ pour les mots pentasyllabiques en PDB et en milieu de mot, respectivement.

Après une familiarisation avec des flux segmentés (pour lesquels il s'est avéré nécessaire d'utiliser des silences bien perceptibles au lieu des silences subliminaux des autres expériences), les sujets préféraient les mots de classe aux mots partiels seulement quand les syllabes critiques étaient en PDB (c'est-à-dire quand les mots avaient la forme A_iXYZC_i) ; après une familiarisation avec des flux continus, les sujets préféraient les mots partiels aussi bien quand les syllabes critiques étaient en PDB que quand elles étaient en milieu de mot. Ceci suggère que la règle des classes reposait sur la saillance des syllabes en PDB : les sujets ont appris les classes de syllabes qui pouvaient apparaître en position de bord initiale ou finale, respectivement[3].

Contrairement aux généralisations, les calculs statistiques ne semblent cependant pas être limités de la même manière car les sujets préféraient les mots de règle aux mots de classe également quand les syllabes critiques étaient en milieu de mot.

Dans la suite, je montrerai d'abord que ces résultats sont incompatibles avec un mécanisme associationniste général (qu'ils sont incompatibles avec un mécanisme symbolique général devrait être évident à cause des discussions des chapitres 7 et 8) ; ensuite, je montrerai que les opérations induites par les PDBs sont effectivement des opérations fort complexes. Finalement, j'explorerai les implications de ces résultats pour les théories de la manipulation des symboles mentaux et pour certaines opérations linguistiques.

[3]Il est assez abusif de parler de 'saillance' dans le cas des silences *subliminaux* des expériences 17 à 26 ; il semble cependant que même de tels indices subtiles peuvent induire des PDBs.

10.5.2 Un mécanisme associationniste peut-il expliquer les généralisations ?

Comme on l'a discuté à plusieurs reprises, la question de savoir si l'on doit postuler des mécanismes non-associationnistes pour l'apprentissage et la représentation des règles est fondamentale — car d'éventuelles opérations symboliques pourraient permettre d'étudier les capacités computationnelles innées. Or, à quelques exceptions près (voir par exemple Fodor, 1983; Fodor & Pylyshyn, 1988; Gallistel, 1990, 2000; Gallistel & Gibbon, 2000, 2002), la discussion dans la littérature se limitait à affirmer ou à disputer l'existence de représentations symboliques, en général sans proposer des opérations concrètes susceptibles d'être symboliques ainsi que sans préciser leurs mécanismes psychologiques. Il semble cependant qu'on ne saurait répondre à ce type de question sans analyser en détail les propriétés computationnelles des opérations concernées. C'est précisément cette stratégie que j'ai suivie dans cette thèse, d'abord en étudiant les structures avec répétitions et maintenant les structures dépendant des PDBs. L'objectif de cette thèse est donc de trouver des exemples d'opérations qui pourraient faire partie d'une trousse à outils computationnelle de l'esprit.

Les résultats présentés dans ce chapitre ainsi que dans le chapitre précédent suggèrent que des mécanismes symboliques et associationnistes analysent un flux de parole pour extraire différents types d'information. Au moins quatre observations supportent cette conclusion. Premièrement, il y a une différence nette entre les généralisations observées après les flux segmentés courts — et l'impossibilité d'observer des généralisations après une familiarisation avec les flux plus longs. Comme dans les expériences de Peña et al. (2002), il semble que la présence des silences (subliminaux pour les mots trisyllabiques, nettement perceptibles pour les mots plus longs) était une condition nécessaire pour les généralisations. Par conséquent, les mécanismes extrayant les généralisations n'opèrent que sur les flux segmentés — ce qui est facilement explicable si les généralisations reposent sur les PDBs. Inversement, les mécanismes registrant les TPs entre

syllabes ne semblent pas subir cette limitation mais opèrent sur les flux continus aussi bien que sur les flux segmentés.

De même, alors que les généralisations n'étaient observables qu'en PDB et non pas en milieu de mot, les sujets pouvaient calculer les TPs entre syllabes parfaitement bien en milieu de mot. Ceci suggère que les mécanismes calculant les généralisations et la distribution des syllabes subissent des contraintes qualitativement différentes ce qui rend peu probable qu'il puisse s'agir du même mécanisme.

La troisième observation vient de la *dynamique* des généralisations. Si elles avaient été calculées par un mécanisme associationniste, la préférence pour les mots de classe devrait *augmenter* pour les familiarisations plus longues — puisque les représentations en mémoire devraient être renforcées avec le temps. Inversement, si un mécanisme rapide extrayant la règle des classes interagissait avec un mécanisme associationniste registrant la distribution des syllabes, la préférence pour les mots de classe devrait décroître avec le temps car la familiarité avec les mots de classe devrait atteindre son maximum relativement rapidement et changer relativement peu après — tandis que les représentations des mots partiels devraient continuer d'être renforcées. Les résultats montrent que la préférence pour les mots de classe par rapport aux mots partiels décroît pour les durées de familiarisation longues, confirmant ainsi les prédictions du modèle à deux voies. Comme il n'y a aucune raison évidente pour laquelle la dynamique de deux calculs devrait être qualitativement différente s'ils reposaient sur le même type de mécanisme, il est peu probable que le mécanisme des généralisations soit du même type que les mécanismes qui registrent la distribution des syllabes (par exemple en calculant des TPs).

La quatrième observation est fournie par les considérations des sections 9.6.1 et 9.6.2. La force des associations entre les syllabes (TPs, force de chunking etc.) favorise les mots partiels par rapport aux mots de classe puisque les mots partiels apparaissaient dans les flux alors que les mots de

classe contenaient trois syllabes de trois mots différents ; c'est ainsi que les sujets ont préféré les mots partiels quand ils ont été familiarisés avec des flux continus lors de l'expérience 30. De plus, j'ai montré qu'on ne saurait expliquer la préférence pour les mots de classe par des associations entre les syllabes et les silences qu'en postulant (i) que les représentations des silences (et donc également des syllabes puisqu'elles sont par hypothèse des items du même type) sont entièrement indépendantes de leurs formes physiques et (ii) qu'il y a *deux* représentations distinctes des silences, une pour induire les généralisations et une pour subir les calculs statistiques. Il semble donc raisonnable de rejeter la possibilité que les opérations statistiques qui s'appliqueraient indifféremment aux syllabes et aux silences pourraient jouer un rôle causal pour la préférence pour les mots de classe. De plus, j'ai réfuté les prédictions d'un tel modèle en montrant que les sujets préfèrent les mots de classe également quand les items de test sont immédiatement entourés de tons purs au lieu d'être entourés des silences. Par conséquent, *tous* les mécanismes purement associationnistes devraient préférer les mots partiels par rapports aux mots de classe et non pas inversement — ce qui est précisément le contraire du comportement des sujets. Un ensemble de simulations avec un Simple Recurrent Network (Elman, 1990) a confirmé ces résultats.

La conclusion que différents types de processus analysent les signaux de parole est réminiscente de la proposition que l'inflexion régulière et irrégulière en morphologie reposent sur des mécanismes qualitativement différents (voir par exemple Baayen et al., 1997; Marslen-Wilson & Tyler, 1997; Marcus et al., 1992, 1995; Pinker, 1991; Pinker & Prince, 1988). Or, alors que différentes interprétations des expériences sur la morphologie inflexionnelle ont vu le jour à cause de la complexité intrinsèque de ce domaine, mes résultats montrent que les computations statistiques et non-statistiques sont observables même dans une langue artificielle fort simplifiée : les sujets peuvent calculer les TPs même de deuxième ordre et ils peuvent simultanément extraire une régularité faisant appel à des classes de syllabes qui ne peut pas être expliquée par des computations

associationnistes. De plus, les expériences sur la morphologie inflexionnelle ont étudié l'état stable après des années d'exposition à une langue, et la méthodologie disponible ne permet pas d'étudier les processus en-ligne responsables de l'acquisition de la morphologie. Les expériences présentées dans ce chapitre montre que même l'apprentissage en-ligne à partir de stimuli relativement linguistiques pourrait utiliser au moins deux processus différents.

10.5.3 Les généralisations ne sont-elles « que » de biais perceptifs ?

Il est facile d'être 'déçu' de ces résultats, en particulier des expériences 28 à 30, car elles montrent que ce qui aurait pu être une situation où on aurait pu étudier les processus spécifiquement linguistiques de l'acquisition du langage n'est finalement « que » le résultat d'un phénomène qui pourrait n'être qu'un biais perceptif. Dans cette section, je montrerai qu'il n'y a aucune raison d'être déçu car (i) les opérations sous-jacentes sont loin d'être triviales, (ii) elles clarifient certains problèmes linguistiques importants et (iii) la méthodologie utilisée dans ces expériences permet d'étudier comment on pourrait étudier également les opérations linguistiques plus 'abstraites'.

D'abord, il convient de noter que les PDBs ne sont pas observables dans les stimuli puisqu'elles n'ont pas de corrélat physique prédéfini. Les items précédents ou suivants la première et la dernière position pouvaient être des silences courts, des silences longs, des tons purs, et des syllabes (plus ou moins) arbitraires peuvent apparaître entre la première et la dernière syllabe ; la seule propriété que les items entourant les mots et les items de test avaient en commun était qu'ils n'étaient pas de syllabes. Même cette propriété pourrait cependant ne pas être suffisamment générale puisque des résultats antérieures suggèrent que même les syllabes constantes entre les mots de familiarisation pourraient agir comme indices de segmentation

au même titre que les silences (Morgan, Meier & Newport, 1987). Ceci suggère que les détecteurs de bords spectraux ou d'amplitude comme ceux dont il a été proposé qu'ils existent dans le cortex auditif primaire (Fishbach, Nelken & Yeshurun, 2001; Fishbach, Yeshurun & Nelken, 2003) ne seraient pas suffisants pour expliquer les généralisations observées dans les expériences des deux derniers chapitres et que la détection de bords de mots est une opération hautement non-triviale.

Les résultats de ce chapitre clarifient également le débat sur l'existence de processus symbolique en morphologie inflexionnelle. Comme on l'a vu, ce débat fait toujours rage, et sa complexité intrinsèque a rendu possibles différentes interprétations des expériences étudiant ce domaine. Or, les expériences présentées ici permettent de clarifier au moins le débat sur l'affixation, car elle repose sur la capacité d'apprendre que ces certains phonèmes ou syllabes apparaissent en PDB d'un mot. Comme mes résultats montrent que les sujets sont équipés d'opérations symboliques traitant les syllabes en PDB, il semble raisonnable de conclure qu'également l'affixation pourrait utiliser de telles opérations. Malgré l'apparente simplicité des opérations étudiées dans cette thèse, elles permettent d'éclairer des débats tout à fait fondamentaux — car il est beaucoup moins probable que des interprétations alternatives en termes de la fréquence des items dans une langue, de leur similarité orthographique, les sens ou encore d'autres facteurs en morphologie inflexionnelle puissent s'appliquer à des stimuli aussi simples comme ceux utilisés dans mes expériences que qu'elles puissent s'appliquer aux expériences sur la morphologie. On verra dans la discussion générale que la morphologie inflexionnelle n'est pas le seul domaine où les expériences présentées ici pourraient apporter des clarifications.

Plus généralement, on pourrait penser qu'étudier les limitations des processus mentaux pourrait permettre de saisir leurs mécanismes, et ainsi de déterminer s'ils sont symboliques. Les expériences présentées dans cette thèse pourraient donc esquisser une voie par laquelle on peut mettre des

grandes discussions comme celle sur la morphologie inflexionnelle sur une base empirique plus solide.

Pour conclure la discussion de ce chapitre, les résultats qui y sont présentés montrent que la parole n'est pas analysée par un mécanisme monolithique et général ; certaines computations structurales requièrent des propriétés particulières qui peuvent éventuellement être subtiles. Il est donc probable qu'il y a encore beaucoup de computations particulières spécialisées à étudier, en particulier sous l'aspect de leurs limitations, avant d'arriver à une compréhension de l'acquisition du langage et des outils computationnels qui analysent les signaux de parole.

Troisième partie

Discussion Générale

Les travaux présentés ici ont étudié deux questions : Y-a-t-il des opérations symboliques dans l'esprit, et, dans l'affirmative, sur quels mécanismes de telles opérations reposent-elles ? S'agit-il de mécanismes génériques, et donc en quelque sorte de machines de Turing mentales, ou plutôt d'une collection de mécanismes spécialisés qu'on ne saurait étudier qu'en suivant une approche au cas par cas ? L'importance de ces questions découle de l'observation que une capacité de faire des généralisations symboliques implique l'existence de contraintes représentationnelles innées. Faute de telles contraintes, on ne pourrait pas garantir que différents apprentis aboutissent aux mêmes règles s'ils sont confrontés au même ensemble fini d'exemples — car, comme on l'a vu dans la section 2.2, tout ensemble fini d'exemple est compatible avec une infinité de généralisations.

Tandis que la première question — celle de la capacité de faire des calculs symboliques — a été étudiée par de nombreux auteurs, la deuxième n'a été — à quelques exceptions près — presque jamais abordée. Pourtant, elle n'est pas moins fondamentale que la première : Sans connaître son mécanisme, comment pourrait-on affirmer qu'une opération est symbolique ? Il semble en effet impossible d'attribuer des prédicats comme 'symbolique' sans connaître les propriétés de ce à quoi on voudrait les attribuer — justement comme il semble impossible d'affirmer que des interactions électromagnétiques sont importantes pour un atome sans savoir de quoi l'atome est 'fait', c'est-à-dire avant que Rutherford ne découvrît la distribution des charges positives et négatives[4].

Alors que le débat sur la capacité de manipuler les symboles a été mené

[4]Ceci n'implique nullement que l'on ne puisse conclure sur l'existence des calculs mentaux symboliques à partir d'observations 'macroscopiques' — comme l'ont montré par exemple Fodor et Pylyshyn (1988). L'étude des mécanismes des opérations que l'on pourrait appeler 'symboliques' reste cependant importante malgré l'existence de des arguments de Fodor et Pylyshyn (1988) car ont voudrait pouvoir construire une théorie psychologique de ce qui les rend possibles.

en des termes très généraux — conduisant certains auteurs à proposer que l'esprit humain est un mécanisme générique d'apprentissage statistique (voir par exemple J. A. Feldman & Ballard, 1982; Elman, 1990; Elman et al., 1996; Hinton & Anderson, 1981; Joanisse & Seidenberg, 1999; McClelland et al., 1986; Rumelhart, McClelland & The PDP Research Group, 1986; Seidenberg, 1997) ou symbolique (voir par exemple Anderson, 1993; Marcus et al., 1999; Marcus, 2001; Newell, 1980; Newell & Simon, 1976; Lehman et al., 1998), la recherche sur le comportement des animaux montre qu'ils sont équipés de mécanismes d'apprentissage spécifiques pour les problèmes auxquels ils sont confrontés dans leur environnement (voir par exemple Gallistel, 1990, 2000; Gould & Marler, 1987). Il est donc justifié de se poser la question de savoir si l'homme est un animal exceptionnel dans la mesure où toutes ses opérations mentales sont d'une très grande généralité — ou s'il est doté également de certains mécanismes plus spécifiques. En effet, même des opérations traditionnellement considérées comme des facultés mentales de haut niveau pourraient reposer sur des mécanismes plus spécialisés. Gigerenzer, Todd et The ABC Group (1999) proposent par exemple que les processus menant à la prise de décision pourraient se servir d'une collection d'heuristiques simples provenant de leur 'boîte à outils adaptative'.

Dans cette thèse, j'ai d'abord cherché des illustrations pour des opérations mentales qui pourraient être symboliques. Ensuite, je me suis interrogé sur leur mécanisme : S'agit-il de processus généraux qui contribuent — à l'instar de l'inférence scientifique — à la fixation des croyances ou s'agit-il plutôt de mécanismes plus simples et limités ? Plus précisément, mon hypothèse de départ était que déjà les contraintes du système perceptif donnent lieu à des opérations complexes qui pourraient s'avérer symboliques. Les cas d'études retenus incluent les structures avec répétitions, les contraintes phonotactiques ainsi que l'extraction de classes d'équivalence d'une séquence de parole quasi-continue. Mes résultats montrent qu'il y a des opérations mentales dont on peut montrer qu'il s'agit d'opérations symboliques, mais qui sont fortement spécialisées et subissent d'im-

portantes contraintes perceptives. Je propose que ces calculs symboliques ne reflètent pas un système mental monolithique mais un ensemble de 'primitives perceptives' spécialisées. Un tel ensemble pourrait constituer une trousse à outils computationnelle de l'esprit.

Cette proposition ressemble à des propositions dans d'autres domaines, où des problèmes computationnellement complexes peuvent être résolus grâce à une décomposition en de simples opérations de base. Le groupement visuel est par exemple guidé par les principes de Gestalt (Koffka, 1935; Wertheimer, 1923/1938) ; ces principes pourraient être considérés comme des primitives de séparation (même s'ils n'ont pas été décrits de cette manière historiquement) et semblent être adaptés à la distribution des formes dans les scènes naturelles (Sigman et al., 2001)[5]. D'autres auteurs ont proposé qu'un répertoire limité d'opérations primitives est à la base de la reconnaissance des formes visuelles (voir par exemple Biederman, 1987; S. Ullman, 1984 ; mais voir Schyns, 1998; Tarr & Bülthoff, 1998, pour des modèles incorporant aussi de l'information dépendant du point de vue). Dans le domaine du contrôle moteur, différents auteurs ont proposé que l'apprentissage moteur est rendu possible grâce à l'existence de primitives motrices que l'on peut combiner (voir par exemple Fod, Matarić & Jenkins, 2002; Krebs et al., 1999; Mussa-Ivaldi et al., 1994; Mussa-Ivaldi & Bizzi, 2000; Thoroughman & Shadmehr, 2000).

La question centrale que l'on doit se poser est donc la suivante : Ces primitives, peuvent-elles jouer un rôle pour les facultés horizontales de l'esprit ? C'est évidemment une question ouverte, mais on verra que différents résultats suggèrent que ceci pourrait bien être le cas (et même si cette hypothèse était fausse, elle serait utile pour des raisons méthodologiques). Cette possibilité n'a pas seulement le potentiel d'élucider les mécanismes psychologiques de la manipulations des symboles, mais également de ré-

[5]Ces principes semblent également intervenir très précocement dans la chaîne de traitement car certains d'entre eux sont implémentés dans le cortex visuel primaire (Bosking, Zhang, Schofield & Fitzpatrick, 1997; Gilbert & Wiesel, 1989).

concilier les approches symboliques et statistiques. Il est donc important de l'étudier empiriquement.

Chapitre 11

Résumé des travaux présentés

Dans la présente thèse, j'ai étudié l'hypothèse que le fonctionnement du système perceptif humain impose des contraintes représentationnelles. Mon point départ était une expérience de Marcus et al. (1999). Ils ont montré que les jeunes enfants savent généraliser les structures AAB, ABA et ABB et ont conclu que les enfants sont capables d'extraire des 'règles algébriques'. Cependant, la conclusion que ces généralisations reposent sur un traitement symbolique a été sévèrement critiquée par de nombreux auteurs (voir par exemple Altmann & Dienes, 1999; Altmann, 2002; Christiansen & Curtin, 1999; Christiansen et al., 2000; Gasser & Colunga, 2000; Hanson & Negishi, 2002; Negishi, 1999; McClelland & Plaut, 1999; Seidenberg & Elman, 1999a, 1999b; Shultz & Bale, 2001) ; Altmann (2002) a par exemple montré qu'un pré-entraînement d'un modèle statistique pourrait reproduire les données de Marcus et al. (1999). On pourrait remarquer que le succès de ce modèle dépend très probablement des propriétés idiosyncrasiques du corpus utilisé pour le pré-entraînement, et que les arguments faisant appel aux expériences antérieures d'un modèle étaient en général des arguments 'de principe' portant sur les propriétés des modèles en question mais pas nécessairement sur la psychologie des processus sous-jacents. Or, comme les arguments de Marcus et al. (1999) étaient également d'une grande généralité et avaient comme objectif précisément de réfuter ces modèles statistiques, les résul-

tats de Altmann (2002) montrent que l'expérience de Marcus et al. (1999) ne permet pas nécessairement d'affirmer la réalité de la manipulation des symboles mentaux.

De même, Negishi (1999) a observé que les modèles statistiques avec représentations continues (et non pas binaires) peuvent expliquer les données de Marcus et al. (1999). Marcus (1999b) a répondu que les représentations continues sont des variables, mais a proposé à d'autres occasions que l'ensemble des neurones d'une couche dans un réseau de neurones pourrait également être considéré comme une variable. Or, en acceptant cette interprétation, l'expérience de Marcus et al. (1999) ne permet plus d'affirmer que les enfants ont accès aux *opérations* manipulant les variables (car des associations entre les variables à valeur continue seraient suffisantes pour expliquer les résultats). Comme l'intérêt des variables est précisément que l'on peut les manipuler, il faut ou bien modifier le matériel de l'expérience de Marcus et al. (1999) pour que les modèles statistiques avec représentations continues ne puissent plus reproduire leurs résultats ou bien suivre une autre stratégie de recherche.

En plus de l'incertitude sur le type de calcul que ces expériences reflètent, les mécanismes sous-jacents n'ont jamais été étudiés. En effet, Marcus et al. (1999) ont utilisé des répétitions en des positions de bord (PDBs), et on peut se poser la question si de telles structures sont diagnostiques pour des capacités symboliques générales — ou pour des opérations plus simples comme un 'détecteur de répétitions'. En d'autres termes, les enfants disposent-ils de mécanismes généraux statistiques ou symboliques ou cette expérience reflète-t-elle plutôt des computations spécialisées induites par des structures particulièrement saillantes ? Cette ambiguïté n'est évidemment pas un défaut d'une expérience chez les jeunes enfants — car leurs capacités cognitives limitées imposent des expériences très simples ; cette ambiguïté devrait néanmoins être étudiée par d'autres moyens.

11.1 Arguments pour des primitives perceptives

La première série d'expériences a exploré la question de savoir si les adultes humains sont effectivement équipés d'un mécanisme général d'extraction de règles ou si les répétitions sont des structures particulières traitées par un mécanisme spécialisé. Si l'on pouvait affirmer l'existence d'un mécanisme spécialisé pour une structure particulière, on pourrait éventuellement également clarifier s'il s'agit d'une opération symbolique ou statistique. J'ai comparé la capacité des sujets de généraliser des structures avec ou sans répétitions. Plus spécifiquement, les sujets ont entendu des triplets de notes de piano et devaient généraliser leur structure. Les structures reposaient ou bien sur des répétitions (ABA et ABB ; expérience 1) ou bien sur les relations de pitch Bas-Haut-Milieu et Milieu-Haut-Bas (BHM et MHB, expériences 2 et 3). Un mécanisme général d'extraction de règles prédit que les deux types de structures devraient être généralisés avec des performances similaires. Inversement, des simulations avec des réseaux de neurones ainsi que des calculs d'information mutuelle entre les notes de piano et les structures ont montré que tout mécanisme statistique devrait ou bien généraliser les structures sans répétitions mieux que les structures avec répétitions — ou bien être au niveau du hasard pour les deux types de structures.

Contrairement aux prédictions de ces modèles, les sujets ont facilement généralisé les structures avec répétitions mais étaient proches du hasard pour les autres structures. Ces résultats comportementaux ont été confirmés par des données électrophysiologiques. Tandis que les changements de structure ont provoqué des réponses électrophysiologiques rapides pour les structures avec répétitions, de telles réponses n'ont pas été observées pour les autres structures.

Ces résultats suggèrent que les répétitions ont un statut spécial parmi les structures possibles et qu'elles sont traitées par un mécanisme spécialisé qui ne repose pas sur de l'apprentissage statistique. Comme les répé-

titions en question sont des répétitions de *type* (et non pas des répétitions de token), leur représentation est *indépendante* des items particuliers qui les exemplifient. Je propose que le mécanisme spécialisé à traiter les répétitions de type est un membre d'un répertoire d'opérations symboliques élémentaires qui résultent des contraintes du système perceptif ; j'appelle de telles opérations des *primitives perceptives*. Dans les autres séries d'expériences, j'étudie d'autres exemples de primitives perceptives ainsi que leurs propriétés.

11.2 Facteurs perceptifs modulant des généralisations

Les expériences précédentes suggèrent que les répétitions sont traitées par une primitive perceptive, indépendamment des items qui exemplifient les répétitions. S'agit-il d'une opération générale comme dans un ordinateur ou la généralisation de structures avec répétitions est-elle modulée par des facteurs perceptifs — ce qui serait attendu si de telles primitives résultaient des contraintes du système perceptif ?

Pour étudier cette question, j'ai demandé aux sujets de généraliser des structures avec répétitions où les répétitions étaient localisées ou bien en des positions de bord (PDBs) ou bien en milieu de séquence. Plus spécifiquement, les sujets ont dû apprendre les structures ABCDE*FF* et ABC*DD*EF portées par des séquences de syllabes. Ils ont entendu d'abord des séquences conformes à une des structures ; ensuite ils ont dû décider si de *nouvelles* séquences avaient la même structure que les séquences entendues auparavant. Tandis qu'ils ont appris facilement la structure ABCDE*FF*, ils ne pouvaient pas apprendre la structure ABC*DD*EF. Des expériences contrôles ont montré que l'avantage pour les PDBs n'est pas le résultat de problèmes attentionnels ou psychophysiques ; en effet, quand les généralisations n'étaient pas requises, les sujets pouvaient traiter des séquences de la forme ABC*DD*EF parfaitement bien. Ceci suggère que l'avantage

pour les PDBs est spécifique aux généralisations ; les primitives perceptives semblent donc être profondément influencées par des facteurs perceptifs.

11.3 Facteurs perceptifs et généralisations phonotactiques

Les expériences précédentes suggèrent que la généralisation des structures avec répétitions repose sur un mécanisme résultant des contraintes perceptives ; nous appelons de telles opérations des *primitives perceptives*. Ces généralisations ont été facilitées quand les répétitions étaient localisées en des PDBs. Dans cette série d'expériences, je me suis demandé si les PDBs ne modulent pas uniquement des généralisations comme dans le cas des structures avec répétitions mais si elles en *induisent* véritablement. Une deuxième question abordée par ces expériences était de savoir si ces généralisations résultant des contraintes perceptives pourraient avoir un rapport avec le langage.

Pour répondre à ces questions, j'ai demandé aux sujets de généraliser des régularités réminiscentes des contraintes phonotactiques. Plus spécifiquement, je me suis posé la question de savoir si les adultes peuvent apprendre que certaines consonnes doivent apparaître dans des positions spécifiques non seulement pour les PDBs mais également pour les positions en milieu de mot. Les sujets, peuvent-ils apprendre des contraintes pour les consonnes C_1 et C_2 non seulement dans des mots de la forme $C_1V_1ccV_2C_2$ (où les consonnes critiques sont en PDB) mais également dans des mots de la forme $cV_1C_1C_2V_2c$ (où les consonnes critiques sont localisées en des positions médiales), les petits 'c' étant des consonnes de remplissage sans contraintes particulières ?

Les résultats ont montré que les sujets peuvent apprendre de telles contrain-tes quand les consonnes critiques sont en PDB mais pas quand

elles sont en milieu de séquence. De plus, des expériences contrôles ont montré que les problèmes pour généraliser les contraintes phonotactiques en milieu de mot ne sont pas dus à des problèmes attentionnels ou psychophysiques. Par contre, les sujets ont pu généraliser les contraintes phonotactiques également en milieu de mot quand j'ai utilisé des classes de consonnes naturelles (comme les fricatives ou les liquides) plutôt que des classes arbitraires comme dans les autres expériences ; la raison est probablement que cette manipulation permettait aux sujets de former des associations entre des traits phonétiques ou d'appliquer des calculs de similarité non-symboliques.

Ces résultats suggèrent que les PDBs ne modulent pas seulement la capacité de faire des généralisations mais induisent véritablement des calculs non-associationnistes : Les PDBs fonctionnent comme des variables quantifiées sur des classes de consonnes distinctes et l'on peut montrer que de tels calculs ne pourraient être réduits à des calculs purement associationnistes. Comme ces calculs sont réminiscents de contraintes phonotactiques, il est possible que les primitives perceptives jouent un rôle pour certains calculs linguistiques.

11.4 PDBs dans des séquences de parole

Dans la prochaine série d'expériences, j'ai cherché à confirmer que de telles primitives peuvent être observées pour des computations qui pourraient être liées au langage.

Les dépendances entre catégories sont importantes pour le langage ; je me suis donc demandé si de telles généralisations subissent également des limitations perceptives comme les calculs des expériences précédentes. J'ai d'abord construit une situation où cette hypothèse peut être évaluée à partir des résultats rapportés par Peña et al. (2002).

Peña et al. (2002) ont étudié les calculs structuraux que les sujets peuvent faire à partir d'un flux de parole continu. Les sujets ont entendu des flux de parole consistant en des concaténations de mots imaginaires trisyllabiques. Dans ces mots, la première syllabe prédisait la dernière avec certitude tandis que la syllabe au milieu était variable. Pour segmenter ce flux, les sujets devaient donc exploiter la probabilité de transition entre la première et la dernière syllabe. Alors qu'ils ont réussi à segmenter le flux, ils ne pouvaient pas généraliser la dépendance entre la première et la dernière syllabe d'un mot. Or, quand les mots étaient séparés par des silences de 25 ms (une durée trop courte pour qu'ils soient perçus comme des pauses), les sujets ont également généralisé cette dépendance ; ils ont accepté des mots respectant cette dépendance — indépendamment de la syllabe apparaissant au milieu du mot. Par conséquent, des silences très courts ont induit des généralisations qui n'étaient pas disponibles autrement.

Dans la suite, j'ai montré que ces généralisations font appel à des catégories de syllabes. Plus spécifiquement, les sujets ont appris que les syllabes au début et en fin de mot doivent être des membres de deux classes distinctes. J'ai montré que, alors que les sujets ont extrait ces généralisations après une exposition à des flux de parole très brefs, les généralisations n'étaient plus observables pour des flux plus longs. Ceci suggère que deux mécanismes analysent parallèlement les flux de parole et entrent en compétition : Un mécanisme rapide qui calcule les généralisations (ce qui explique la disponibilité rapide des généralisations) ainsi qu'un mécanisme statistique registrant les sous-séquences de syllabes qui sont effectivement apparues dans le flux ; comme ce dernier mécanisme est plus lent que et en compétition avec le premier mécanisme, on prédit que l'évidence pour les généralisations devrait décroître pour des longs flux de parole. Finalement, j'ai montré grâce à des considérations relativement formelles et des simulations avec des réseaux de neurones artificiels que le mécanisme calculant les généralisations n'aurait pas pu résulter d'un mécanisme purement associationniste.

En passant, j'ai montré — contra les nombreuses critiques des expériences de Peña et al. (2002) — que les sujets effectuent des calculs statistiques en même temps que les calculs symboliques — sans que ceci puisse être imputé à des problèmes avec les stimuli. En effet, j'ai montré qu'ils sont sensibles aux TPs de deuxième ordre, confirmant ainsi que les humains (et probablement d'autres mammifères) sont équipés de puissants mécanismes statistiques.

Ensuite, je me suis demandé si ces généralisations faisant appel à des catégories de syllabes étaient également limitées par des facteurs perceptifs ou s'il s'agissait de computations plus générales. La capacité d'apprendre que des syllabes dans des positions particulières doivent être des membres de classes distinctes, est-elle limitée aux PDBs ou de telles computations peuvent-elles être observées également pour des positions médiales ? Plus précisément, j'ai familiarisé les sujets avec des séquences de parole composées de mots pentasyllabiques. Dans une condition, ils ont dû généraliser que la première et la dernière syllabe d'un mot devaient être des membres de classes distinctes et que les autres syllabes d'un mot n'étaient pas pertinentes pour les généralisations. Dans une autre condition, les sujets ont dû apprendre que la deuxième et la quatrième syllabe d'un mot devaient être des membres de classes distinctes. J'ai observé des généralisations quand les syllabes critiques étaient localisées dans des PDBs mais pas dans les autres positions. Cependant, les sujets pouvaient faire des calculs statistiques également au milieu de mot.

J'ai conclu que les PDBs peuvent induire des calculs symboliques : tandis que les positions séquentielles ne fonctionnent probablement pas comme des variables en général, les PDBs le font. Par conséquent, des phénomènes perceptifs peuvent induire des calculs symboliques qui pourraient également être importants pour le langage. Ces calculs ne sont pas des opérations symboliques générales, mais des opérations fortement spécialisées qui résultent des contraintes du système perceptif.

Chapitre 12

Primitives perceptives

L'objectif de cette thèse était d'analyser les opérations mentales disponibles pour faire des généralisations. Les résultats suggèrent que l'esprit humain est équipé de certaines opérations symboliques spécialisées. Il convient d'abord de rappeler ce que l'on entend par 'symbolique'. Comme on l'a vu dans l'introduction, un système symbolique ne représente pas seulement des items particuliers (par exemple en détectant une tâche rouge sur un display) mais également les relations que ces items peuvent avoir ; de cette manière, il y a une sorte d'isomorphisme entre les relations entre les représentations mentales et les relations dans l'environnement extérieur — alors que les relations dans l'environnement ne sont pas directement observable mais doivent être inférées en quelque sorte. Les systèmes symboliques n'existent pas seulement dans les facultés centrales mais également dans les modules (voir par exemple Gallistel, 2000).

Les exemples d'opérations symboliques que j'ai étudiés résultent probablement des contraintes du système perceptif ; je les appellerai donc des *primitives perceptives*. Il ne s'agit pas d'opérations symboliques générales, mais d'opérations spécialisées qui effectuent seulement les computations pour lesquelles elles ont évolué et seulement sous les conditions pour lesquelles elles ont évolué. Alors que les primitives perceptives sont limitées comme le sont probablement les opérations dans les modules, je propose-

rai qu'il puisse s'agir de *mécanismes computationnels* partagés et par différents modules et par les facultés horizontales. De cette manière, ces opérations pourraient appartenir au répertoire des opérations de base de l'esprit et donc agir comme une trousse à outils computationnelle. De tels mécanismes computationnels pourraient être un premier pas vers un lien entre les descriptions de haut niveau de l'esprit et les théories psychologiques — ce qui est un prérequis pour une réelle compréhension des phénomènes en question.

Evidemment, la question de savoir si ces opérations peuvent soutenir les facultés horizontales est ouverte. Cette possibilité a cependant le potentiel de réconcilier les opérations statistiques et symboliques. D'un coté, on sait que l'esprit est équipé de puissants mécanismes statistiques ; d'autre coté, même les opérations du système perceptif fournissent des contraintes représentationnelles symboliques. Dès lors, il est possible de combiner ces deux composants en appliquant l'apprentissage statistique à ces opérations symboliques, fusionnant ainsi les puissants mécanismes d'apprentissage statistiques et la richesse représentationnelle des modèles symboliques. Il sera donc important d'étudier empiriquement si les primitives perceptives existent également dans les facultés horizontales.

12.1 Deux exemples de primitives perceptives

12.1.1 Une primitive détectant les répétitions

Les primitives pour lesquelles j'ai fourni de l'évidence sont de deux types : Un détecteur de répétitions et un opérateur de détection de positions de bord (PDBs). Les propriétés de la primitive détectant les répétitions ont été discutées en détail dans les sections 6.7 et 7.8 ; elle détecte les répétitions indépendamment des items qui les exemplifient, et elle est fort sensible aux facteurs perceptifs.

Il convient de noter que plusieurs aspects de mes résultats montrent

qu'il s'agit d'une opération symbolique. D'abord, on a vu dans le chapitre 6 que tout mécanisme statistique prédit le contraire de mes résultats : de tels mécanismes devraient apprendre les structures ordinales plus facilement que les structures avec répétitions parce que les niveaux de pitch et les intervalles sont plus prédictifs des structures ordinales que des structures avec répétitions[1].

On a rencontré une deuxième objection contre l'expérience de Marcus et al. (1999) : les modèles connexionnistes pourraient reproduire — en principe — leurs résultats après un pré-entraînement (Altmann, 2002; McClelland & Plaut, 1999), même si cette possibilité n'a jamais été évaluée psychologiquement. Or, mes expériences permettent de réfuter ce contre-argument pour le cas de la primitive traitant les répétitions. En effet, pour les mécanismes associationnistes, traiter une structure revient à traiter les items particuliers qui l'exemplifient — simplement parce que ces mécanismes n'ont pas de représentation des structures. Par conséquent, un mécanisme associationniste devrait pouvoir traiter une structure quand il peut traiter ses exemplaires et inversement ; une dissociation entre la capacité de traiter une structure et celle de traiter les items qui l'exemplifient est donc impossible. Or, les structures avec répétitions sont généralisées seulement en PDB mais pas en milieu de séquence — alors que les sujets discriminent les séquences différant seulement en leurs syllabes médiales aussi bien que les séquences différant en leurs PDBs. Par conséquent, la faculté de traiter les répétitions est indépendante de la faculté de traiter les syllabes qui l'exemplifient ; ceci est profondément incompatible avec les prédictions de tout mécanisme associationniste. Par conséquent, les contre-arguments contre l'expérience de Marcus et al. (1999) ne s'appliquent pas aux expériences présentées ici ; il semble donc raisonnable de conclure que la primitive détectant les répétitions est une opération symbolique.

[1]Cet argument dépend de l'hypothèse que le cerveau encode les niveaux de pitch ou les intervalles, mais il semble difficile d'imaginer que ceci pourrait ne pas être le cas — étant donné que les représentations primaires sont tonotopiques.

En conclusion, l'esprit humain est doté d'une opération symbolique spécialisée qui détecte des répétitions. Cette opération est fortement affectée par des facteurs perceptifs comme la saillance des positions où se trouvent les items qui sont répétés. Malgré ses limitations, on verra plus loin que cette primitive permet d'expliquer certains phénomènes intéressants.

La proposition que l'esprit humain est doté d'une opération spécialisée pour traiter les répétitions est également compatible avec certains modèles computationnels de l'expérience de Marcus et al. (1999). Par exemple, Dominey et Ramus (2000) ont montré qu'un modèle pourtant capable d'apprendre des séquences ne peut pas généraliser les structures utilisées par Marcus et al. (1999). Afin de généraliser ces structures, ils ont augmenté leur modèle par un 'module d'abstraction' (voir également Dominey, Lelekov, Ventre-Dominey & Jeannerod, 1998).

Dans ce modèle, les stimuli d'entrée sont mappés aux unités de sortie. Le module d'abstraction comprend un 'buffer' de mémoire à court terme ainsi que des unités de 'reconnaissance'. A chaque moment, le buffer contient les cinq dernières sorties du modèle ; si le codage se fait par exemple en termes de syllabes, le buffer stocke les cinq dernières syllabes. Cinq des six unités de reconnaissance testent si la sortie actuelle correspond aux différents éléments du buffer ; par exemple, la première unité de reconnaissance est active si la sortie courante est la même que la sortie précédente (c'est-à-dire si une syllabe est répétée), et la cinquième unité de reconnaissance est active si la sortie courante est la même que la sortie cinq itérations avant. La sixième unité de reconnaissance est activée si la sortie courante ne correspond à aucun des éléments du buffer. La sortie des unités de reconnaissance est connectée à une couche récurrente ; l'activité de cette couche encode donc la structure des séquences présentées en termes de leur pattern de répétitions — indépendamment des items qui l'exemplifient. Pour des séquences de la forme ABA, la séquence abstraite

à retenir serait donc [nouvel élément][nouvel élément][même élément que deux éléments avant]. La couche récurrente est branchée sur la couche de sortie ; ces connections sont les seules à subir de l'apprentissage.

Comment un tel modèle peut-il reproduire les généralisations de l'expérience de Marcus et al. (1999) ? Considérons des phrases de la forme ABB. Chaque phrase (par exemple 'wo — fe — fe') est suivie d'un marqueur de fin de phrase ; la phrase est donc représentée comme 'wo — fe — fe — #', où # est le marquer de fin de phrase. Si le réseau est entraîné avec des phrases ayant la même structure (par exemple ABB), l'activité de la couche récurrente (qui encode la structure de répétitions) sera associée au marqueur de fin de phrase — car le réseau apprendra à activer la représentation du marqueur de fin de phrase après des séquences (abstraites) de la forme [nouvel élément] [nouvel élément] [même élément que le précédent] ; ces séquences sont calculées par les unités de reconnaissance. Par conséquent, le temps de réaction du modèle pour de nouvelles phrases avec une grammaire consistante sera réduit par rapport à de nouvelles phrases avec une grammaire inconsistante, car la représentation *abstraite* des séquences respectant la grammaire consistante excitera le marqueur de fin de phrase, ce qui n'est pas le cas pour les séquences obéissant à une autre grammaire.

Comme le module d'abstraction ne peut traiter que les structures définies par des répétitions en différentes positions, ce modèle prédit que les structures ordinales devraient être traitées plus difficilement que les structures avec répétitions. Alors qu'il reste encore à vérifier s'il peut également reproduire les problèmes de généraliser des structures avec répétitions dont les répétitions sont en milieu de séquence, l'idée générale — de postuler des opérations spécifiques pour certaines généralisations — est proche de ce que je développerai dans la suite.

12.1.2 Une primitive détectant les PDBs

La deuxième primitive pour laquelle j'ai fourni de l'évidence traite les items qui apparaissent en PDB ; en effet, les PDBs fonctionnent comme des variables positionnelles, et les sujets apprennent les classes des items qui peuvent se trouver dans ces positions. Par exemple, lors de l'expérience où les sujets devaient apprendre la structure des mots de la forme A_iXC_i, ils ont appris que A $\in$ {pu, be, ta} et que C $\in$ {ki, ga, du}.

Il convient de noter que cette primitive n'assure pas simplement un traitement préférentiel, car les sujets ne doivent pas seulement savoir qu'un item a été rencontré, mais également *où* dans les séquences il a été rencontré. Ceci peut être illustré avec l'expérience de pensée suivante. Imaginons que les sujets doivent retenir des séquences de sept syllabes dont la quatrième syllabe est toujours présentée avec une plus grande amplitude que les autres syllabes. Il y aura donc trois syllabes en des positions saillantes, à savoir la première, la dernière ainsi que la quatrième syllabe. Si la saillance des PDBs favorisait simplement le traitement des items dans ces positions, les sujets devraient savoir uniquement *que* ces items sont apparus — mais pas *où* ils sont apparus. Ils devraient être incapables de savoir si une syllabe est apparue en première, quatrième ou dernière position — car toutes ces positions sont saillantes. Afin d'expliquer les données présentées dans cette thèse, les sujets doivent donc également encoder la *position* des items. Ceci suggère que les PDBs pourraient fonctionner comme *variables positionnelles*.

Des variables positionnelles reposent sur des opérations symboliques parce que les positions sont indépendantes des items qui les exemplifient ; une PDB est une PDB, indépendamment de si la syllabe qui s'y trouve est /pu/ or /ki/. De plus, on a vu que les mécanismes purement associationnistes apprendraient les séquences des syllabes mais par leurs positions.

D'autres expériences suggèrent que différents animaux peuvent for-

mer des représentations des positons séquentielles. Chez l'homme, ces expériences ont utilisé des intrusions lors de la mémorisation de listes où les intrus respectaient quand même leurs positions séquentielles (voir par exemple Conrad, 1960; Ryan, 1969), des paradigme de transfert lors de la mémorisation de listes (voir par exemple Ebenholtz, 1963), la mémorisation des positions séquentielles (voir par exemple Hicks, Hakes & Young, 1966; Schulz, 1955) ou encore des paradigmes d'apprentissage de grammaires artificielles (voir par exemple Braine, 1963, 1966; Smith, 1966, 1967, 1969) ; d'autres animaux peuvent catégoriser des stimuli par leurs positions séquentielles (voir par exemple Chen, Swartz & Terrace, 1997; D'Amato & Colombo, 1989; Orlov, Yakovlev, Hochstein & Zohary, 2000). Les expériences présentées dans cette thèse (et, en effet, également certaines des expériences précitées) montrent cependant que seulement les positions séquentielles proches des PDBs fonctionnent comme des véritables variables positionnelles ; les sujets peuvent donc former des représentations explicites de ces positions et les 'associer' aux items qui s'y apparaissent[2].

En conclusion, les PDBs sont des positions saillantes proches d'une 'transition' qui attire l'attention ; par conséquent, elles sont traitées de manière préférentielle. Elles agissent comme des *variables positionnelles* ; elles sont donc un autre exemple d'une opération symbolique qui résulte des contraintes du système perceptif.

12.2 L'esprit est-il un ordinateur ?

L'esprit pourrait être équipé d'une boîte à outils computationnelle comportant des opérations primitives fort spécialisées et limitées. Avant de discuter les implications de cette proposition, il convient de la comparer à d'autres propositions faisant appel à des primitives computationnelles.

[2]J'utilise le terme 'association' ici dans un sens générique, en particulier sans présupposer qu'elle repose sur des opérations statistiques.

En effet, d'autres auteurs ont proposé une vue très différente des primitives computationnelles dont pourrait être doté l'esprit (voir par exemple Block, 1995; Marcus, 2001; Pylyshyn, 1984). En général, ces discussions étaient des illustrations abstraites de l'analogie entre l'esprit et les ordinateurs, cette analogie reflétant que l'esprit est un système computationnel. D'autres auteurs ont cependant proposé une analogie très étroite jusque dans les composants de base du cerveau et des ordinateurs. Selon, par exemple, Marcus (2001) « registers are central to digital computers ; my suggestion is that registers are central to human cognition as well » (p. 55). Il discute dans la suite comment les registres pourraient être construits dans du tissu neuronal (pp. 55–58).

Or, une analogie très étroite entre les ordinateurs et l'esprit est problématique pour différentes raisons. D'abord, elle est difficile à étudier empiriquement faute de proposer des exemples précis des primitives qu'elle postule. Deuxièmement, tandis qu'une analogie étroite entre les ordinateurs et l'esprit pourrait sembler justifiée pour l'état stable à l'âge adulte (ce qui était la motivation de cette analogie après tout), il n'est pas clair si un tel système pourrait *apprendre* — puisque toutes les opérations dans un ordinateur sont *précâblées*. Or, quand un singe apprend par exemple de nouvelles catégories (comme dans les expériences de Freedman, Riesenhuber, Poggio & Miller, 2001, 2002), il devrait être incapable de décider si deux objets appartiennent à la même catégorie ou à deux catégories différentes — simplement parce que le détecteur d'identité ne pourrait pas être appliqué aux nouvelles catégories : comme elles sont nouvelles, elles n'auraient pas pu être 'branchées' sur le détecteur d'identité parce qu'elles n'existaient pas encore quand l'esprit a été 'câblé'. Or, les singes réussissaient dans cette tâche parfaitement bien. Il semble donc que les catégories et les opérations qui s'y appliquent n'auraient pas pu être précablées ; l'es-

prit doit donc pouvoir *apprendre*[3,4].

Le troisième problème d'une analogie étroite entre les ordinateurs et l'esprit est que les opérations dans un ordinateur sont *générales* ; en d'autres termes, les opérations de l'esprit devraient fonctionner *uniformément bien* pour toutes les opérations qu'elles peuvent exécuter, et pour tous les arguments possibles. Mes résultats montrent que ceci n'est pas le cas.

En conclusion, un ordinateur n'est pas un bon modèle des opérations de l'esprit : cette analogie ne peut pas décrire l'apprentissage ou le développement cognitif, et les opérations qu'elle postule sont plus générales que celles observées lors de mes expériences. Les primitives perceptives, par contre, sont des opérations spécialisées et limitées ; on pourrait même penser qu'on s'attendrait à ces limitations pour les composants du système biologique qu'est l'esprit. Si les computations de l'esprit sont décomposables en des opérations primitives, des primitives spécialisées comme les

[3]Un avocat d'une analogie étroite entre les ordinateurs et l'esprit pourrait répondre que toutes les structures de données possibles ainsi que les opérations entre ces structures pourraient être précâblées. Mais dans ce cas, il devrait être impossible de *perdre* la capacité de discriminer les contrastes phonémiques inexistants dans la langue maternelle d'une personne ; alors qu'un tel modèle peut certainement avoir des mécanismes pour éliminer les connexions qu'il n'utilise pas, ceci devrait être le cas également pour les connexions permettant l'apprentissage des nouvelles catégories dans les expériences de Freedman et al. (2001, 2002) — puisque les singes ne les utilisent pas avant que leur sort les amène à participer à ces expériences. Par conséquent, un ordinateur devrait ou bien ne pas apprendre les nouvelles catégories ou bien ne pas perdre les capacités non utilisées. Ces considérations montrent qu'une analogie étroite entre les ordinateurs et l'esprit est profondément incompatible avec l'apprentissage et, plus généralement, le développement cognitif.

[4]Les cas des programmes capables d'apprendre ne change pas cet argument. Ces programmes peuvent apprendre dans certains domaines spécialisés parce qu'ils ont été programmés de cette manière, mais ils ne peuvent pas apprendre des choses relativement arbitraires — ce qui semble pourtant être le cas de l'esprit. L'apprentissage spécifique à un domaine particulier grâce aux prédispositions spécialisées qu'un 'programmeur' (en l'occurrence l'évolution) a données à un système est précisément le type d'apprentissage auquel on pourrait s'attendre avec les primitives perceptives.

primitives perceptives sont donc des meilleurs candidats que les primitives comme dans un ordinateur.

12.3 Quelques applications des primitives perceptives

Alors que l'on peut se douter si des opérations comme les primitives perceptives peuvent être importantes pour des fonctions cognitives comme le langage, d'autres données suggèrent qu'il y a effectivement des computations linguistiques qui pourraient faire appel à un détecteur de répétitions ou à un détecteur de PDBs.

12.3.1 Le cas de l'OCP

Certains processus linguistiques font appel à des structures impliquant des répétitions. Un exemple est « l'Obligatory Contour Principle » (OCP) dans les langues sémitiques. Ces langues forment des mots en insérant des racines de consonnes dans les 'slots' des patterns de mots. McCarthy (1979) a proposé une représentation des racines sur un niveau séparé de la représentation des patterns de mots ; des contraintes phonologiques s'appliqueraient donc séparément aux consonnes (ou plus généralement séparément à chaque niveau de représentation). Dans sa version originale, l'OCP interdit l'occurrence d'items identiques adjacents sur le même niveau ; les consonnes répétées dans une racine sont donc interdites. Or, les consonnes sont souvent répétées en fin de mot. La solution proposée par McCarthy (1979) est que les racines de ces mots n'ont que *deux* consonnes, mais elles doivent quand même être insérées dans les *trois* slots d'un pattern de mot. Afin de remplir également le troisième slot, la deuxième consonne se propage vers la fin de mot. En résumé, McCarthy (1979) postule deux processus : Un processus qui interdit les répétitions dans les racines, et un autre qui réduplique la dernière consonne d'une racine de deux consonnes afin de l'insérer dans un pattern avec trois slots.

L'interaction des deux processus a comme résultat que l'acceptabilité des répétitions de consonnes dépend de la position de la répétition : les patterns de consonnes de la forme ABB sont acceptables tandis que les patterns de la forme AAB ne le sont pas[5].

Alors que l'OCP a été considéré d'abord comme un principe binaire (ou bien une séquence de consonnes est interdite ou bien elle ne l'est pas), Frisch, Pierrehumbert et Broe (2004) ont montré que la fréquence des 'violations' de ce principe dépend de la *similarité* entre les consonnes consécutives : plus deux consonnes sont similaires, moins elles peuvent se suivre[6]. Le résultat que l'application de l'OCP dépend de la similarité perceptive entre les consonnes confirme qu'un détecteur de répétitions pourrait effectivement résulter des contraintes du système perceptif.

12.3.2 Le cas des PDBs

On a vu que les PDBs sont des variables positionnelles. La primitive détectant les PDBs pourraient jouer le rôle d'une primitive de 'concaténation' ; les positions dans les mots pourraient être considérées comme une séquence de slots dont seules les PDBs fonctionnent véritablement comme des variables. Une telle primitive serait par exemple utile pour apprendre des régularités morphologiques, et en effet mes résultats pourraient être considérés comme la première démonstration expérimentale d'une opération symbolique qui pourrait supporter l'affixation.

Les PDBs sont également importantes d'un point de vue plus théorique. McCarthy et Prince (1993) ont montré qu'un grand nombre régu-

[5]Différents chercheurs ont essayé étudier la réalité psychologique des racines de consonnes et de l'OCP (Berent & Shimron, 1997; Berent, Everett & Shimron, 2001; Berent, 2002; Berent, Marcus, Shimron & Gafos, 2002; Berent, Vaknin & Shimron, 2004; Frisch & Zawaydeh, 2001) ; je ne discuterai cependant pas cette littérature parce qu'une interprétation correcte nécessiterait une discussion assez extensive.

[6]Il convient de noter que la récente tentative de Berent et al. (2004) de réfuter cette conclusion repose sur une malcompréhension des théories de Pierrehumbert.

larités phonologiques et morphologiques peut être expliqué en postulant une contrainte que les bords des constituants (par exemple des racines, des pieds, des syllabes, des morphèmes etc.) doivent être alignés. On peut par exemple décrire des patterns d'infixation en Tagalog en considérant l'interaction entre la contrainte habituelle 'no-coda' (c'est-à-dire les syllabes doivent être ouvertes) et une contrainte que l'infixe doit être aligné avec la racine. Même si cette théorie a été proposée dans le cadre de la théorie de l'optimalité (Prince & Smolensky, 1993), il n'y aucune raison de supposer que des PDBs ne pourraient pas jouer un rôle important également dans des cadres théoriques alternatifs.

Tandis que les structures avec répétitions sont importantes pour des phénomènes linguistiques comme l'OCP, la primitive détectant les PDBs pourrait supporter l'affixation ; de même, des descriptions linguistiques peuvent être simplifiées en postulant que les bords des constituants doivent être alignés. Malgré leurs limitations, les primitives perceptives pourraient donc être importantes pour certains processus de la faculté du langage.

Chapitre 13

Primitives perceptives et computations statistiques

Le dernier chapitre suggère que certaines primitives perceptives pourraient expliquer certains phénomènes linguistiques intéressants. Comme les primitives en questions sont très spécialisées et spécifiques (puisqu'elles sont des primitives perceptives), on peut se poser la question de savoir si de telles primitives permettent également de *l'apprentissage*. Comme des mécanismes statistiques sont des mécanismes d'apprentissage puissants, il pourrait être possible d'obtenir des éléments de réponse à cette question en se demandant comment les primitives interagissent avec des computations statistiques.

Alors que les processus symboliques et statistiques sont généralement considérés comme mutuellement exclusifs, la notion des primitives perceptives pourrait être une première étape en vue d'une synthèse entre ces 'alternatives'. Je présenterai d'abord des données qui montrent que les modèles opposant les computations symboliques et associationnistes ne décrivent pas correctement les données expérimentales ; ensuite, je présenterai des données qui suggèrent que les primitives perceptives — qui sont des opérations fondamentalement symboliques — peuvent subir de l'apprentissage statistique. Finalement, je proposerai un partage de tâche

entre les processus statistiques et symboliques au lieu de les opposer : Les opérations symboliques pourraient contribuer des contraintes représentationnelles alors que les opérations statistiques pourraient fournir les mécanismes d'apprentissage nécessaires pour apprendre à utiliser ces représentations.

13.1 Doit-on opposer les calculs statistiques et symboliques ?

La discussion sur l'existence des symboles mentaux a été menée pour la plupart dans le domaine de la morphologie inflexionnelle. En général, les auteurs opposent les opérations symboliques et statistiques et les considèrent comme mutuellement exclusives. Dans le modèle 'Words and Rules', de loin le modèle symbolique le plus influent, Pinker (1991, 1999 ; voir également Marcus et al., 1992) a par exemple proposé qu'une forme fléchie est d'abord recherchée dans la liste finie des formes irrégulières. Si une forme est trouvée, l'application de la règle est bloquée ; sinon, la règle par défaut est appliquée.

Or, les rôles des deux types de computation pourraient être plutôt complémentaires, chacun apportant des ingrédients différents à l'apprentissage. En allemand, par exemple, le suffixe /-s/ est le pluriel par défaut alors qu'il ne s'applique qu'à moins de 4-9% des noms (Pinker, 1999) ; de tels systèmes morphologiques sont connus sous le nom de *défaut minoritaire*[1]. Ces systèmes ont été considérés comme un argument contre les modèles purement statistiques (voir par exemple Clahsen et al., 1992; Clahsen, 1999; Marcus et al., 1995; Pinker, 1999; Sonnenstuhl, Eisenbeiss & Clahsen, 1999). Or, tandis qu'un mécanisme purement symbolique peut facilement *représenter* des systèmes de défaut minoritaire, il ne peut pas

[1]Le pluriel arabe ou le passé en anglais ancien sont également de tels systèmes, mais je prétendrai que tous les travaux sur les défauts minoritaires ont porté sur le pluriel allemand pour simplifier l'exposition.

les apprendre : Pourquoi un apprenti devrait-il choisir le pluriel le *moins fréquent* comme défaut[2] ? Contrairement aux mécanismes symboliques, les mécanismes statistiques peuvent apprendre ces systèmes sous deux conditions (Hahn & Nakisa, 2000; Hare et al., 1995; Plunkett & Nakisa, 1997). D'abord, le défaut doit s'appliquer partout dans l'espace phonologique ; par exemple, le passé simple régulier anglais s'applique à 'talk' aussi bien qu'à 'view' même si ces verbes sont phonologiquement très différents. Deuxièmement, les autres inflexions doivent être plus localisées ; les verbes irréguliers du passé simple anglais forment par exemple souvent des clusters comme les verbes ressemblant à 'drink' et 'sink' (qui ont des formes de passé similaires). Néanmoins, ces réseaux n'ont pas pu produire des formes de sortie ; ils devaient simplement choisir les classes de pluriel des mots, et ces classes étaient 'innées'. Ils devaient par exemple choisir entre les différents suffixes et les autres transformations possibles pour arriver à une forme de pluriel ; les transformations possibles étaient 'innées' aux modèles. Quand ils ont produit des formes de sortie, ils ont utilisé des mécanismes de nettoyage symboliques.

Les mécanismes statistiques et symboliques ont donc des problèmes différents avec les systèmes de défaut minoritaire : les mécanismes statistiques peuvent les apprendre à partir de la distribution des mots — mais ils ne peuvent pas représenter des formes de sortie ; inversement, les mécanismes symboliques peuvent représenter les formes de sortie mais ne peuvent pas apprendre les défauts minoritaires. Ce problème pourrait être résolu en postulant des représentations symboliques sensibles à la distri-

[2] A ma connaissance, le seul modèle symbolique qui a appris un défaut minoritaire est un modèle en ACT-R du pluriel allemand (Taatgen, 2001). Or, l'auteur admet que la raison pour laquelle son modèle généralise le suffixe /-s/ est que les équations du modèle favorisent des suffixes courts. Il est cependant bien connu que les enfants acquièrent préférentiellement les suffixes saillants (voir par exemple Hsieh et al., 1999; Peters & Stömqvist, 1996), et que les enfants souffrant du Specific Language Impairment ont des difficultés d'apprendre les morphèmes courts comme /-s/ (voir par exemple Leonard & Eyer, 1996). Par conséquent, ce modèle ne présente pas de mécanisme adéquat pour l'apprentissage du pluriel allemand.

bution des mots ; un tel système peut évidemment produire des formes de sorties, mais il peut également apprendre les systèmes de défaut minoritaire à cause de ses capacités statistiques.

Les 'généralisations minimales' de Albright (2002) et Albright et Hayes (2003) exemplifient cette approche[3]. Dans leur modèle, un apprenti extrait de multiples règles stochastiques auxquelles il attribue des valeurs de confidence. Prenons comme exemple un modèle apprenant le passé simple anglais. Pour trouver les règles, le modèle part de paires de mots dont un mot est la forme du présent d'un verbe et l'autre celle du passé. Le modèle détecte ce qui est en commun entre les deux formes de la paire et ce qui diffère entre elles ; à partir de cette différence, il projette une règle tout en retenant le contexte dans lequel elle s'applique. Considérons ce que le modèle apprendrait des paires 'shine - shined' et 'consign-consigned' :

(13.1) $\varnothing \rightarrow$ d / [ʃaɪn ____]$_{[+\text{passé}]}$

(13.2) $\varnothing \rightarrow$ d / [kənsaɪn ____]$_{[+\text{passé}]}$

La règle (13.1) exprime la formation de 'shined' à partir de 'shine' (dont la transcription phonétique est /ʃaɪn/). La différence entre ces deux formes est qu'un /d/ final est rajouté à la forme du présent. Pour former le passé, un élément vide (∅) en position finale est donc remplacé par /d/ ; cette règle s'applique aux éléments vides après /ʃaɪn/ (que l'on appelle le *contexte* de la règle). Une règle similaire s'applique à 'consign' ; un élément vide final est remplacé par /d/. La seule différence entre ces deux règles est le contexte où elles s'appliquent ; pour la règle (13.1), le contexte est /ʃaɪn/ et /kənsaɪn/ pour la règle (13.2). Ces règles peuvent donc être fusionnées en fusionnant leurs contextes. Le contexte de la règle fusionnée est l'union des deux contextes en termes de traits caractéristiques. Comme le passé est formé pour un grand nombre de verbes en remplaçant un élément final vide par /d/, le contexte de la règle '∅ →d' sera de plus en plus large jusqu'à ce que cette règle puisse s'appliquer à n'importe quel mot — une

[3]D'autres modèles de ce type sont connus comme théories de *schémas* (voir par exemple Bybee, 1995; Dabrowska, 2001, 2004; Köpcke, 1998).

fois que tous les exemples ont été traités.

Cette procédure génère des règles multiples stochastiques. Dans une deuxième étape, une 'valeur de confidence' est attribuée à chacune de ces règles. Cette valeur indique la probabilité que l'application d'une règle dans un voisinage phonologique fournit des formes correctes. Par exemple, on peut prédire avec une confidence relativement grande que les verbes ressemblant à 'drink' formeront leur passé d'une manière similaire. Pour générer une forme du passé à partir d'une forme du présent, on doit choisir la règle avec la plus grande valeur de confidence à l'endroit dans l'espace phonologique où se situe la forme du présent.

Même si le calcul des valeurs de confidence n'est pas nécessairement un mécanisme psychologiquement plausible, il pourrait être interprété en termes d'une *compétition* entre des formes de sortie multiples[4]. Après l'entraînement du modèle, il y a des régions dans l'espace phonologique où les règles peuvent être appliquées avec plus ou moins de confidence. Des expériences comportementales ont montré que les jugements d'acceptabilité sont en effet plus élevés dans les régions où la valeur de confidence d'une règle est haute : Ceci était le cas et pour des formes régulières et pour des formes irrégulières — ce qui suggère que les 'règles' sont en effet sensibles à la distribution de leurs arguments (c'est-à-dire les verbes auxquels elles s'appliquent).

[4]Il semble que des modèles incorporant une compétition entre l'inflexion régulière et irrégulière (voir par exemple Baayen et al., 1997) sont nécessaires pour des raisons indépendantes, par exemple pour expliquer les patterns des surgénéralisations (par exemple 'eated' au lieu de 'ate') ou des surinflexions (par exemple 'didn't ate' au lieu de 'didn't eat' ; Stemberger, 2002; Stemberger & Middleton, 2003). De plus, dans le cas d'un défaut minoritaire, le modèle 'Words and Rules' de Pinker (1991, 1999) et Marcus et al. (1992) prédit que *tous* les mots irréguliers (et donc la majorité des mots) devraient être accédés et donc amorcés avant qu'une seule forme régulière ne soit produite ; cette prédiction contre-intuitive peut être évitée si les formes régulières et irrégulières entrent en compétition.

Ces données suggèrent que les computations statistiques et symboliques pourraient être plus intégrées et complémentaires au lieu de s'opposer. Alors qu'il faut des opérations symboliques pour apprendre les régularités morphologiques, ces opérations doivent être elles-mêmes sensitives à la distribution des items auxquels ils s'appliquent. Les opérations symboliques et statistiques pourraient donc apporter différents ingrédients à l'apprentissage au lieu de s'opposer.

Ce partage de tâche pourrait être un phénomène assez général permettant de combiner la richesse représentationnelle des systèmes symboliques avec les puissants algorithmes d'apprentissages statistiques : les opérations symboliques pourraient contribuer des contraintes représentationnelles alors que les mécanismes statistiques pourraient permettre d'apprendre comment utiliser ces représentations. Après tout, même si l'on a une opération symbolique pour l'affixation, elle doit échantillonner les stimuli afin de savoir quel affixe doit être utilisé — puisque les affixes diffèrent entre les langues ; cet échantillonnage pourrait utiliser des méthodes statistiques. Ce partage de tâche a été utilisé également en syntaxe. L'approche du data-oriented parsing (voir par exemple Bod & Scha, 1997) montre par exemple que l'application d'opérations statistiques aux représentations syntactiques — symboliques — pourrait donner lieu à des formalismes puissants. La notion des primitives perceptives pourrait être une base psychologique pour ces modèles théoriques et un premier pas vers une synthèse entre les modèles symboliques et statistiques de l'esprit. Les primitives perceptives pourraient être les briques de base symboliques fournissant des contraintes représentationnelles auxquelles seront appliqués les mécanismes d'apprentissage statistique. Il est donc important de se demander si les primitives perceptives peuvent subir de l'apprentissage statistique.

13.2 Apprentissage avec des primitives perceptives

On a vu que pouvoir appliquer des opérations statistiques aux représentations symboliques résoudrait des problèmes théoriques importants. Pour implémenter cette hypothèse, on pourrait par exemple penser que les primitives perceptives pourraient être les représentations symboliques élémentaires auxquelles sont appliquées les opérations statistiques. Il est donc important de se demander si les primitives perceptives peuvent effectivement subir de l'apprentissage statistique.

Alors que cette question n'a pas été étudiée directement, certaines données suggèrent qu'au moins la primitive calculant les répétitions pourrait subir de l'apprentissage statistique. Les singes peuvent par exemple associer un indice visuel à la primitive détectant les répétions (voir par exemple Wallis, Anderson & Miller, 2001). Dans cette expérience, les singes devaient répondre à une relation d'identité (c'est-à-dire ils devaient répondre quand deux objets étaient identiques) quand un indice visuel a été présenté et à une relation de non-identité quand un autre indice a été présenté ; ils devaient donc associer ces relations aux indices visuels. Ceci suggère qu'au moins la représentation de la primitive détectant les répétitions peut être utilisée dans les associations.

Les primitives perceptives, peuvent-elles également former des associations avec leurs arguments ? Alors que cette possibilité a une certaine plausibilité — car on peut avoir l'impression que n'importe quelle représentation mentale subit de l'apprentissage statistique, il n'y a pas de données expérimentales permettant de répondre à cette question. En vue des problèmes théoriques importants que cette possibilité permettrait de résoudre, il est important de l'étudier empiriquement.

Chapitre 14

Primitives perceptives et facultés centrales — une boîte à outils computationnelle ?

On vient finalement à la question centrale pour évaluer les implications des résultats présentés dans cette thèse : des opérations spécialisées et limitées comme les primitives perceptives, se trouvent-elles également dans les facultés centrales ? Dans l'affirmative, elles pourraient être des mécanismes computationnels partagés par les modules et les facultés centrales, formant ainsi une boîte à outils computationnelle.

Cette manière de conceptualiser la manipulation des symboles a de prime abord l'avantage qu'on puisse l'étudier empiriquement. Si l'on était obligé de considérer toute opération symbolique comme le résultat d'un seul mécanisme général et monolithique, comment pourrait-on étudier les phénomènes psychologiques sous-jacents ? Avec des opérations spécialisées et limitées, par contre, on peut étudier chaque opération individuellement. Conceptualiser la manipulation des symboles en termes de primitives perceptives pourrait donc être un premier pas vers une théorie psychologique de la manipulation des symboles.

Dans ce chapitre, je clarifierai d'abord l'objet que les primitives perceptives pourraient décrire. Ensuite, je montrerai que les primitives perceptives pourraient remplir la plupart des critères de Fodor et Pylyshyn (1988). Pour conclure ce chapitre, je donnerai différentes raisons pour lesquelles une conceptualisation de la manipulation des symboles en termes de primitives perceptives est effectivement attractive.

14.1 L'objet étudié

Les limitations des généralisations observées dans les expériences peuvent sembler difficiles à réconcilier avec les capacités des sujets en dehors des expériences. En effet, on peut se demander comment ils pourraient faire leurs études si les échecs dans les expériences étaient représentatifs pour leurs compétences computationnelles mentales. Essayer d'extrapoler des primitives perceptives vers la pensée ou le langage pourrait donc sembler absurde : le système perceptif a les propriétés qu'il a — mais elles semblent entièrement irrelevantes pour les fonctions cognitives plus centrales ou le langage.

Or, on peut également appliquer le raisonnement inverse. En effet, lors des expériences, rien n'empêchait les sujets d'appliquer les moyens computationnels puissants qui leur permettent par exemple de faire leurs études. Dans plusieurs expériences, ils avaient même l'occasion de contempler les stimuli *ad libitum* — sans pour autant généraliser les structures sans répétitions ou non pas localisées en PDB. Il semble donc que ces moyens computationnels puissants n'aient pas été suffisants pour généraliser certaines structures pourtant extrêmement simples. Il est donc tout à fait possibles que les limitations que j'ai observées sont représentatives pour d'autres fonctions cognitives ; en d'autres termes, il est possible que les primitives comme celle détectant les répétitions ou celle détectant les PDBs fassent partie d'une trousse à outils computationnelle de l'esprit.

En effet, la question de savoir si la notion des primitives perceptives est pertinente pour étudier les fonctions cognitives plus centrales revient à la question de savoir ce qui est l'objet des sciences cognitives. Pour répondre à cette question, Marr et Nishihara (1992) ont par exemple proposé que chaque problème de traitement d'information puisse être décrit sur quatre niveaux : Les composants de bases, les mécanismes implémentés par des ensembles des composants de base, l'algorithme et la théorie. Ce serait uniquement le quatrième niveau (le plus abstrait) qui est l'objet des sciences cognitives.

Même s'il n'est pas nécessaire d'adhérer à une vue aussi radicale (en effet, il y a des bonnes raisons de penser qu'une séparation stricte entre les niveaux de descriptions ne serait pas une stratégie de recherche particulièrement efficace), les niveaux de description sont utiles puisqu'ils permettent d'étudier différents aspects d'un système sans que l'on puisse attribuer plus de 'réalité' à un aspect qu'à un autre[1]. On peut s'intéresser à la description formelle la plus élégante possible du langage ou aux mécanismes psychologiques qui pourraient donner lieu aux phénomènes décrits par ces formalismes. Pour l'instant, ces deux aspects sont presque entièrement séparés ; ceci est aussi reflété par la dissociation entre la *compétence* et la *performance* (ou entre le langage I et E dans une terminologie plus récente). Les humains disposeraient d'une compétence grammaticale qui est l'objet de la linguistique formelle, mais ses manifestations seraient

[1]Ceci peut être illustré avec le concept d'une marche aléatoire. Une marche aléatoire peut décrire (dans différentes dimensions) le mouvement brownien, des aspects des marchés financiers, le mouvement des molécules dans les liquides, les verres de spin, les réseaux de neurones, les réseaux électriques ou encore d'autres phénomènes. Le formalisme mathématique de la marche aléatoire, a-t-il une réalité en dehors des exemples qu'il permet de modéliser ? La réponse à cette question dépend des phénomènes que l'on veut étudier : si l'on veut étudier des questions formelles on considérera la marche aléatoire comme la réalité sous-jacente à toutes ses manifestations ; si l'on veut comprendre comment *fonctionne* un système particulier (par exemple un réseau de neurones), on considérera par exemple la transmission synaptique comme la 'réalité' sous-jacente et sera ravi de pouvoir s'appuyer sur un formalisme qui a été développé pour d'autres domaines.

'contaminées' par des limitations de mémoire, des facteurs perceptifs ou d'autres facteurs irrelevants pour les compétences grammaticales proprement dites[2]. Par conséquent, on ne sait ni comment les théories linguistiques pourraient être liées à la psychologie humaine ni comment des mécanismes psychologiques pourraient donner lieu au langage. Or, une vraie compréhension de l'esprit permettrait de voir le lien entre des mécanismes psychologiques et des théories linguistiques.

Comme il n'y a pas de description définitive de la faculté du langage pour l'instant (une preuve est que l'on ne dispose pas de correcteurs de grammaire qui fonctionnent) et comme il n'y a probablement pas de neurones spécialisés pour des phénomènes abstraits comme le c-command, certains phénomènes linguistiques pourraient émerger par l'interaction d'un certain nombre de composants qui pourraient être accessibles à l'étude empirique. C'est là où les primitives perceptives entrent en jeu : on peut essayer de trouver des liens entre les phénomènes macroscopiques comme les transformations grammaticales et leurs mécanismes computationnels élémentaires sous-jacents. De cette manière, on pourrait étudier les mécanismes psychologiques de ces phénomènes et trouver ainsi un lien entre ces deux niveaux de représentation.

Evidemment, on ne saurait pas étudier des mécanismes psychologiques sans être guidé par une vue d'un niveau plus haut sur ce qui pourrait être la *fonction* de l'objet étudié. Par conséquent, ces deux aspects sont forcément complémentaires. Une recherche sur les niveaux plus abstraits est nécessaire pour guider la recherche sur les mécanismes psychologiques, mais la recherche sur les mécanismes psychologiques détermine si les théo-

[2]Une autre manière de comprendre la distinction entre compétence et performance serait de la considérer comme une hypothèse simplificatrice. On ne dirait pas non plus que la loi de la gravitation est fausse parce qu'elle ne prend pas en compte les effets de la résistance à l'air. Dans d'autres disciplines cependant, on cherche à justifier des hypothèses simplificatrices. Les effets de la friction étaient par exemple connus déjà par Galilée, et on peut prédire ses effets aussi bien que ceux de la gravitation.

ries d'un niveau plus haut ont une chance de décrire correctement les systèmes biologiques (et non pas logiques) que sont l'esprit et la faculté du langage. La notion des primitives perceptives pourrait être un premier pas vers un lien entre ces niveaux de description.

14.2 Niveaux de représentation des primitives perceptives

Si les primitives perceptives sont importantes pour les facultés horizontales, elles ne peuvent pas être limitées aux opérations 'perceptives'[3], mais doivent également intervenir sur les niveaux de représentation plus abstraits. L'OCP en est un exemple. Malgré l'interdiction des répétitions de consonnes adjacentes, les répétitions des dernières consonnes d'un mot sont fréquentes. La solution proposée par McCarthy (1979) est que les consonnes répétées proviennent d'une racine de *deux* consonnes qui est insérée dans un pattern de mot avec *trois* slots et que la dernière consonnes de la racine est redupliquée afin de remplir également le troisième slot. Au moins deux représentations distinctes des répétitions devraient donc exister : une qui interdit les répétitions adjacentes (par exemple sur le niveau phonologique), et une deuxième, probablement sur un niveau supérieur (par exemple sur le niveau morphologique), qui répète la dernière consonne d'une racine avec seulement deux consonnes.

Je propose que cette double représentation n'est pas une propriété particulière de la primitive détectant les répétitions, mais que les primitives existent en plusieurs copies sur plusieurs niveaux de représentation et plusieurs modules. Chaque copie pourrait être informationnellement encapsulée et spécifique à son domaine d'application ; la possibilité d'observer plusieurs copies rend cependant les opérations correspondantes applicables à plusieurs domaines. Je garderai quand même le terme 'primitives

[3]Ce que j'entends par 'perceptif' est situé relativement tôt dans la chaîne de traitement ; ceci pourrait être indexé par exemple avec des méthodes électrophysiologiques.

perceptives' pour les distinguer des primitives générales comme on les trouve dans les ordinateurs.

La proposition que les primitives perceptives existent sur plusieurs niveaux de représentation est également compatible avec l'hypothèse de Itti et Koch (2001) que la saillance d'un item est calculée par des mécanismes centre-pourtour hiérarchiques ou encore avec la proposition de Gallistel (2000) que « biological mechanisms are hierarchically nested adaptive specializations ». Il est donc possible que les primitives perceptives soient ce que Fodor (1983) a appelé des 'mécanismes' qui pourraient être partagés entre les modules et les facultés horizontales ; tandis que Fodor (1983) a proposé que par exemple la mémoire pourrait faire partie de ces mécanismes, mes résultats suggèrent que ceci pourraient également être le cas pour de simples opérations symboliques. Les primitives perceptives pourraient donc être les éléments d'une trousse à outils computationnelle de l'esprit[4].

[4]Des opérations sur différents niveaux de représentation permettraient également de résoudre le problème du contenu des variables que l'on a rencontré dans l'introduction. En effet, Marcus (2001) a proposé que les représentations des opérations, des variables et des objets concrets sont distinctes et séparées (p. 51). J'ai montré qu'il est impossible pour un tel modèle de manipuler les variables correctement — car le modèle ne peut pas savoir *comment* les variables doivent être manipuler s'il ne 'sait' pas ce qu'elles représentent. Dans un ordinateur, par exemple, les sons ou les images sont représentés simplement comme des nombres et l'ordinateur ne peut pas 'savoir' s'il doit les envoyer à l'écran ou à la carte son — à moins qu'un programmeur humain ne le lui indique *a priori*. Par conséquent, les opérations ainsi que les variables doivent contenir des aspects du contenu sémantique de ce que les variables représentent. Si les opérations sont spécialisées pour des computations particulières, analysant ainsi un aspect particulier de l'environnement, et si les variables sont spécifiquement intégrées avec ces opérations (et non pas de la mémoire générique disponible pour toutes les opérations comme dans un ordinateur), les opérations et les variables ont automatiquement un contenu sémantique : savoir 'où' une opération se situe implique savoir ce qu'elle traite ; en d'autres termes, l'*identité* des variables et des opérations a un contenu sémantique. Par conséquent, les modules peuvent 'savoir' implicitement comment les variables doivent être manipulées si les opérations et leurs variables sont spécialisées.

14.3 Critères d'évaluation

On a vu que Fodor et Pylyshyn (1988) ont proposé plusieurs propriétés que les calculs mentaux doivent avoir. Ces propriétés sont la productivité, la compositionalité, la systémacité et la cohérence inférentielle. De même, Gómez et Gerken (2000) ont proposé que les généralisations avec des *catégories* d'items sont cruciales pour la cognition humaine. Je montrerai que les primitives perceptives pourraient être compatibles avec chacune de ces propriétés[5].

14.3.1 Primitives perceptives et productivité

Les primitives perceptives sont des opérations de *type* (et non pas de token) ; par conséquent, elles sont indépendantes des items particuliers auxquels elles sont appliquées. Elles sont donc productives par leur définition même.

14.3.2 Primitives perceptives et compositionalité

Fodor et Pylyshyn (1988) ont proposé que la compositionalité est une propriété fondamentale de la cognition humaine[6]. Il convient d'abord de noter que la détection d'une répétition est déjà une opération compositionnelle : on détecte qu'un item est répété, mais cet item est nécessairement une autre *représentation*. Comme une représentation est forcément le résultat d'une opération mentale, la primitive détectant les répétitions prend les résultats d'autres opérations comme arguments ; même si l'on ne serait probablement pas tenté d'assimiler la détection des répétitions aux opérations compositionnelles en syntaxe, on voit au moins comment pourraient être construites les opérations compositionnelles à partir d'in-

[5]Je ne discuterai pas la cohérence inférentielle parce qu'il n'est pas clair comment elle se manifesterait avec les primitives perceptives.

[6]Voir également Hauser, Chomsky et Fitch (2002) qui appellent cette propriété 'récursivité' et proposent qu'elle est une propriété exclusive de la cognition humaine, en particulier du langage.

grédients aussi élémentaires que les primitives perceptives.

D'autres expériences suggèrent également que les répétitions peuvent être utilisées dans les expressions compositionnelles. Les singes peuvent par exemple associer un indice visuel à une répétition (Wallis et al., 2001). Dans certains essais, les singes ont dû répondre quand un stimulus était identique au stimulus précédent ; dans les autres essais, ils ont dû répondre quand les deux stimuli étaient différents. La relation à laquelle ils ont dû réagir (identité ou non-identité) a été indiquée par l'indice visuel. Comme les singes ont bien réussi dans cette tâche, ils ont utilisé la sortie de la primitive détectant la répétition comme argument pour l'association avec l'indice visuel. En d'autres termes, une opération (l'association) a pris le résultat d'une autre opération (la détection de la répétition) comme argument. Par conséquent, la primitive détectant les répétitions ne peut pas seulement prendre d'autres représentations comme arguments, mais la primitive elle-même peut être un argument pour d'autres opérations.

Un autre argument en faveur de la possibilité que les primitives perceptives pourraient supporter la compositionalité vient des expériences présentées dans cette thèse. En effet, les PDBs n'induisent pas seulement des généralisations comme dans les expériences où les sujets ont dû apprendre que certaines consonnes ou syllabes devaient apparaître en des PDBs, mais elles modulent également la généralisation des structures avec répétitions. Or, l'avantage pour les généralisations en PDB est probablement indépendant de l'opération détectant les répétitions. Par conséquent, la primitive détectant les PDBs s'applique à l'opération détectant les répétitions, expliquant ainsi pourquoi seules les répétitions en PDBs sont généralisées. De nouveau, une opération peut prendre une autre comme argument.

Ces données suggèrent que les primitives perceptives pourraient être utilisées dans des circonstances qui ressemblent aux expressions compositionnelles ; elles suggèrent également que les computations composition-

nelles pourraient ne pas être réservées ni au langage ni à l'homme. Si d'autres primitives peuvent également être utilisées de cette manière, elles rempliraient une des conditions formulées par Fodor et Pylyshyn (1988). Il est donc important d'examiner cette question plus empiriquement.

14.3.3 Primitives perceptives et catégories

Certaines expériences suggèrent que les primitives perceptives pourraient être utilisées avec des catégories. Les singes peuvent par exemple apprendre de nouvelles catégories (par exemple les catégories des chats et des chiens) et décider si deux objets appartiennent à la même catégorie ou pas ; ils appliquent donc la relation d'identité à l'appartenance aux catégories (Freedman et al., 2001, 2002). Des neurones dans le cortex pré-frontal ont codé pour ces nouvelles catégories. Ceci suggère (i) que les catégories peuvent être représentées *indépendamment* des tokens qui les implémentent, et (ii) qu'elles peuvent être des arguments des primitives perceptives — puisque la relation d'identité portait sur l'appartenance aux catégories. Un bémol important concernant cette observation est que les catégories utilisées dans ces expériences étaient définies par la ressemblance perceptive de leurs membres. Or, les catégories linguistiques ne peuvent pas être définies de cette manière[7]. Il est donc un projet de recherche important d'étudier empiriquement si les primitives perceptives peuvent être utilisées également avec des catégories plus linguistiques.

D'une certaine manière, on pourrait considérer les expériences où les sujets ont dû apprendre que certaines consonnes ou syllabes devaient apparaître en PDB comme des démonstrations de la capacité de la primitive détectant les PDBs d'interagir avec des catégories. En effet, les sujets ont dû apprendre que les consonnes ou syllabes qui pouvaient apparaître en

[7]Certains auteurs ont cependant proposé que les propriétés acoustiques des noms et des verbes sont différentes (voir par exemple Kelly, 1996) comme le pourraient être les propriétés acoustiques des mots de contenu et des mots de fonction (voir par exemple Selkirk, 1996; Morgan, Shi & Allopenna, 1996; Shi, Werker & Morgan, 1999).

position initiale ou finale formaient deux catégories mutuellement exclusives. Cependant, alors que ces expériences ont montré que l'extraction de ces catégories est limitée aux PDBs, de telles limitations n'existent pas pour les catégories linguistiques (même si ces limitations ne sont pas surprenantes étant donné que les catégories en question étaient le résultat de l'interaction avec la primitive détectant les PDBs).

En conclusion, il est une importante question de recherche de savoir si les primitives perceptives peuvent interagir avec les catégories, mais les résultats présentés ici suggère qu'il est au moins justifié de se poser cette question.

14.3.4 Primitives perceptives et systématicité

La dernière des conditions proposées par Fodor et Pylyshyn (1988) que je discuterai est la systématicité ; c'est en effet la propriété des primitives perceptives pour laquelle il y a le moins de données expérimentales. Les primitives perceptives en soi ne sauraient garantir la systématicité. Or, si les primitives peuvent subir de l'apprentissage statistique et si elles peuvent être utilisées avec des catégories, la systématicité découle automatiquement.

Supposons que l'on ait une primitive avec trois 'slots' XYZ, et que le premier slot soit associé à la classe 'nom', le deuxième à la classe 'verbe' et le troisième à la classe 'nom' ; en d'autres termes, cette primitive est le pattern d'une phrase avec un verbe transitif. Cette 'primitive' est évidemment entièrement ad-hoc mais elle permet d'illustrer comment les associations avec les catégories pourraient en principe garantir la systématicité. Considérons comment pouvoir penser 'Jean Y Marie' peut impliquer pouvoir penser 'Marie Y Jean' (où Y est un verbe transitive). Comme 'Jean' et 'Marie' appartiennent à la même catégorie, ces tokens sont ainsi indirectement connectés aux slots X et Z. Inversement, 'Jean' peut être lié à un slot seulement si 'Maire' est également lié à ce slot puisque ces deux to-

kens appartiennent à la même catégorie. Par conséquent, pouvoir penser 'Jean Y Marie' implique pouvoir penser 'Marie Y Jean'. Si les primitives peuvent former des associations avec leurs arguments en général, et avec des catégories en particulier, elles pourraient supporter la systématicité. Il est donc important de répondre à cette question empiriquement.

Même si cet exemple est ad-hoc et artificiel, on peut appliquer les mêmes principes — les associations entre opérations, des catégories sur lesquelles les opérations sont définies et les items particuliers — à des grammaires minimalistes comme celle de Stabler (1998). On obtiendrait donc une grammaire formellement attractive qui fait de plus des prédictions vérifiables et sur l'usage et sur l'acquisition du langage. Il est cependant préférable d'étudier ces questions d'abord dans des systèmes simplifiés avant de passer aux complexités du langage.

Les données présentées dans cette section suggèrent que les primitives perceptives pourraient supporter la productivité, la compositionalité, les généralisations impliquant les catégories ainsi que la systématicité ; de même, il est probable que des calculs statistiques puissent être appliqués à ces primitives. Il est donc envisageable que les primitives perceptives pourraient avoir certaines propriétés fondamentales de l'architecture cognitive. Il est donc un projet de recherche important d'étudier empiriquement si les primitives perceptives ont effectivement ces propriétés. Un tel projet pourrait être un premier pas vers une théorie psychologique et mécaniste du langage et de la pensée.

14.4 Puissance des combinaisons de composants simples

Alors qu'il est certainement vrai qu'il y a encore un fossé conceptuel considérable qui sépare les capacités générales comme par exemple l'étude de la physique et les opérations limitées que j'ai étudiées, différentes rai-

sons suggèrent que l'approche au cas par cas des primitives perceptives est prometteuse pour commencer à étudier les mécanismes psychologiques de ce que l'on appelle la manipulation des symboles. Même si la notion des primitives perceptives est inspirée par les travaux sur l'apprentissage chez les animaux (voir par exemple Gallistel, 1990, 2000; Gould & Marler, 1987), plusieurs auteurs ont proposé qu'également des phénomènes complexes comme le langage (voir par exemple Pinker, 1997) ou la prise de décision (voir par exemple Gigerenzer et al., 1999) pourraient faire appel à un ensemble d'opérations spécialisés[8]. Comme l'esprit est un système biologique et « biological mechanisms are hierarchically nested adaptive specializations, each mechanism constituting a particular solution to a particular problem » (Gallistel, 2000), il ne serait pas vraiment surprenant de trouver que les processus cognitifs reposent sur beaucoup de composants spécialisés et limités.

Il est par ailleurs bien connu qu'une combinaison de composants très simple peut être un système computationnel puissant ; l'illustration la plus célèbre de cette observation est une machine de Turing qui est également 'construite' de composants très simples. Pour cette raison encore, il semble raisonnable de chercher des primitives perceptives également dans les facultés centrales.

14.5 Primitives perceptives de la faculté du langage

Les primitives perceptives, peuvent-elles jouer un rôle pour la faculté du langage ? Certains aspects de l'acquisition du langage sont en effet modulés par des facteurs perceptifs. Les morphèmes saillants sont par exemple appris plus tôt que les morphèmes moins saillants (voir par exemple

[8]Un autre exemple où des facteurs perceptifs peuvent influencer des processus cognitif qui pourraient être centraux a été fourni par Ahn et Medin (1992). Ils ont montré que la saillance d'un trait détermine son rôle lors de la catégorisation des items correspondants.

Hsieh et al., 1999; Johnston, 1991; Leonard & Eyer, 1996; Peters & Stömqvist, 1996) ; en syntaxe, certaines constructions sont apprises plus tôt si les constituants correspondants apparaissent en des postions saillantes (voir par exemple Furrow et al., 1979; Gleitman et al., 1984; Newport et al., 1977; Wijnen et al., 2001).

Chez les adultes, des processus linguistiques comme l'OCP, l'affixation en morphologie inflexionnelle ou encore l'alignement des constituants pourraient faire appel précisément aux primitives étudiées dans cette thèse. De plus, au moins la primitive détectant les répétitions pourrait avoir des précurseurs de certaines propriétés cruciales du langage et de la pensée comme la productivité, la compositionalité et éventuellement même la systématicité. Ces données suggèrent que la faculté du langage pourrait utiliser les primitives perceptives pour certaines computations ; il est un important projet de recherche de vérifier si de telles primitives existent également sur des niveaux de représentation plus abstraits.

Finalement, une acquisition de la grammaire est impossible sans un ensemble de contraintes représentationnelles suffisamment riche. Alors que des contraintes purement perceptives ne sont probablement pas particulièrement utiles pour l'acquisition des régularités comme les conditions de la co-référence pronominale, il semble raisonnable de commencer par étudier les contraintes représentationnelles résultant des propriétés du système sensoriel — car de telles contraintes sont facilement accessibles et pourraient mener à des hypothèses sur les autres contraintes (plus abstraites) que l'on doit postuler. Une telle stratégie pourrait conduire à une explication des phénomènes linguistiques en termes de processus psychologiques.

14.6 Un argument méthodologique

Comment peut-on étudier la psychologie de la manipulation des symboles mentaux, en particulier si elle repose sur un seul mécanisme monolithique ? Est-il possible d'étudier empiriquement un mécanisme aussi vaste ? Il semble en effet difficile d'étudier des phénomènes aussi différents que l'inflexion régulière, la planification des tâches et le conditionnement en les attribuant tous à un même mécanisme monolithique de manipulation de symboles. Considérer la manipulation des symboles comme le résultat d'une trousse à outils computationnelle d'opérations spécialisées et limitées au lieu de la considérer comme le résultat d'un mécanisme symbolique général et monolithique semble donc être un premier pas envers une théorie mécaniste de la manipulation des symboles que l'on peut étudier empiriquement ; ceci pourrait permettre de délimiter l'objet des études et ainsi rendre la manipulation des symboles psychologiquement tractables — ce qui serait probablement impossible si on était forcé à penser qu'elle repose sur un mécanisme général et monolithique.

Fodor (1983) a fait une observation similaire. Il a fait remarquer que les sciences cognitives ont réussi relativement bien dans leur étude de certains systèmes encapsulés comme des aspects de la vision mais qu'ils ont réussi moins bien dans l'étude des fonctions cognitives 'supérieures' qui semblent être moins encapsulées ; il a ainsi proposé la première loi de Fodor sur la non-existence des sciences cognitives : « The more global (...) a cognitive process is, the less anybody understands it » (p. 107). L'idée de Fodor (1983) était que l'encapsulation *mentale* permet une encapsulation *méthodologique* permettant de couper des problèmes difficiles en des problèmes plus petits moins difficiles que l'on peut étudier. De la même manière, considérer la manipulation des symboles comme le résultat d'une boîte à outils composée de primitives perceptives pourrait permettre de couper la manipulation des symboles en des morceaux que l'on peut étudier de manière empirique.

En conclusion, les primitives perceptives sont des opérations symboliques spécialisées et limitées ; les exemples étudiés découlent probablement des propriétés du système perceptif, mais les données présentées dans ce chapitre suggèrent que de telles primitives pourraient exister également sur des niveaux de représentation plus abstraits et dans les facultés horizontales. La question de savoir si ces primitives existent effectivement dans les facultés horizontales est évidemment ouverte ; cette possibilité n'a cependant pas seulement le potentiel de fournir une théorie psychologique de la manipulation des symboles mais également de réconcilier les approches symboliques et statistiques de l'esprit. Il est donc un important projet de recherche de répondre à cette question.

14.7 Evolution des primitives perceptives

> La Société n'admet aucune communication concernant, soit l'origine du langage soit la création d'une langue universelle.
>
> *Art. 2 des statuts de la société de linguistique de Paris (1866)*

Les primitives perceptives, sont-elles spécifiques à l'homme ? C'est finalement une question à laquelle on peut répondre définitivement, et la réponse est négative. Une variété d'animaux non-humains partage par exemple des opérations comme une sensibilité aux relations d'identité (voir par exemple Hauser, Weiss & Marcus, 2002; Herman, Pack & Morrel-Samuels, 1993; Kastak & Schusterman, 1994; Pepperberg, 1987; Tomasello & Call, 1997; Wallis et al., 2001). Il est donc peu probable que de telles primitives soient parmi les capacités computationnelles exclusivement humaines qui ont rendu possible le langage ou l'inférence scientifique. La faculté du langage pourraient cependant avoir recyclé des capacités préexistantes qui pourraient être partagées par d'autres animaux non-humains, par exemple une forme apprentissage de catégories de consonnes par les cailles (Kluender et al., 1987), une forme de compensation pour la coarticulation (Lotto et al., 1997), une sensitivité aux propriétés rythmiques des

langues par les tamarins (Ramus et al., 2000) ou la capacité de calculer des TPs dans les séquences de parole (Hauser et al., 2001; Newport et al., 2004). Avec une certaine hardiesse, on pourrait remarquer que la logique fondamentale de ces observation — que le langage a utilisé au moins en partie des capacités computationnelles préexistantes dont une partie découle des contraintes du système perceptif — semble assez raisonnable. Cette hypothèse pourrait même permettre d'étudier empiriquement l'évolution de certaines opérations parce que ces opérations pourraient être dupliquées d'autres domaines ; on pourrait par exemple étudier les circuits neuronaux qui sont responsables pour les calculs des répétitions auditives, leur développement ainsi que l'évolution des cascades d'expression correspondantes. Alors qu'un tel projet nécessite certainement un optimisme plus que considérable, il serait simplement impossible d'étudier l'évolution des opérations mentales en partant d'un mécanisme monolithique responsable pour la manipulation des symboles. Si l'on est suffisamment courageux de vouloir étudier l'évolution des computations mentales, adhérer à une conceptualisation des opérations mentales en termes d'une boîte à outils computationnelle semble donc inévitable.

Plus généralement, les solutions de l'évolution sont en général spécialisées (voir par exemple Gallistel, 1990, 2000). Il semble donc que concevoir la manipulation des symboles en termes d'opérations spécialisées et limitées comme les primitives perceptives est préférable à une théorie beaucoup plus générale.

14.8 Conclusion

Les résultats présentés dans cette thèse suggèrent que l'esprit humain est équipé d'un ensemble d'opérations spécialisées et limitées que j'ai appelées les *primitives perceptives*. Les exemples étudiés sont une opération traitant les répétitions et une autre représentant les positions de bord (PDBs) comme variables positionnelles. Ces opérations sont sévèrement limitées

par de facteurs perceptifs, ce qui suggère qu'elles pourraient appartenir à des modules.

Il est possible que de telles opérations spécialisées se trouvent également sur des niveaux de représentation plus abstraits et dans les facultés centrales ; les primitives perceptives pourraient donc être des *mécanismes computationnels* partagés entre les modules et les facultés centrales, constituant ainsi une boîte à outils computationnelle de l'esprit. En effet, différentes considérations suggèrent qu'un ensemble de primitives perceptives et non pas un mécanisme générique et monolithique devrait être la conceptualisation par défaut de la manipulation des symboles. D'abord, certaines primitives existent sur plusieurs niveaux de représentation et pourraient remplir les critères de Fodor et Pylyshyn (1988), à savoir la productivité, la compositionalité et la systématicité. Deuxièmement, il est possible d'étudier des primitives particulières mais il est beaucoup plus difficile d'étudier un mécanisme général et monolithique ; une théorie faisant appel à ce type de primitives semble donc nécessaire pour étudier empiriquement la psychologie de la manipulation des symboles. Troisièmement, il semble plus plausible qu'un grand nombre d'opérations spécialisées ait pu évoluer qu'un mécanisme général et monolithique. Ces raisons empiriques, méthodologiques et évolutionnistes suggèrent que les primitives perceptives pourraient être les liens entre des théories psychologiques et des descriptions de haut niveau comme les théories linguistiques.

La notion des primitives perceptives pourrait également réconcilier les modèles symboliques et associationnistes de l'esprit : au lieu d'opposer les deux types d'opérations, ils pourraient être complémentaires ; les mécanismes symboliques pourraient contribuer des contraintes représentationnelles élémentaires (comme les primitives perceptives) tandis que les mécanismes statistiques pourraient fournir les mécanismes d'apprentissage nécessaires pour utiliser ces représentations.

Même s'il s'avérait que les primitives perceptives n'existent pas dans

les facultés centrales, la notion d'un ensemble d'opérations symboliques élémentaires est essentielle pour l'étude des mécanismes psychologiques des calculs mentaux symboliques : alors qu'il est probablement impossible d'étudier ces mécanismes si l'on est forcé à considérer toute opération symbolique comme une manifestation d'un unique mécanisme général et monolithique, la notion des primitives perceptives permet de commencer à étudier empiriquement (et, si l'on est optimiste, même de manière neurophysiologique) les mécanismes psychologiques sous-jacents ; étudier ces primitives promet donc d'élucider des propriétés fondamentales (et peut-être spécifiques à l'homme) de l'architecture cognitive.

Quatrième partie

Annexe

Annexe A

Details for the simulations in chapter 6

A.1 Architecture and Training

Models learning to predict the next element in a series would fail in our experiments. Since grammars (e.g., ABA and ABB during Experiment 1) were presented equally often throughout the experiment, there is no way to predict the third tone of a triplet from the first two tones : it can be the same as the first one if the grammar is ABA or the same as the second one if the grammar is ABB, and one can only know the grammar *after* having encountered the third tone (a similar argument applies to the ordinal grammars). We thus tested a three-layer feed-forward network with SNNS[1]. The input layer had 30 neurons coding for the 10 pitch levels of the three tones of a triplet. Tones were represented by binary pairwise orthonormal vectors. The hidden layer consisted in 30 neurons feeding into a single output neuron whose activation coded for the grammar of a triplet. The two grammars were represented by output activations of 0 and 1, respectively. Activations above and below 0.5 were coded as 'votes' for the grammars associated with 1 and 0, respectively. We randomly chose a subset of all possible triplets as training set and another subset as valida-

[1]Version 4.2 is available from http ://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/SNNS/

tion set. We ran 14 simulations for each experiment with standard back-propagation learning (rate : 0.9 ; threshold : 0.2 ; training cycles : 500 ; these values were found to optimize the network performance).

A.2 Simulation 1

The network had to learn the grammars ABA and ABB. From a total of 180 possible triplets, we used 130 for training and 50 for test. The proportion of correct classifications exceeded chance (mean±standard deviation : 85.4±4.1%, $t(13) = 32.3$, $p < 8.6 \cdot 10^{-14}$), but only when the network was allowed to exploit overlap between the training set and the test set[2].

A.3 Simulation 2

The network had to learn the ordinal grammars Low-High-Middle and Middle-High-Low. From a total of 240 possible triplets, we used 175 for training and 65 for test. The network classified 100±0% of the test items correctly, but only when it was allowed to exploit overlap between the training set and the test set[3]. It performed better for the grammars LHM and MHL than for the grammars ABA and ABB ($F(1,13) = 176.1$, $p < 0.001$).

A.4 Simulation with tones arranged on a ring

In order to investigate whether the existence of a lowest possible tone was the reason why the networks performed better for ordinal than for repetition-based grammars, we arranged the tones on a ring, considering

[2]When such overlap was not provided, the network performed at chance (51.8±5.6%, $t(13) = 1.2$, $p = 0.254$, ns).

[3]Again, the network learned the grammars only when it could exploit overlap between the training set and the test set. Otherwise, it performed at chance (49.1±10.4%, $t(13) = 0.3$, $p = 0.752$, ns).

the highest tone of a scale as lower than the lowest tones ; this manipulation abolishes the boundaries of the pitch scale. In order to keep the topological relations "higher than" and "lower than", we used a range of 20 possible tones (opposed to 10 possible tones in the previous simulations) and a maximal interval between tones in a triplet of 10 tones. We simulated the learning of the repetition-based and ordinal grammars in distinct simulations. We generated all possible triplets, and used 80% of the triplets as training set and the rest as test set. We used a two-layer perceptron and a three-layer perceptron and different learning rates and numbers of cycles. The networks performed generally at chance level, and there was generally no difference between the performance for the repetition-based and the ordinal grammars. In some simulations with the two-layer perceptron, the networks actually performed slightly *below* chance, especially in simulations with huge numbers of training cycles, suggesting that the network overlearned the training examples. It appears thus that purely statistical mechanisms learn the ordinal grammars better than the repetition-based grammars when they can learn either grammar at all.

Annexe B

Details about the simulations with an SRN

All simulations were performed with the Stuttgart Neural Network Simulator (Version 4.2, http ://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/SNNS/) compiled on an Apple Dual G5 computer running Mac OS X. The simulations were automatically launched and analyzed by a set of SH, GAWK, PERL and R scripts.

B.1 Architecture

We used a Simple Recurrent Network (SRN ; Elman, 1990) with 5 or 27 hidden units and nine input and output units. The simulations representing the silence as an extra-symbol used 10 input and output units.

B.2 Material

Syllables were represented by pair-wise orthonormal binary vectors. The networks were presented with 'syllable sequences' in this format whose statistical properties were the same as in the experiments reported above ; all streams contained 100 repetitions of each word, yielding 900 words in total. Four different syllable streams were used that differed in the pre-

sence or absence of 'silences' between words and in the way silences were represented. One stream was continuous, like in Experiment 18. In two other streams, silences were represented as 0-vectors. In one of these streams, the network had to predict the 0-vector itself, in the other it had to predict the A-syllable *following* the 0-vector. In the fourth stream, silences were represented by an extra neuron ; the latter stream was used with two different test regimens (see below).

B.3 Training

The network was trained with the backpropagation algorithm to predict the next element in the sequence. In order to sample the parameter space of the network, all syllable streams were presented in 120 different sets of simulations with the learning rates : 1×10^{-5}, 5×10^{-5} , 9×10^{-5} , 1×10^{-4}, 5×10^{-4} , 9×10^{-4} , 1×10^{-3}, 5×10^{-3} , 9×10^{-3} , 1×10^{-2}, 5×10^{-2} , 9×10^{-2} , 1×10^{-1}, 5×10^{-1} , 9×10^{-1} , and the numbers of training cycles : 10, 50, 90, 100 , 500, 900, 1000, 5000. Each parameter set was evaluated with 20 simulations, representing 20 participants. Since we used two networks and four different training streams, one of which was evaluated in two training regimen, this yielded 24,000 simulations.

B.4 Test

We assessed how well the networks predict the third syllable for different test items. In the simulations without a special neuron for the silences as well as in half of the simulations with such a neuron, test items always started with their first syllable ; in the remaining simulations with such a neuron, test items started with the silence preceding the first syllable. Of primary interest the relative performance for rule-words, class-words and part-words. Part-words could be of two types : either they consisted of the last syllable of the first word and the first two syllables of the second word ('type 12'), or they consisted of the last *two* syllables

of the first word and the first syllable of the second word ('type 21'). This distinction is important since the two part-word types have different numbers of target syllables, and hence different baselines (see below)[1].

B.5 Evaluation

The network performance was evaluated by computing the cosine of the angle between the target output and a corrected actual output[2]. In order to assess the model performance, the cosine was averaged for all test items of a given type, each average representing a 'participant'; 20 averages were obtained with different weight initializations. The performance of the group of participants was then compared to the appropriate baseline (see below). Since baselines differed among different types of test items (see below), we normalized the performances for different test items before comparing them in a one-way ANOVA[3,4].

We associate the success of the network in predicting the target syllables for the different test item types as a measure of familiarity with these

[1]Part-words of type 12 have three different target syllables since their last syllable is a X-syllable, and can thus take three possible values. In contrast, part-words of type 21 have two different target syllables since its last syllable is an A-syllable, and only A-syllables that do not belong to the family of the previous word are allowed.

[2]The actual output was corrected as follows. First, the appropriate number of targets W was established. For example, W was 1 for rule-words since the first two syllables of a rule-word predicted the last syllable with probability 1; likewise, W was 3 for class-words since the first two syllables admit three different last syllable (i.e., all possible C-syllables). Then, the activation of the W neurons with the biggest activations in the actual output was set to 1, and all other activations set to zero.

[3]In order to compare the cosine for different types of test items, we first subtracted the appropriate baseline and then normalized the difference by the standard deviation for each type of test item, yielding a kind of 'Z-score'. The 'Z-scores' were compared in one-way ANOVAs with test item type as between-subject variable.

[4]F-values of comparisons in which the variance for one of the test item types was 0 were set to infinity. The network was considered to perform better for the test item type for which the difference between the mean performance and the corresponding baseline was greater.

items ; we did not transform the cosine score in familiarity scores since we are not aware of any independently motivated transformation. Of primary interest are comparisons between the performances for class-words and part-words of both types and between rule-words and class-words.

B.6 Baselines

In order to evaluate the models' performance, it was necessary to calculate the network performance under the assumption that outputs are picked from a uniform distribution. We will consider this hypothetical performance as the baseline. For the network with nine input and output units, by counting the different possible cases, one obtains a baseline for the cosine of 1/9 for one target output, 2/9 for two target outputs and 1/3 for three target outputs[5]. For 10 input and output units, the baseline for the cosine is 1/10 for one target output, 1/5 for two target outputs and 3/10 for three target outputs.

[5]We illustrate these calculations with the baseline for two targets (like the prediction of the last syllable of a part-word of type 21). There are 36 9-dimensional binary vectors with exactly two 1's and seven 0's, each of which has the same probability. One can assume without loss of generality that the target output is 1 1 0 0 0 0 0 0 0. Then exactly one of the 36 vectors has *both* of its two 1's at the correct position, yielding a cosine of 1 with probability 1/36. Now consider the possible vectors which have exactly *one* 1 in a correct position, and one in an incorrect position (e.g., 1 0 1 0 0 0 0 0 0), yielding a cosine of 0.5. One group of these vectors has 1 as their first coordinate and 0 as their second coordinate. Since there is another coordinate with value 1 to distribute among the seven remaining coordinates, there are exactly seven vectors with 1 as first coordinate, 0 as second coordinate and another 1 somewhere else. Likewise, there are exactly seven vectors with 0 as first coordinate, 1 as second coordinate and another 1 somewhere else. These vectors yield a cosine of 0.5 with probability $2 \times 7/36$. The remaining vectors with exactly two 1's yield a cosine of 0. The baseline for the cosine with two target syllables is therefore $1 \times 1/36 + 2 \times 0.5 \times 7/36 \ = 2/9$.

Bibliographie

Ahn, W. & Medin, D. (1992). A two-stage model of category construction. *Cognit Sci*, *16*(1), 81–122.

Albright, A. (2002). Islands of reliability for regular morphology : Evidence from italian. *Language*, *78*, 684–709.

Albright, A. & Hayes, B. (2003). Rules vs. analogy in English past tenses : a computational/experimental study. *Cognition*, *90*(2), 119-61.

Allen, M. & Badecker, W. (1999). Stem homograph inhibition and stem allomorphy : Representing and processing inflected forms in a multilevel lexical system. *J Mem Lang*, *41*, 105–23.

Allen, M. & Badecker, W. (2002). Inflectional regularity : Probing the nature of lexical representations in a cross-modal priming task. *J Mem Lang*, *46*, 705–22.

Altmann, G. T. (2002). Learning and development in neural networks–the importance of prior experience. *Cognition*, *85*(2), B43-50.

Altmann, G. T. & Dienes, Z. (1999). Rule learning by seven-month-old infants and neural networks. *Science*, *284*, 875a.

Amit, D. J. (1989). *Modeling brain function : The world of attractor neural networks*. Cambridge : Cambridge University Press.

Andersen, R. (1997). Multimodal integration for the representation of space in the posterior parietal cortex. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, *352*(1360), 1421-8.

Andersen, R., Snyder, L., Bradley, D. & Xing, J. (1997). Multimodal representation of space in the posterior parietal cortex and its use in planning movements. *Annu Rev Neurosci*, *20*, 303-30.

Anderson, J. R. (1993). *Rules of the mind*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum

Associates.

Angluin, D. (1980). Inductive inference of formal languages from positive data. *Inform Contr*, *45*(2), 117–35. (as cited in Stabler, 2003)

Aslin, R. N., Saffran, J. & Newport, E. L. (1998). Computation of conditional probability statistics by 8-month-old infants. *Psychol Sci*, *9*, 321–4.

Baayen, R., Dijkstra, A. & Schreuder, R. (1997). Singulars and plurals in dutch : Evidence for a parallel dual route model. *J Mem Lang*, *37*, 94–117.

Baddeley, A. (1999). Memory. In R. A. Wilson & F. C. Keil (Eds.), *The mit encyclopedia of the cognitive sciences* (pp. 514–517). Cambridge, MA : MIT Press.

Banks, M., Aslin, R. & Letson, R. (1975). Sensitive period for the development of human binocular vision. *Science*, *190*(4215), 675-7.

Bavelier, D. (1994). Repetition blindness between visually different items : the case of pictures and words. *Cognition*, *51*(3), 199-236.

Bavelier, D. & Potter, M. (1992). Visual and phonological codes in repetition blindness. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *18*(1), 134-47.

Bentin, S., Allison, T., Puce, A., Perez, E. & McCarthy, G. (1996). Electrophysiological studies of face perception in humans. *J Cogn Neurosci*, *8*, 551–65.

Berent, I. (2002). Identity avoidance in the Hebrew lexicon : implications for symbolic accounts of word formation. *Brain Lang*, *81*(1-3), 326-41.

Berent, I., Everett, D. & Shimron, J. (2001). Do phonological representations specify variables ? Evidence from the obligatory contour principle. *Cognit Psychol*, *42*(1), 1-60.

Berent, I., Marcus, G. F., Shimron, J. & Gafos, A. I. (2002). The scope of linguistic generalizations : evidence from Hebrew word formation. *Cognition*, *83*(2), 113-39.

Berent, I. & Shimron, J. (1997). The representation of Hebrew words : evidence from the obligatory contour principle. *Cognition*, *64*(1), 39-72.

Berent, I., Vaknin, V. & Shimron, J. (2004). Does a theory of language need a grammar ? Evidence from Hebrew root structure. *Brain Lang*,

90(1-3), 170-82.

Bialystok, E. (1997). The structure of age : in search of barriers to second language acquisition. *Second Lang Res*, *13*(2), 116–137.

Biederman, I. (1987). Recognition-by-components : a theory of human image understanding. *Psychol Rev*, *94*(2), 115-47.

Block, N. (1995). The mind as the software of the brain. In E. E. Smith & D. N. Osherson (Eds.), *An invitation to cognitive science* (2nd ed., Vol. 3, pp. 377–425). Cambridge, MA : MIT Press.

Bloom, L., Tinker, E. & Margulis, C. (1993). The words children learn : Evidence against a noun bias in early vocabularies. *Cogn Devel*, *8*(4), 431–450.

Bod, R. & Scha, R. (1997). *Data-oriented language processing. an overview.* (Tech. Rep. No. LP-96-13). Amsterdam : Institute for Logic, Language and Computation, University of Amsterdam.

Bolster, R. (1978). Cross-modal matching in the monkey (Macaca fascicularis). *Neuropsychologia*, *16*(4), 407-16.

Bonatti, L. L., Peña, M., Nespor, M. & Mehler, J. (2005). Linguistic constraints on statistical computations : The role of consonants and vowels in continuous speech processing. *Psychol Sci*, *16*(8).

Bosking, W., Zhang, Y., Schofield, B. & Fitzpatrick, D. (1997). Orientation selectivity and the arrangement of horizontal connections in tree shrew striate cortex. *J Neurosci*, *17*(6), 2112-27.

Brainard, M. S. & Doupe, A. J. (2000). Interruption of a basal ganglia-forebrain circuit prevents plasticity of learned vocalizations. *Nature*, *404*(6779), 762-6.

Brainard, M. S. & Doupe, A. J. (2002). What songbirds teach us about learning. *Nature*, *417*(6886), 351-8.

Brainard, M. S. & Knudsen, E. (1998). Sensitive periods for visual calibration of the auditory space map in the barn owl optic tectum. *J Neurosci*, *18*(10), 3929-42.

Braine, M. (1963). On learning the grammatical order of words. *Psychol Rev*, *70*, 323-48.

Braine, M. (1966). Learning the positions of words relative to a marker

element. *J Exp Psychol*, *72*(4), 532-40.

Brenowitz, E., Margoliash, D. & Nordeen, K. (1997). An introduction to birdsong and the avian song system. *J Neurobiol*, *33*(5), 495-500.

Brent, M. & Cartwright, T. (1996). Distributional regularity and phonotactic constraints are useful for segmentation. *Cognition*, *61*(1-2), 93-125.

Brown, E. R. (1958). *Words and things*. The Free Press.

Brown, R. (1973). *A first language : The early stages*. Cambridge, MA : Harvard University Press.

Brown, R. & Hanlon, C. (1970). Derivational complexity and order of acquisition in child speech. In J. R. Hayes (Ed.), *Cognition and the development of language* (pp. 11–54). New York : Wiley.

Brown, R. & McNeill, D. (1966). The "tip of the tongue" phenomenon. *J Verb Learn Verb Behav*, *5*, 325–337.

Bybee, J. (1995). Regular morphology and the lexicon. *Lang Cognit Proc*, *10*(5), 425–455.

Celesia, G., Broughton, R., Rasmussen, T. & Branch, C. (1968). Auditory evoked responses from the exposed human cortex. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, *24*(5), 458-66.

Chambers, K. E., Onishi, K. H. & Fisher, C. (2003). Infants learn phonotactic regularities from brief auditory experience. *Cognition*, *87*(2), B69-77.

Chen, S., Swartz, K. & Terrace, H. (1997). Knowledge of the ordinal position of list items in rhesus monkeys. *Psychol Sci*, *8*, 80–6.

Chomsky, N. (1957). *Syntactic structures*. The Hague : Mouton.

Chomsky, N. (1959). A review of B. F. Skinner's Verbal Behavior. *Language*, *35*(1), 26–58.

Chomsky, N. (1965). *Aspects of the theory of syntax*. Cambridge, Massachusetts : MIT Press.

Chomsky, N. (1975). *Reflections on language*. New York : Pantheon.

Chomsky, N. (1980). *Rules and representations*. Oxford : Basil Blackwell.

Chouinard, M. M. & Clark, E. V. (2003). Adult reformulations of child errors as negative evidence. *J Child Lang*, *30*, 637–669.

Christiansen, M., Conway, C. & Curtin, S. (2000). A connectionist single-

mechanism account of rule-like behavior in infancy. In *The proceedings of the 22nd annual conference of the cognitive science society* (pp. 83–8). Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum.

Christiansen, M. & Curtin, S. (1999). Transfer of learning : rule acquisition or statistical learning ? *Trends Cogn Sci*, *3*(8), 289-290.

Clahsen, H. (1999). Lexical entries and rules of language : a multidisciplinary study of German inflection. *Behav Brain Sci*, *22*(6), 991-1013 ; discussion 1014-60.

Clahsen, H., Aveledo, F. & Roca, I. (1992). Regular and irregular inflection in the acquisition of German noun plurals. *Cognition*, *45*(3), 225-55.

Cleeremans, A. & McClelland, J. L. (1991). Learning the structure of event sequences. *J Exp Psychol Gen*, *120*(3), 235-53.

Collett, T. & Collett, M. (2000). Path integration in insects. *Curr Opin Neurobiol*, *10*(6), 757-62.

Conrad, R. (1960). Serial order intrusions in immediate memory. *Br J Psychol*, *51*, 45-8.

Cowey, A. & Weiskrantz, L. (1975). Demonstration of cross-modal matching in rhesus monkeys, Macaca mulatta. *Neuropsychologia*, *13*(1), 117-20.

Crain, S. & Nakayama, M. (1987). Structure dependence in grammar formation. *Language*, *63*, 522–543.

Crain, S. & Pietroski, P. (2001). Nature, nurture and universal grammar. *Ling Phil*, *24*, 139–185.

Curtiss, S. (1977). *Genie : A psycholinguistic study of a modern day "wild child"*. New York : Academic Press. (as cited in Stromswold, 1999)

Curtiss, S. (1989). The independence and task-specificity of language. In A. Bornstein & J. Bruner (Eds.), *Interaction in human development* (pp. 105–137). Hillsdale, NJ : Erlbaum. (as cited in Stromswold, 1999)

Dabrowska, E. (2001). Learning a morphological system without a default : the Polish genitive. *J Child Lang*, *28*(3), 545-74.

Dabrowska, E. (2004). Rules or schemas ? evidence from polish. *Lang Cognit Proc*, *19*(2), 225–71.

D'Amato, M. & Colombo, M. (1989). Serial learning with wild card items

by monkeys (Cebus apella) : implications for knowledge of ordinal position. *J Comp Psychol*, *103*(3), 252-61.

de La Condamine, C.-M. (1755). *Histoire d'une jeune fille sauvage trouvée dans les bois à l'âge de dix ans.*

Dell, F. (1995). Consonant clusters and phonological syllables in french. *Lingua*, *95*(1-2), 5–26.

Demetras, M. J., Post, K. N. & Snow, C. E. (1986). Feedback to first language learners : The role of repetitions and clarification questions. *J Child Lang*, *13*(2), 275–292.

Descartes, R. (1637/1999). *Discours de la methode pour bien conduire sa raison, et chercher la verite dans les science*. Association de Bibliophiles Universels. (http ://abu.cnam.fr/cgi-bin/donner ?methode3)

Dickinson, M., Farley, C., Full, R., Koehl, M., Kram, R. & Lehman, S. (2000). How animals move : an integrative view. *Science*, *288*(5463), 100-6.

Dominey, P., Lelekov, T., Ventre-Dominey, J. & Jeannerod, M. (1998). Dissociable processes for learning the surface structure and abstract structure of sensorimotor sequences. *J Cogn Neurosci*, *10*(6), 734-51.

Dominey, P. & Ramus, F. (2000). Neural network processing of natural language : I. sensitivity to serial, temporal and abstract structure of language in the infant. *Lang Cogn Proc*, *15*(1), 87–127.

Doupe, A. J. & Kuhl, P. (1999). Birdsong and human speech : common themes and mechanisms. *Annu Rev Neurosci*, *22*, 567-631.

Dowling, W. & Fujitani, D. (1971). Contour, interval, and pitch recognition in memory for melodies. *J Acoust Soc Am*, *49*(2), 524–31.

Dupoux, E., Kakehi, K., Hirose, Y., Pallier, C. & Mehler, J. (1999). Epenthetic vowels in japanese : A perceptual illusion ? *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *25*(6), 1568-1578.

Dupoux, E., Pallier, C., Kakehi, K. & Mehler, J. (2001). New evidence for prelexical phonological processing in word recognition. *Lang Cogn Proc*, *16*(5–6), 491–505.

Dusek, J. & Eichenbaum, H. (1997). The hippocampus and memory for orderly stimulus relations. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *94*(13), 7109-14.

Dutoit, T., Pagel, V., Pierret, N., Bataille, F. & Vreken, O. van der. (1996).

The mbrola project : Towards a set of high-quality speech synthesizers free of use for non-commercial purposes. In *Proc icslp'96* (Vol. 3, pp. 1393–1396). Philadelphia.

Dyer, F. & Dickinson, J. (1994). Development of sun compensation by honeybees : how partially experienced bees estimate the sun's course. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *91*(10), 4471-4.

Ebbinghaus, H. (1885/1913). *Memory : A contribution to experimental psychology*. New York : Teachers College, Columbia University. (http ://psychclassics.yorku.ca/Ebbinghaus/)

Ebenholtz, S. (1963). Serial learning : Position learning and sequential associations. *J Exp Psychol*, *66*, 353-62.

Egorov, A. V., Hamam, B. N., Fransén, E., Hasselmo, M. E. & Alonso, A. A. (2002). Graded persistent activity in entorhinal cortex neurons. *Nature*, *420*(6912), 173-8.

Eichenbaum, H. (1996). Learning from LTP : a comment on recent attempts to identify cellular and molecular mechanisms of memory. *Learn Mem*, *3*(2-3), 61-73.

Elman, J. L. (1990). Finding structure in time. *Cognit Sci*, *14*(2), 179–211.

Elman, J. L. (1993). Learning and development in neural networks : the importance of starting small. *Cognition*, *48*(1), 71-99.

Elman, J. L., Bates, E., Johnson, M., Karmiloff-Smith, A., Parisi, D. & Plunkett, K. (1996). *Rethinking innateness : a connectionist perspective on development*. Cambridge, MA : MIT Press.

Fagiolini, M., Pizzorusso, T., Berardi, N., Domenici, L. & Maffei, L. (1994). Functional postnatal development of the rat primary visual cortex and the role of visual experience : dark rearing and monocular deprivation. *Vision Res*, *34*(6), 709-20.

Feldman, H., Goldin-Meadow, S. & Gleitman, L. R. (1978). Beyond herodotus : The creation of language by linguistically deprived deaf children. In A. Lock (Ed.), *Action, symbol, and gesture : The emergence of language* (pp. 351–414). New York : Academic Press.

Feldman, J. A. & Ballard, D. H. (1982). Connectionist models and their properties. *Cognit Sci*, *6*, 205–254.

Fiser, J. & Aslin, R. N. (2001). Unsupervised statistical learning of higher-order spatial structures from visual scenes. *Psychol Sci*, *12*(6), 499-504.

Fiser, J. & Aslin, R. N. (2002a). Statistical learning of higher-order temporal structure from visual shape sequences. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, *28*(3), 458-67.

Fiser, J. & Aslin, R. N. (2002b). Statistical learning of new visual feature combinations by infants. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *99*(24), 15822-6.

Fishbach, A., Nelken, I. & Yeshurun, Y. (2001). Auditory edge detection : a neural model for physiological and psychoacoustical responses to amplitude transients. *J Neurophysiol*, *85*(6), 2303-23.

Fishbach, A., Yeshurun, Y. & Nelken, I. (2003). Neural model for physiological responses to frequency and amplitude transitions uncovers topographical order in the auditory cortex. *J Neurophysiol*, *90*(6), 3663-78.

Flege, J. E., MacKay, I. & Meador, D. (1999). Native Italian speakers' perception and production of English vowels. *J Acoust Soc Am*, *106*(5), 2973-87.

Flege, J. E., Yeni-Komshian, G. H. & Liu, S. (1999). Age constraints on second-language acquisition. *J Mem Lang*, *41*(1), 78–104.

Fod, A., Matarić, M. J. & Jenkins, O. C. (2002). Automated derivation of primitives for movement classification. *Auton Robots*, *12*(1), 39–54.

Fodor, J. A. (1975). *The language of thought*. Cambridge, MA : Harvard University Press.

Fodor, J. A. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge, MA : MIT Press.

Fodor, J. A. & Pylyshyn, Z. W. (1988). Connectionism and cognitive architecture : a critical analysis. *Cognition*, *28*(1-2), 3-71.

Fortin, N. J., Agster, K. L. & Eichenbaum, H. B. (2002). Critical role of the hippocampus in memory for sequences of events. *Nat Neurosci*, *5*(5), 458-62.

Frampton, G., Milner, A. & Ettlinger, G. (1973). Cross-modal transfer between vision and touch of go, no-go discrimination learning in the monkey. *Neuropsychologia*, *11*(2), 231-3.

Freedman, D. J., Riesenhuber, M., Poggio, T. & Miller, E. K. (2001). Catego-

rical representation of visual stimuli in the primate prefrontal cortex. *Science*, *291*(5502), 312-6.

Freedman, D. J., Riesenhuber, M., Poggio, T. & Miller, E. K. (2002). Visual categorization and the primate prefrontal cortex : neurophysiology and behavior. *J Neurophysiol*, *88*(2), 929-41.

French, R. M. (1999). Catastrophic forgetting in connectionist networks. *Trends Cogn Sci*, *3*(4), 128-135.

Friederici, A. (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends Cogn Sci*, *6*, 78–84.

Frisch, S. A., Pierrehumbert, J. B. & Broe, M. B. (2004). Similarity avoidance and the ocp. *Nat Lang Ling Theory*, *22*(1), 179–228.

Frisch, S. A. & Zawaydeh, B. A. (2001). The psychological reality of ocp-place in arabic. *Language*, *77*, 91–106.

Furrow, D., Nelson, K. & Benedict, H. (1979). Mothers' speech to children and syntactic development : some simple relationships. *J Child Lang*, *6*, 423–442.

Fuster, J., Bodner, M. & Kroger, J. (2000). Cross-modal and cross-temporal association in neurons of frontal cortex. *Nature*, *405*(6784), 347-51.

Gallistel, C. (1990). *The organization of learning*. Cambridge, MA : MIT Press.

Gallistel, C. (2000). The replacement of general-purpose learning models with adaptively specialized learning modules. In M. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive neurosciences* (2nd ed., pp. 1179–91). Cambridge, MA : MIT Press.

Gallistel, C. (2001). Mental representations, psychology of. In N. J. Smelser & P. B. Baltes (Eds.), *International encyclopedia of the social &behavioral sciences* (pp. 9691–9695). Elsevier.

Gallistel, C. & Gibbon, J. (2000). Time, rate, and conditioning. *Psychol Rev*, *107*(2), 289-344.

Gallistel, C. & Gibbon, J. (2002). *The symbolic foundations of conditioned behavior*. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.

Gasser, M. & Colunga, E. (2000). Babies, variables, and relational correlations. In *Annual conference of the cognitive science society,* (Vol. 22, pp.

160–5).

Gentner, D. (1982). Why nouns are learned before verbs : linguistic relativity versus natural partitioning. In *Language development. vol. 2 : Language, thought and culture.* Hillsdale, NJ : Erlbaum.

Gigerenzer, G., Todd, P. & The ABC Group. (1999). *Simple heuristics that make us smart*. New York : Oxford University Press.

Gilbert, C. & Wiesel, T. (1989). Columnar specificity of intrinsic horizontal and corticocortical connections in cat visual cortex. *J Neurosci*, *9*(7), 2432-42.

Gleitman, L. R., Newport, E. L. & Gleitman, H. (1984). The current status of the motherese hypothesis. *J Child Lang*, *11*, 43–79.

Gómez, R. & Gerken, L. (2000). Infant artificial language learning and language acquisition. *Trends Cogn Sci*, *4*(5), 178-186.

Gold, E. M. (1967). Language identification in the limit. *Inform. Control*, *10*, 447–474.

Goldin-Meadow, S. (1982). The resilience of recursion : A study of a communication system developed without a conventional language model. In E. Wanner & L. R. Gleitman (Eds.), *Language acquisition : The state of the art* (pp. 51–77). Cambridge : Cambridge University Press.

Goldin-Meadow, S. & Mylander, C. (1998). Spontaneous sign systems created by deaf children in two cultures. *Nature*, *391*(6664), 279-81.

Goodman, N. (1955). *Fact, fiction and forecast*. Cambridge : Harvard University Press.

Gould, J. L. & Marler, P. (1987). Learning by instinct. *Sci Am*, *256*(1), 74–85.

Greene, A., Spellman, B., Dusek, J., Eichenbaum, H. & Levy, W. (2001). Relational learning with and without awareness : transitive inference using nonverbal stimuli in humans. *Mem Cognit*, *29*(6), 893-902.

Guyon, L. (1613). *Les diverses leçons de louys guyon, dolois, sr de le nauche*. Lyon : Antoine Chard.

Hahn, U. & Nakisa, R. (2000). German inflection : single route or dual route ? *Cognit Psychol*, *41*(4), 313-60.

Hahne, A. & Friederici, A. (1999). Electrophysiological evidence for two steps in syntactic analysis. Early automatic and late controlled pro-

cesses. *J Cogn Neurosci*, *11*(2), 194-205.

Halle, M. & Mohanan, K. (1985). Segmental phonology of modern english. *Linguistic Inquiry*, *16*(1), 57-116.

Hanson, S. J. & Negishi, M. (2002). On the emergence of rules in neural networks. *Neural Comput*, *14*(9), 2245-68.

Hare, M., Elman, J. L. & Daugherty, K. (1995). Default generalization in connectionist networks. *Language and Cognitive Processes*, *10*, 601-630.

Hauser, M. D., Chomsky, N. & Fitch, W. T. (2002). The faculty of language : what is it, who has it, and how did it evolve ? *Science*, *298*(5598), 1569-79.

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.

Hauser, M. D., Weiss, D. & Marcus, G. (2002). Rule learning by cotton-top tamarins. *Cognition*, *86*(1), B15-22.

Hebb, D. O. (1949). *The organization of behaviour*. New York : John Wiley & Sons.

Herman, L., Pack, A. & Morrel-Samuels, P. (1993). Representational and conceptual skills of dolphins. In H. Roitblat, L. Herman & P. Nachtigall (Eds.), *Language and communication : Comparative perspectives* (pp. 403–42). Hillsdale, NJ : Erlbaum.

Hicks, R., Hakes, D. & Young, R. (1966). Generalization of serial position in rote serial learning. *J Exp Psychol*, *71*(6), 916-7.

Hinton, G. E. & Anderson, J. (Eds.). (1981). *Parallel models of associative memory*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.

Hinton, G. E., McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. (1986). Distributed representations. In D. E. Rumelhart, J. L. McClelland & The PDP Research Group (Eds.), *Parallel distributed processing* (Vol. 1 : Foundations, pp. 77–109). Cambridge, MA : Mit Press.

Hirsh-Pasek, K., Treiman, R. & Schneiderman, M. (1984). Brown & hanlon revisited : Mothers' sensitivity to ungrammatical forms. *J Child Lang*, *11*(1), 81–88.

Hodges, W. (2004, June). Exploring the borderlands between syntax and

semantics. In *New aspects of compositionality.* Paris.

Horváth, J., Czigler, I., Sussman, E. & Winkler, I. (2001). Simultaneously active pre-attentive representations of local and global rules for sound sequences in the human brain. *Brain Res Cogn Brain Res*, *12*(1), 131-44.

Hsieh, L., Leonard, L. & Swanson, L. (1999). Some differences between English plural noun inflections and third singular verb inflections in the input : the contributions of frequency, sentence position, and duration. *J Child Lang*, *26*(3), 531-43.

Hubel, D. & Wiesel, T. (1970). The period of susceptibility to the physiological effects of unilateral eye closure in kittens. *J Physiol*, *206*(2), 419-36.

Hume, D. (1739/2003). *A treatise of human nature*. Project Gutenberg.

Hunt, R. & Aslin, R. N. (2001). Statistical learning in a serial reaction time task : access to separable statistical cues by individual learners. *J Exp Psychol Gen*, *130*(4), 658-80.

Ingram, D. & Thompson, W. (1996). Early syntactic acquisition in german : evidence for the modal hypothesis. *Language*, *72*(1), 97–120.

Issa, N., Trachtenberg, J., Chapman, B., Zahs, K. & Stryker, M. (1999). The critical period for ocular dominance plasticity in the Ferret's visual cortex. *J Neurosci*, *19*(16), 6965-78.

Itard, J. M. (1801). *Mémoire sur les premiers développements de victor de l'aveyron*. Paris.

Itard, J. M. (1806). *Rapport sur les nouveaux développements de victor de l'aveyron*. Paris.

Itti, L. & Koch, C. (2001). Computational modelling of visual attention. *Nat Rev Neurosci*, *2*(3), 194-203.

Jarvis, M. & Ettlinger, G. (1977). Cross-modal recognition in chimpanzees and monkeys. *Neuropsychologia*, *15*(4-5), 499-506.

Joanisse, M. & Seidenberg, M. (1999). Impairments in verb morphology after brain injury : a connectionist model. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *96*(13), 7592-7.

Johnson, J. & Newport, E. L. (1989). Critical period effects in second language learning : the influence of maturational state on the acquisition

of English as a second language. *Cognit Psychol*, *21*(1), 60-99.

Johnson, J. & Newport, E. L. (1991). Critical period effects on universal properties of language : the status of subjacency in the acquisition of a second language. *Cognition*, *39*(3), 215-58.

Johnston, B. (1991). *The acquisition of morphology in polish and russian : A comparative study.* Unpublished manuscript, University of Hawaii, Honolulu. (as cited in Peters & Stömqvist, 1996)

Kamin, L. (1969). Selective association and conditioning. In N. Mackintosh & W. Honig (Eds.), *In fundamental issues in associative learning* (p. 42Ű-64). Halifax : Dalhousie University Press. (as cited in Gallistel, 2000)

Kanwisher, N. (1987). Repetition blindness : type recognition without token individuation. *Cognition*, *27*(2), 117-43.

Kanwisher, N., Driver, J. & Machado, L. (1995). Spatial repetition blindness is modulated by selective attention to color or shape. *Cognit Psychol*, *29*(3), 303-37.

Kanwisher, N., Kim, J. & Wickens, T. (1996). Signal detection analyses of repetition blindness. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *22*(5), 1249-60.

Kanwisher, N. & Potter, M. (1989). Repetition blindness : the effects of stimulus modality and spatial displacement. *Mem Cognit*, *17*(2), 117-24.

Kastak, D. & Schusterman, R. J. (1994). Transfer of visual identity matching-to-sample in two california sea lions (zalophus californianus). *Anim Learn Behav*, *22*, 427–35.

Kelly, M. (1996). The role of phonology in grammatical category assignments. In J. L. Morgan & K. Demuth (Eds.), *Signal to syntax. bootstrapping from speech to grammar in early acquisition* (pp. 249–262). Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.

Kim, J., Pinker, S., Prince, A. & Prasada, S. (1991). Why no mere mortal has ever flown out to center field. *Cognit Sci*, *15*, 173-218.

Kim, M., McGregor, K. & Thompson, C. (2000). Early lexical development in English- and Korean-speaking children : language-general and language-specific patterns. *J Child Lang*, *27*(2), 225-54.

Kiparsky, P. (1982). From cyclic phonology to lexical phonology. In *The structure of phonological representations (part i)* (pp. 131–175). Dordrecht, Holland : Foris.

Klein, R. M. (1974). *Word order : Dutch children and their mothers.* Publications of the Institute of General Linguistics 9. University of Amsterdam. (as cited in Wijnen et al., 2001)

Klima, E. & Bellugi, U. (1979). *The signs of language*. Cambridge, MA : Harvard University Press.

Kluender, K., Diehl, R. & Killeen, P. (1987). Japanese quail can learn phonetic categories. *Science*, *237*(4819), 1195-7.

Knudsen, E. & Knudsen, P. (1990). Sensitive and critical periods for visual calibration of sound localization by barn owls. *J Neurosci*, *10*(1), 222-32.

Knudsen, E., Zheng, W. & DeBello, W. (2000). Traces of learning in the auditory localization pathway. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *97*(22), 11815-20.

Koffka, K. (1935). *Principles of gestalt psychology*. New York, NY : Harcourt, Brace and Company.

Komarova, N. & Nowak, M. (2001). Natural selection of the critical period for language acquisition. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, *268*(1472), 1189-96.

Korzyukov, O. A., Winkler, I., Gumenyuk, V. I. & Alho, K. (2003). Processing abstract auditory features in the human auditory cortex. *Neuroimage*, *20*(4), 2245-58.

Köpcke, K. (1998). The acquisition of plural marking in English and German revisited : schemata versus rules. *J Child Lang*, *25*(2), 293-319.

Krebs, H., Aisen, M., Volpe, B. & Hogan, N. (1999). Quantization of continuous arm movements in humans with brain injury. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *96*(8), 4645-9.

Laurence, S. & Margolis, E. (2001). The poverty of the stimulus argument. *Brit J Phil Sci*, *52*, 217–276.

Legate, J. A. & Yang, C. D. (2002). Empirical re-assessment of stimulus poverty arguments. *Linguist Rev*, *19*, 151–162.

Lehman, J. F., Laird, J. E. & Rosenbloom, P. (1998). A gentle introduction to soar, an architecture for human cognition. In D. Scarborough & S. Sternberg (Eds.), *An invitation to cognitive science* (2nd ed., Vol. 4, pp. 211–253). Cambridge, MA : MIT Press.

Lenneberg, E. H. (1967). *Biological foundations of language*. New York : John Wiley and Sons.

Leonard, L. & Eyer, J. (1996). Deficits of grammatical morphology in children with specific language impairment and their implications for notions of bootstrapping. In J. L. Morgan & K. Demuth (Eds.), *Signal to syntax. bootstrapping from speech to grammar in early acquisition* (pp. 233–47). Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.

Li, W. & Gilbert, C. D. (2002). Global contour saliency and local colinear interactions. *J Neurophysiol*, *88*(5), 2846-56.

Liberman, A. & Mattingly, I. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, *21*(1), 1-36.

Lidz, J., Gleitman, H. & Gleitman, L. R. (2003). Understanding how input matters : verb learning and the footprint of universal grammar. *Cognition*, *87*(3), 151-78.

Lidz, J. & Gleitman, L. R. (2004). Argument structure and the child's contribution to language learning. *Trends Cogn Sci*, *8*(4), 157-161.

Lidz, J., Waxman, S. & Freedman, J. (2003). What infants know about syntax but couldn't have learned : experimental evidence for syntactic structure at 18 months. *Cognition*, *89*(3), B65-73.

Liegeois-Chauvel, C., Musolino, A. & Chauvel, P. (1991). Localization of the primary auditory area in man. *Brain*, *114 (Pt 1A)*, 139-51.

Lindauer, M. (1957). Sonnenorientierung der bienen unter der aequatorsonne und zur nachtzeit. *Naturwissenschaften*, *44*, 1–6.

Lindauer, M. (1959). Angeborene und erlernte komponenten in der sonnenorientierung der bienen. *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, *42*, 43–62.

Linkenhoker, B. A. & Knudsen, E. I. (2002). Incremental training increases the plasticity of the auditory space map in adult barn owls. *Nature*, *419*(6904), 293-6.

Locke, J. (1690/2004). *An essay concerning humane understanding*. Project Gutenberg.

Lotto, A., Kluender, K. & Holt, L. (1997). Perceptual compensation for co-articulation by Japanese quail (Coturnix coturnix japonica). *J Acoust Soc Am*, *102*(2 Pt 1), 1134-40.

MacWhinney, B. & Leinbach, J. (1991). Implementations are not conceptualizations : revising the verb learning model. *Cognition*, *40*(1-2), 121-57.

Malone, D., Tolan, J. & Rogers, C. (1980). Cross-modal matching of objects and photographs in the monkey. *Neuropsychologia*, *18*(6), 693-7.

Marcus, G. F. (1993). Negative evidence in language acquisition. *Cognition*, *46*(1), 53-85.

Marcus, G. F. (1998a). Can connectionism save constructivism ? *Cognition*, *66*(2), 153-82.

Marcus, G. F. (1998b). Rethinking eliminative connectionism. *Cognit Psychol*, *37*(3), 243–82.

Marcus, G. F. (1999a). Connectionism : with or without rules ? response to J.L. McClelland and D.C. Plaut (1999). *Trends Cogn Sci*, *3*(5), 168-170.

Marcus, G. F. (1999b). Do infants learn grammar with algebra or statistics ? reply to Seidenberg and Elman, Eimas and Negishi. *Science*, *284*, 436–7.

Marcus, G. F. (1999c). Reply to Christiansen and Curtin. *Trends Cogn Sci*, *3*(8), 290-291.

Marcus, G. F. (1999d). Reply to Seidenberg and Elman. *Trends Cogn Sci*, *3*(8), 289.

Marcus, G. F. (1999e). Rule learning by seven-month-old infants and neural networks. response to Altmann and Dienes. *Science*, *284*, 875a.

Marcus, G. F. (2001). *The algebraic mind : integrating connectionism and cognitive science*. Cambridge, MA : MIT Press.

Marcus, G. F., Brinkmann, U., Clahsen, H., Wiese, R. & Pinker, S. (1995). German inflection : the exception that proves the rule. *Cognit Psychol*, *29*(3), 189-256.

Marcus, G. F., Pinker, S., Ullman, M. T., Hollander, M., Rosen, T. & Xu, F.

(1992). Overregularization in language acquisition. *Monogr Soc Res Child Dev*, *57*(4), 1-182.

Marcus, G. F., Vijayan, S., Rao, S. B. & Vishton, P. (1999). Rule learning by seven-month-old infants. *Science*, *283*(5398), 77-80.

Markand, O. (1994). Brainstem auditory evoked potentials. *J Clin Neurophysiol*, *11*(3), 319-42.

Marler, P. (1997). Three models of song learning : evidence from behavior. *J Neurobiol*, *33*(5), 501-16.

Marr, D. & Nishihara, H. K. (1992). Visual information processing : Artificial intelligence and the sensorium of sight. In S. M. Kosslyn & R. A. Andersen (Eds.), *Frontiers in cognitive neurosceince* (pp. 165–186). Cambridge, MA : MIT Press. (Reprinted from Technology Review 81 :2–23 (1978))

Marslen-Wilson, W. & Tyler, L. (1997). Dissociating types of mental computation. *Nature*, *387*(6633), 592-4.

Marslen-Wilson, W. & Tyler, L. (1998). Rules, representations and the english past tense. *Trends Cogn Sci*, *2*, 428–35.

Marslen-Wilson, W., Tyler, L., Waksler, R. & Older, L. (1994). Morphology and meaning in the english mental lexicon. *Psychol Rev*, *101*, 3–33.

Martin, S., Grimwood, P. & Morris, R. (2000). Synaptic plasticity and memory : an evaluation of the hypothesis. *Annu Rev Neurosci*, *23*, 649-711.

McCarthy, J. J. (1979). *Formal problems in semitic phonology and morphology*. Doctoral dissertation, MIT, Cambridge, MA. (Distributed by Indiana University Linguistics Club, Bloomington, IN. Published by Garland Press, New York, 1985)

McCarthy, J. J. & Prince, A. (1993). Generalized alignment. In G. Booij & J. van Marle (Eds.), *Yearbook of morphology 1993* (pp. 79–153). Boston, MA : Kluwer.

McClelland, J. L. & Plaut, D. (1999). Does generalization in infant learning implicate abstract algebra-like rules ? *Trends Cogn Sci*, *3*(5), 166-168.

McClelland, J. L., Rumelhart, D. E. & The PDP Research Group (Eds.). (1986). *Parallel distributed processing* (Vol. 2 : Psychological and Biolo-

gical Models). Cambridge, MA : MIT Press.

McCloskey, M. & Cohen, N. J. (1989). Catastrophic interference in connectionist networks : The sequential learning problem. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 24, pp. 109–164). Academic Press.

Mesulam, M. (1998). From sensation to cognition. *Brain*, *121 (Pt 6)*, 1013-52.

Miller, G. A. & Chomsky, N. (1963). Finitary models of language users. In D. R. Luce, R. R. Bush & E. Galanter (Eds.), *Handbook of mathematical psychology* (Vol. 2, pp. 420–491). New York : John Wiley.

Miller, M. & MacKay, D. (1994). Repetition deafness : Repeated words in computer-compressed speech are difficult to encode and recall. *Psychol Sci*, *5*, 47–51.

Miller, M. & MacKay, D. (1996). Relations between language and memory : The case of repetition deafness. *Psychol Sci*, *7*, 347–51.

Milner, A. (1973). Matching within and between sense modalities in the monkey (Macaca mulatta). *J Comp Physiol Psychol*, *83*(2), 278-84.

Minsky, M. L. & Papert, S. A. (1969). *Perceptrons*. Cambridge, MA : MIT Press.

Mintz, T. H. (2002). Category induction from distributional cues in an artificial language. *Mem Cognit*, *30*(5), 678-86.

Mithen, S. J. (2003). Thoroughly mobile minds. *New Scientist*, *178*, 40–1.

Moerk, E. L. (1991). Positive evidence for negative evidence. *First Language*, *11*(32), 219–251.

Morgan, J. L. (1986). *From simple input to complex grammar*. Cambridge, MA : MIT Press.

Morgan, J. L., Meier, R. & Newport, E. L. (1987). Structural packaging in the input to language learning : contributions of prosodic and morphological marking of phrases to the acquisition of language. *Cognit Psychol*, *19*(4), 498-550.

Morgan, J. L., Shi, R. & Allopenna, P. (1996). Perceptual bases of rudimentary grammatical categories : Towards a broader conceptualization of bootstrapping. In J. L. Morgan & K. Demuth (Eds.), *Signal*

to syntax. bootstrapping from speech to grammar in early acquisition (pp. 263–283). Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.

Morgan, J. L. & Travis, L. L. (1989). Limits on negative information in language input. *J Child Lang*, *16*(3), 531–552.

Morris, R., Anderson, E., Lynch, G. & Baudry, M. (1986). Selective impairment of learning and blockade of long-term potentiation by an N-methyl-D-aspartate receptor antagonist, AP5. *Nature*, *319*(6056), 774-6.

Mozer, M. C. (1993). Neural net architectures for temporal sequences processing. In A. S. Weigend & N. A. Gershenfeld (Eds.), *Time series prediction : Forecasting the future and understanding the past* (Vol. 15, pp. 243–264). Reading, MA : Addison Wesley.

Mussa-Ivaldi, F. & Bizzi, E. (2000). Motor learning through the combination of primitives. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, *355*(1404), 1755-69.

Mussa-Ivaldi, F., Giszter, S. & Bizzi, E. (1994). Linear combinations of primitives in vertebrate motor control. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *91*(16), 7534-8.

Negishi, M. (1999). Do infants learn grammar with algebra or statistics ? *Science*, *284*(5413), 435 ; author reply 436-7.

New, B., Pallier, C., Ferrand, L. & Matos, R. (2001). Une base de données lexicales du français contemporain sur internet : Lexique. *L'Année Psychologique*, *101*, 447–462. (http ://www.lexique.org)

Newell, A. (1980). Physical symbol systems. *Cognit Sci*, *4*, 135–183.

Newell, A. & Simon, H. (1976). Computer science as empirical inquiry : symbols and search. *Comm ACM*, *19*(3), 113–116.

Newport, E. L. (1990). Maturational constraints on language learning. *Cognit Sci*, *14*, 11–28.

Newport, E. L. & Aslin, R. N. (2004). Learning at a distance I. Statistical learning of non-adjacent dependencies. *Cognit Psychol*, *48*(2), 127-62.

Newport, E. L., Gleitman, H. & Gleitman, L. R. (1977). Mother, i'd rather do it myself : some effects and non-effects of maternal speech style. In C. Snow & C. A. Ferguson (Eds.), *Talking to children : language input*

and interaction. Cambridge : Cambridge University Press.

Newport, E. L., Hauser, M. D., Spaepen, G. & Aslin, R. N. (2004). Learning at a distance II. Statistical learning of non-adjacent dependencies in a non-human primate. *Cognit Psychol*, *49*(2), 85-117.

Newport, E. L. & Neville, D. B. . H. J. (2001). Critical thinking about critical periods : Perspectives on a critical period for language acquisition. In E. Doupoux (Ed.), *Language, brain and cognitive development : Essays in honor of jacques mehler* (p. 481Ű-502). Cambridge : MIT Press.

Näätänen, R., Gaillard, A. & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychol (Amst)*, *42*(4), 313-29.

Näätänen, R., Tervaniemi, M., Sussman, E., Paavilainen, P. & Winkler, I. (2001). "Primitive intelligence" in the auditory cortex. *Trends Neurosci*, *24*(5), 283-8.

Onishi, K. H., Chambers, K. E. & Fisher, C. (2002). Learning phonotactic constraints from brief auditory experience. *Cognition*, *83*(1), B13-23.

Ono, T., Nishijo, H. & Uwano, T. (1995). Amygdala role in conditioned associative learning. *Prog Neurobiol*, *46*(4), 401-22.

Orlov, T., Yakovlev, V., Hochstein, S. & Zohary, E. (2000). Macaque monkeys categorize images by their ordinal number. *Nature*, *404*(6773), 77-80.

Osherson, D., Stob, M. & Weinstein, S. (1984). Learning theory and natural language. *Cognition*, *17*(1), 1-28.

Paavilainen, P., Jaramillo, M., Näätänen, R. & Winkler, I. (1999). Neuronal populations in the human brain extracting invariant relationships from acoustic variance. *Neurosci Lett*, *265*(3), 179-82.

Pallier, C., Dupoux, E. & Jeannin, X. (1997). Expe : an expandable programming language for online psychological experiments. *Behav Res Meth Instr Comp*, *29*, 322–7.

Paulsen, O. & Sejnowski, T. (2000). Natural patterns of activity and long-term synaptic plasticity. *Curr Opin Neurobiol*, *10*(2), 172-9.

Pavlov, I. P. (1927). *Conditioned reflexes : An investigation of the physiological activity of the cerebral cortex* (G. V. Anrep, Ed.). London : Oxford

University Press. (http ://psychclassics.yorku.ca/Pavlov/)

Paz-Y-Miño C, G., Bond, A. B., Kamil, A. C. & Balda, R. P. (2004). Pinyon jays use transitive inference to predict social dominance. *Nature*, *430*(7001), 778-81.

Peña, M. (2003). *Rôle du calcul statistique dans l'acquisition du langage*. Unpublished doctoral dissertation, EHESS, Paris, France.

Peña, M., Bonatti, L. L., Nespor, M. & Mehler, J. (2002). Signal-driven computations in speech processing. *Science*, *298*(5593), 604-7.

Peake, T., Terry, A. M. R., McGregor, P. & Dabelsteen, T. (2002). Do great tits assess rivals by combining direct experience with information gathered by eavesdropping ? *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, *269*(1503), 1925-9.

Penke, M., Weyerts, H., Gross, M., Zander, E., Münte, T. & Clahsen, H. (1997). How the brain processes complex words : an event-related potential study of German verb inflections. *Brain Res Cogn Brain Res*, *6*(1), 37-52.

Penner, S. G. (1987). Parental responses to grammatical and ungrammatical child utterances. *Child Devel*, *58*(2), 376–384.

Penner, S. G. (1995). Negative evidence on negative evidence. *Dev Psychol*, *31*(2), 180–197.

Pepperberg, I. M. (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*, 421–32.

Perruchet, P., Tyler, M. D., Galland, N. & Peereman, R. (2004). Learning nonadjacent dependencies : no need for algebraic-like computations. *J Exp Psychol Gen*, *133*(4), 573-83.

Perruchet, P. & Vinter, A. (1998). PARSER : A model for word segmentation. *J Mem Lang*, *39*, 246–63.

Peters, A. & Stömqvist, S. (1996). The role of prosody in the acquisition of grammatical morphemes. In J. L. Morgan & K. Demuth (Eds.), *Signal to syntax. bootstrapping from speech to grammar in early acquisition* (pp. 215–32). Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.

Petrides, M. & Iversen, S. (1976). Cross-modal matching and the primate

frontal cortex. *Science*, *192*(4243), 1023-4.

Pinker, S. (1991). Rules of language. *Science*, *253*(5019), 530-5.

Pinker, S. (1997). *How the mind works*. New York : Norton.

Pinker, S. (1999). *Words and rules : The ingredients of language*. New York : Basic Books.

Pinker, S. & Prince, A. (1988). On language and connectionism : analysis of a parallel distributed processing model of language acquisition. *Cognition*, *28*(1-2), 73-193.

Pinker, S. & Ullman, M. T. (2002). The past and future of the past tense. *Trends Cogn Sci*, *6*(11), 456-463.

Pizzorusso, T., Medini, P., Berardi, N., Chierzi, S., Fawcett, J. W. & Maffei, L. (2002). Reactivation of ocular dominance plasticity in the adult visual cortex. *Science*, *298*(5596), 1248-51.

Plunkett, K. & Marchman, V. (1993). From rote learning to system building : acquiring verb morphology in children and connectionist nets. *Cognition*, *48*(1), 21-69.

Plunkett, K. & Nakisa, R. (1997). A connectionist model of the arabic plural system. *Lang Cogn Proc*, *12*(5–6), 807–36.

Prince, A. & Smolensky, P. (1993). *Optimality theory : Constraint interaction in generative grammar* (Technical Report No. 2). Center for Cognitive Science, Rutgers University.

Pullum, G. K. & Scholz, B. C. (2002). Empirical assessment of stimulus poverty arguments. *Linguist Rev*, *19*, 9–50.

Pylyshyn, Z. W. (1984). *Computation and cognition : Towards a foundation for cognitive science*. Cambridge, MA : MIT Press.

Ramachandran, V. & Anstis, S. (1986). The perception of apparent motion. *Sci Am*, *254*(6), 102-9.

Ramus, F., Hauser, M. D., Miller, C., Morris, D. & Mehler, J. (2000). Language discrimination by human newborns and by cotton-top tamarin monkeys. *Science*, *288*(5464), 349-51.

Reber, A. S. (1967). Implicit learning of artificial grammars. *J Verb Learn Verb Behav*, *6*(6), 855–863.

Rescorla, R. (1968). Probability of shock in the presence and absence of CS

in fear conditioning. *J Comp Physiol Psychol*, *66*(1), 1-5.

Rescorla, R. (1969). Conditioned inhibition of fear resulting from negative CS-US contingencies. *J Comp Physiol Psychol*, *67*(4), 504-9.

Rescorla, R. & Wagner, A. (1972). A theory of pavlovian conditioning : Variations in the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement. In A. Black & W. Prokasy (Eds.), *In classical conditioning ii* (p. 64Ű-99). New York : Appleton-Century-Crofts.

Ritter, W., Paavilainen, P., Lavikainen, J., Reinikainen, K., Alho, K., Sams, M. et al. (1992). Event-related potentials to repetition and change of auditory stimuli. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, *83*(5), 306-21.

Ritter von Feuerbach, A. (1832/2000). *Beispiel eines verbrechens am seelenleben eines menschen*. Ansbach/Stuttgart : Klett.

Rodriguez, P. (2001). Simple recurrent networks learn context-free and context-sensitive languages by counting. *Neural Comput*, *13*(9), 2093-118.

Rodriguez, P., Wiles, J. & Elman, J. L. (1999). A recurrent neural network that learns to count. *Connection Science*, *11*(1), 5–40.

Rohde, D. & Plaut, D. (1999). Language acquisition in the absence of explicit negative evidence : how important is starting small ? *Cognition*, *72*(1), 67-109.

Rosch, E., Mervis, C. B., Gray, W. D., Johnson, D. M. & Boyes-Braem, P. (1976). Basic objects in natural categories. *Cognit Psychol*, *8*, 382–439.

Rosenblatt, F. (1957). *The perceptron : A perceiving and recognizing automaton (project para)* (Tech. Rep. No. 85-460-1). Ithaca, New York : Cornell Aeronautical Laboratory.

Rosenblatt, F. (1958). The perceptron : a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychol Rev*, *65*(6), 386-408.

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, *323*(6088), 533–536.

Rumelhart, D. E. & McClelland, J. L. (1986). On learning the past tenses of english verbs. In J. L. McClelland, D. E. Rumelhart & The PDP Research Group (Eds.), *Parallel distributed processing : Explorations in the microstructure of cognition* (Vol. 2 : Psychological and Biological Mo-

dels, pp. 216–71). Cambridge, MA : MIT Press.

Rumelhart, D. E., McClelland, J. L. & The PDP Research Group (Eds.). (1986). *Parallel distributed processing* (Vol. 1 : Foundations). Cambridge, MA : MIT Press.

Ryan, J. (1969). Temporal grouping, rehearsal and short-term memory. *Q J Exp Psychol*, *21*(2), 148-55.

Saarinen, J., Paavilainen, P., Schöger, E., Tervaniemi, M. & Näätänen, R. (1992). Representation of abstract attributes of auditory stimuli in the human brain. *Neuroreport*, *3*(12), 1149-51.

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

Saffran, J., Johnson, E., Aslin, R. N. & Newport, E. L. (1999). Statistical learning of tone sequences by human infants and adults. *Cognition*, *70*(1), 27-52.

Saffran, J., Newport, E. L. & Aslin, R. N. (1996). Word segmentation : The role of distributional cues. *J Mem Lang*, *35*, 606–21.

Saxton, M., Kulcsar, B., Marshall, G. & Rupra, M. (1998). Longer-term effects of corrective input : an experimental approach. *J Child Lang*, *25*, 701–721.

Schulz, R. W. (1955). Generalization of serial position in rote serial learning. *J Exp Psychol*, *49*(4), 267-72.

Schyns, P. (1998). Diagnostic recognition : task constraints, object information, and their interactions. *Cognition*, *67*(1-2), 147-79.

Seidenberg, M. (1997). Language acquisition and use : learning and applying probabilistic constraints. *Science*, *275*(5306), 1599-603.

Seidenberg, M. & Elman, J. (1999a). Do infants learn grammar with algebra or statistics ? *Science*, *284*(5413), 433.

Seidenberg, M. & Elman, J. (1999b). Networks are not 'hidden rules'. *Trends Cogn Sci*, *3*(8), 288–289.

Selkirk, E. (1996). The prosodic structure of function words. In J. L. Morgan & K. Demuth (Eds.), *Signal to syntax. bootstrapping from speech to grammar in early acquisition* (pp. 187–213). Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.

Senghas, A. & Coppola, M. (2001). Children creating language : how Nicaraguan sign language acquired a spatial grammar. *Psychol Sci*, *12*(4), 323-8.

Senghas, A., Kita, S. & Ozyürek, A. (2004). Children creating core properties of language : evidence from an emerging sign language in Nicaragua. *Science*, *305*(5691), 1779-82.

Shi, R., Werker, J. & Morgan, J. L. (1999). Newborn infants' sensitivity to perceptual cues to lexical and grammatical words. *Cognition*, *72*(2), B11-21.

Shors, T. & Matzel, L. (1997). Long-term potentiation : what's learning got to do with it ? *Behav Brain Sci*, *20*(4), 597-614 ; discussion 614-55.

Shultz, T. R. & Bale, A. C. (2001). Neural network simulation of infant familiarization to artificial sentences : Rule-like behavior without explicit rules and variables. *Infancy*, *2*(4), 501-536.

Sigman, M., Cecchi, G., Gilbert, C. & Magnasco, M. (2001). On a common circle : natural scenes and Gestalt rules. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *98*(4), 1935-40.

Sinnott, J. & Aslin, R. N. (1985). Frequency and intensity discrimination in human infants and adults. *J Acoust Soc Am*, *78*(6), 1986-92.

Slobin, D. (1966). The acquisition of russian as a native language. In F. Smith & G. Miller (Eds.), *The genesis of language : A psycholinguistic approach* (pp. 129–148). Cambridge, MA : MIT Press. (as cited in Peters & Stömqvist, 1996)

Smith, K. (1966). Grammatical intrusions in the recall of structured letter pairs : mediated transfer or position learning ? *J Exp Psychol*, *72*(4), 580-8.

Smith, K. (1967). Rule-governed intrusions in the free recall of structured letter pairs. *J Exp Psychol*, *73*(1), 162-4.

Smith, K. (1969). Learning co-occurrence restrictions : rule learning or rote learning. *J Verb Learn Verb Behav*, *8*, 319Ű-21.

Smoczynska, M. (1985). The acquisition of polish. In D. Slobin (Ed.), *The crosslinguistic study of language acquisition* (Vol. 3, pp. 595–686). Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates. (as cited in Peters &

Stömqvist, 1996)

Sonnenstuhl, I., Eisenbeiss, S. & Clahsen, H. (1999). Morphological priming in the German mental lexicon. *Cognition*, *72*(3), 203-36.

Soto-Faraco, S. (2000). An auditory repetition deficit under low memory load. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *26*(1), 264-78.

Srinivasan, M., Zhang, S., Altwein, M. & Tautz, J. (2000). Honeybee navigation : nature and calibration of the "odometer". *Science*, *287*(5454), 851-3.

Stabler, E. P. (1998). Acquiring languages with movement. *Syntax*, *1*(1), 72-72.

Stabler, E. P. (2003). The acquisition and use of grammar : computational perspectives. In *EALing I - Fall School in Linguistics.* Ecole Normale Supérieure, Paris, France.

Stemberger, J. P. (2002). Overtensing and the effect of regularity. *Cognit Sci*, *26*, 737–66.

Stemberger, J. P. & Middleton, C. S. (2003). Vowel dominance and morphological processing. *Lang Cogn Proc*, *18*(4), 369–404.

Streicher, M. & Ettlinger, G. (1986). Cross-modal recognition by the monkey : can the experience in the first modality be reduced to a single trial ? *Neuropsychologia*, *24*(2), 255-9.

Stromswold, K. (1999). The cognitive neuroscience of language acquisition. In M. S. Gazzaniga (Ed.), *The new cognitive neurosciences* (2 ed., pp. 909–932). Cambridge, MA : MIT Press.

Taatgen, N. (2001). Extending the past-tense debate : a model of the german plural. In J. Moore & K. Stenning (Eds.), *Proceedings of the twenty-third annual conference of the cognitive science society* (pp. 1018–23). Mahwah, NJ : Erlbaum.

Taft, M. & Forster, K. I. (1975). Lexical storage and retrieval of prefixed words. *J Verb Learn Verb Behav*, *14*, 638–647.

Tardif, T., Gelman, S. A. & Xu, F. (1999). Putting the "noun bias" in context : A comparison of english and mandarin. *Child Devel*, *70*(3), 620–635.

Tarr, M. & Bülthoff, H. (1998). Image-based object recognition in man, monkey and machine. *Cognition*, *67*(1-2), 1-20.

Tervaniemi, M., Rytkönen, M., Schröger, E., Ilmoniemi, R. & Näätänen, R. (2001). Superior formation of cortical memory traces for melodic patterns in musicians. *Learn Mem*, *8*(5), 295-300.

Thoroughman, K. & Shadmehr, R. (2000). Learning of action through adaptive combination of motor primitives. *Nature*, *407*(6805), 742-7.

Tomasello, M. & Call, J. (1997). *Primate cognition*. Oxford : Oxford University Press.

Trehub, S., Schellenberg, E. & Kamenetsky, S. (1999). Infants' and adults' perception of scale structure. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *25*(4), 965-75.

Tyler, L. K., Randall, B. & Marslen-Wilson, W. D. (2002). Phonology and neuropsychology of the English past tense. *Neuropsychologia*, *40*(8), 1154-66.

Ullman, M. T. (2001). A neurocognitive perspective on language : the declarative/procedural model. *Nat Rev Neurosci*, *2*(10), 717-26.

Ullman, M. T., Corkin, S., Coppola, M., Hickok, G., Growdon, J., Koroshetz, W. et al. (1997). A neural dissociation within language : Evidence that the mental dictionary is part of declarative memory, and that grammatical rules are processed by the procedural system. *J Cogn Neurosci*, *9*, 266–76.

Ullman, S. (1984). Visual routines. *Cognition*, *18*(1-3), 97-159.

Villiers, J. de & Villiers, P. de. (1973). A cross-sectional study of the acquisition of grammatical morphemes in child speech. *J Psycholinguist Res*.

von der Malsburg, C. (1981). *The correlation theory of brain function* (Tech. Rep. No. 81-2). Göttingen, Germany : Max-Planck-Institut fur Biophysikalische Chemie.

von Humboldt, W. (1836). *Über die Verschiedenheit des menschlichen Sprachbaues und ihren Einfluß auf die geistige Entwicklung des Menschengeschlechts*. Berlin : Druckerei der Könglichen Akademie. (Reprinted 1960 by Dummler, Bonn)

Wagner, A., Logan, F., Haberlandt, K. & Price, T. (1968). Stimulus selection in animal discrimination learning. *J Exp Psychol*, *76*(2), 171-80.

Wallace, M., Wilkinson, L. & Stein, B. (1996). Representation and integration of multiple sensory inputs in primate superior colliculus. *J Neurophysiol*, *76*(2), 1246-66.

Wallis, J., Anderson, K. & Miller, E. K. (2001). Single neurons in prefrontal cortex encode abstract rules. *Nature*, *411*(6840), 953-6.

Wehner, R. & Menzel, R. (1990). Do insects have cognitive maps ? *Annu Rev Neurosci*, *13*, 403-14.

Weiskrantz, L. & Cowey, A. (1975). Cross-modal matching in the rhesus monkey using a single pair of stimuli. *Neuropsychologia*, *13*(3), 257-61.

Wertheimer, M. (1923/1938). Laws of organization in perceptual forms. first published as untersuchungen zur lehre von der gestalt ii, in psycologische forschung, 4, 301-350. In W. Ellis (Ed.), *A source book of gestalt psychology* (pp. 71–88). London : Routledge & Kegan Paul. (http ://www.psych.yorku.ca/classics/Wertheimer/Forms/forms.htm)

Wijnen, F., Kempen, M. & Gillis, S. (2001). Root infinitives in dutch early child language : an effect of input ? *J Child Lang*, *28*, 629–660.

Wittgenstein, L. (1953). *Philosophical investigations*. Oxford : Blackwell.

Wolff, C. & Schröger, E. (2001). Activation of the auditory pre-attentive change detection system by tone repetitions with fast stimulation rate. *Brain Res Cogn Brain Res*, *10*(3), 323-7.

Yang, C. D. (2004). Universal Grammar, statistics or both ? *Trends Cogn Sci*, *8*(10), 451-456.