



HAL
open science

Électromyographie laryngée du langage intérieur dans la flexibilité mentale et la mémoire

Lucie Laurent

► **To cite this version:**

Lucie Laurent. Électromyographie laryngée du langage intérieur dans la flexibilité mentale et la mémoire. Psychologie. Université de Franche-Comté, 2013. Français. NNT : 2013BESA1033 . tel-01336530

HAL Id: tel-01336530

<https://theses.hal.science/tel-01336530>

Submitted on 23 Jun 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Thèse en vue de l'obtention du titre de docteur en

PSYCHOLOGIE

ÉLECTROMYOGRAPHIE LARYNGÉE DU LANGAGE INTÉRIEUR DANS LA FLEXIBILITÉ MENTALE ET LA MÉMOIRE

Présentée et soutenue publiquement par

Lucie LAURENT

Le 13 décembre 2013

Sous la direction de M. le Professeur Fabien Mathy et de M. le Professeur Jean-Louis Millot

Membres du Jury :

Agnès BLAYE, Professeur à l'Université d'Aix-Marseille, Rapporteur
Cédric BOUQUET, Professeur à l'Université de Poitiers, Rapporteur
Laurence CASINI, Maître de conférences à l'Université d'Aix-Marseille
André DIDIERJEAN, Professeur à l'Université de Franche-Comté
Patrick LEMAIRE, Professeur à l'Université d'Aix-Marseille
Fabien MATHY, Professeur à l'Université Nice Sophia Antipolis
Jean-Louis MILLOT, Professeur à l'Université de Franche-Comté

RESUME

Cette thèse a pour objet l'étude du langage intérieur dans la flexibilité mentale et la mémoire à court terme à l'aide de l'électromyographie de surface, une méthode qui a permis d'enregistrer l'activité électrique des muscles laryngés. Pour étudier le rôle du langage intérieur dans la flexibilité, six expériences ont été réalisées en manipulant la complexité des tâches, ainsi que l'âge des participants. Les résultats montrent une sollicitation plus importante du langage avec la complexité des tâches, que ce soit pour encoder les règles en mémoire ou pour classer les stimuli, et ce d'autant plus que les participants sont âgés. Nous discutons ces résultats en rapport avec les études utilisant la méthode de suppression articulatoire. Concernant le rôle du langage intérieur dans la mémoire à court terme, deux expériences ont été réalisées avec pour objectif principal l'étude de l'effet de similarité phonologique. Les résultats montrent une quantité de langage plus importante pour les lettres dissimilaires, qui ont aussi été mieux restituées par les participants. A l'inverse, nous avons observé un meilleur rappel de l'ensemble des lettres pour les participants sollicitant de façon plus modérée le langage intérieur. Ces résultats sont mis en rapport avec les processus d'interférences motrice et auditive qui gouvernent la mémorisation à court terme.

Mots-clés : Langage intérieur – électromyographie – flexibilité – mémoire à court terme

ABSTRACT

In this thesis, we examined the role of inner speech in mental flexibility and short-term memory using laryngeal surface electromyography, a method for recording inner speech signals. Six experiments manipulating tasks complexity and age of participants were performed to study mental flexibility. Results showed a greater use of inner speech with tasks complexity, either when encoding the rules in memory or while sorting the stimuli, and especially when the participants were older. We discuss the results with reference to articulatory suppression, an alternative method for studying inner speech. To study inner speech in short-term memory, two other experiments were performed with the main objective of studying the phonological similarity effect. Results showed a greater amount of language for dissimilar letters which were also better recalled by participants. On the contrary, we observed a better recall of letters (being similar or dissimilar) by participants who resorted to language moderately. These results suggest that both motor and auditory types of interferences can affect short-term memorization.

Keywords: inner speech – electromyography – flexibility – short-term memory

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier chaleureusement Fabien Mathy pour la confiance qu'il m'a accordée, pour sa très grande disponibilité tout au long de ma thèse ainsi que pour ses précieux conseils pour mener à bien mon doctorat. Je le remercie pour avoir su trouver les mots permettant de dissiper mes doutes mais aussi pour son enthousiasme à l'égard de la recherche qui m'a permis de me dépasser. Je remercie également Jean-Louis Millot sans qui je n'aurais jamais eu l'opportunité ni la chance de faire ce doctorat. Je le remercie de m'avoir fait confiance et de m'avoir toujours offert son aide et ses conseils quand j'en avais besoin.

Je n'oublie pas de remercier Patrice Andrieu pour toute l'aide qu'il m'a apportée concernant le traitement des données électromyographiques et pour m'avoir expliqué, non sans difficulté, les mystères du traitement du signal.

Je remercie vivement Agnès Blaye, Cédric Bouquet, Laurence Casini, André Didierjean et Patrick Lemaire pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance envers l'ensemble des membres de la Maison des Sciences de l'Homme et de l'Environnement Claude Nicolas Ledoux, du Laboratoire de Psychologie et du Laboratoire de Neurosciences de l'Université de Franche-Comté. Je remercie également la Région de Franche-Comté pour avoir financé ces travaux. Je n'oublie pas mes collègues doctorants qui ont partagé ces trois années de thèse avec moi. J'ai une pensée particulière pour mon "petit frère" Mustapha et toute l'aide qu'il m'a apporté, ainsi que pour Aurore, Cyril, Jonathan, Mahé et Marie.

Un grand merci à mon binôme, Pierre-Edouard, pour son soutien, son talent, et tout simplement pour sa précieuse amitié. Je remercie sincèrement Laetitia et Gégé, pour être des amies plus que fantastiques (et dire qu'il a fallu plus de 6 mois et 3 heures sous un soleil de plomb avant de s'adresser la parole !). Je remercie mes trois cliniciens préférés, Aline, Aurélien et Marie-Anne, pour tous ces bons moments partagés sur les bancs de la fac mais aussi et surtout à côté. J'ai une pensée particulière pour Antoine et Amandine, et je n'oublie pas de remercier Faustine, qui j'espère trouvera son bonheur au pays des caribous.

Je remercie mes parents pour leur soutien inconditionnel, Stéphane pour avoir toujours été fier de sa petite sœur, et David qui restera à tout jamais mon Beatles préféré mais également le meilleur chasseur de pigeons que la rue Luc Breton ait connu. Je n'oublie pas Karine et Céline, ainsi que mes deux loustics, Raphaël et Ethan. Un grand merci à Elyane et Alain pour avoir toujours été présents dans ma vie et pour leur soutien permanent.

Enfin, je tiens à remercier sincèrement Aline, Clément, Elyane, Gaëlle, Gaétan, Laetitia et Ludivine pour toute l'aide apportée dans la dernière ligne droite. J'ai également une petite pensée pour l'ensemble des personnes ayant participé à mes expériences, et plus particulièrement pour les membres de Ago.

Je terminerai ces remerciements par une citation entendue lors d'un congrès, et qui est selon moi, la réponse à la plupart des plus grandes énigmes de ce monde.

« La tarte aux pommes, tout le monde est pour ! »

SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Le langage intérieur.....	3
1. Le tracé électromyographique, reflet du langage intérieur	4
2. Physiologie et anatomie du langage.....	6
2.1. La transmission neuromusculaire	7
2.2. L'appareil phonatoire.....	8
3. Méthodologie de l'électromyographie laryngée de surface : étude préliminaire - Expérience 1.....	10
3.1. Matériel et méthode	10
3.2. Résultats	15
3.3. Discussion / Conclusion.....	17
Chapitre 2 : La flexibilité mentale	18
1. Développement anatomique et comportemental	19
2. Mesure de la flexibilité mentale	21
2.1. Une tâche historique : l'alternance mathématique.....	21
2.2. Les effets classiques dans les tâches d'alternance	23
2.3. Une tâche paradigmatique : le DCCS	24
2.4. Une tâche synthétique : La tâche d'alternance catégorielle	26
3. Étude du développement de la flexibilité : Réalisation de tâches d'alternance de difficulté croissante chez des enfants d'âge préscolaire – Expérience 2.....	30
3.1. Matériel et méthode	30
3.2. Résultats	36
3.3. Discussion	41
3.4. Conclusion.....	44

4.	Effets de la suppression articulatoire sur la flexibilité.....	46
5.	Étude électromyographique de la sollicitation du langage intérieur dans l'alternance de tâche chez le sujet adulte – Expérience 3.....	47
5.1.	Matériel et méthode	48
5.2.	Résultats	52
5.3.	Discussion	58
6.	Étude de la sollicitation du langage intérieur dans l'alternance de tâches et effet de l'âge - Expériences 4 et 5	62
6.1.	Matériel et méthode	62
6.2.	Résultats	64
6.3.	Discussion	77
6.4.	Conclusion.....	80
7.	Étude du rôle du langage intérieur dans une tâche classique de flexibilité : le test de classement des cartes du Wisconsin (WCST) - Expérience 6.....	81
7.1.	Matériel et méthode	81
7.2.	Résultats	85
7.3.	Discussion	90
8.	Conclusion des expériences 2, 3, 4, 5 et 6.....	91
Chapitre 3 : La mémoire à court terme.....		94
1.	Boucle phonologique et effet de similarité	94
2.	Étude du langage intérieur et effet de similarité - Expérience 7	97
2.1.	Matériel et méthode	97
2.2.	Résultats	99
2.3.	Discussion	105
3.	Étude du langage intérieur et effet de similarité version 2 - Expérience 8	106
3.1.	Résultats	106
3.2.	Discussion	112

3.3. Conclusion.....	113
Chapitre 4 : Conclusion et perspectives.....	115
1. Électromyographie de surface	115
1.1. Traitement du signal électromyographique	115
1.2. Positionnement des électrodes au niveau laryngé	116
2. Langage intérieur et flexibilité mentale	117
2.1. Enregistrement électromyographique	117
2.2. Tâches d'alternance catégorielle	117
2.3. Flexibilité mentale et développement	118
3. Langage intérieur et effet de similarité phonologique	119
4. Conclusion.....	120
Références bibliographiques	121
Annexes	135

INTRODUCTION GENERALE

Les fonctions exécutives regroupent un ensemble de processus cognitifs complexes dont les lobes frontaux, et notamment le cortex préfrontal, constituent le substrat anatomique principal. La notion de fonctions exécutives a été développée par Luria afin de décrire les mécanismes permettant la réalisation de tâches impliquant une planification ou des décisions complexes (Luria, 1966, 1973). Luria est également connu pour s'être intéressé dès le départ au lien qu'entretient le langage avec ces fonctions dans l'organisation de l'action et de la pensée. Les fonctions exécutives (ou contrôle exécutif) comportent un ensemble de processus ayant pour fonction principale une adaptation intentionnelle à des situations nouvelles (Norman & Shallice, 1986 ; Posner & Peterson, 1990). C'est en se reposant sur des mécanismes élémentaires de manipulation de l'information (maintien, séquentialisation, inhibition) que les fonctions exécutives permettent notamment de développer des capacités de raisonnement, de planification et de flexibilité mentale (Engle, 2002 ; Ilkowska & Engle, 2010 ; Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, & Howerter, 2000). Ainsi les fonctions exécutives sont impliquées dans de nombreuses activités complexes telles que résoudre des problèmes, développer une théorie de l'esprit et tout ce qui se rattache à la prise de décision impliquant l'adaptation sociale et les émotions interindividuelles (e.g., Crone & Van Der Molen, 2008).

Afin de faire le lien de façon plus précise entre le langage et les fonctions cérébrales, ce travail de doctorat s'est intéressé au rôle du langage intérieur dans deux fonctions cérébrales majeures, la flexibilité mentale et la mémoire à court terme. Nous avons pour cela choisi d'utiliser l'électromyographie de surface, une méthode assez peu employée dans ce domaine. Cette technique permet de détecter l'activité électrique des muscles impliqués dans le langage alors même qu'aucun son n'est émis et qu'aucun mouvement des lèvres n'est effectué (Betts, Binsted, & Jorgensen, 2006 ; Jou, Schultz, Walliczek, Kraft, & Waibel, 2006 ; Schultz, & Wand, 2010). Ainsi, l'électromyographie de surface nous permet d'observer les trains de langage des participants lors de tâches mentales avec une résolution temporelle fine, ce qui n'est pas possible avec la suppression articulatoire, une méthode alternative plus répandue pour étudier le langage intérieur.

Les travaux de cette thèse s'articulent en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré au langage intérieur lui-même ainsi qu'aux différentes méthodes existantes pour l'étudier. Nous abordons en particulier la technique de l'électromyographie de surface que

nous avons choisi d'utiliser dans cette thèse. Par une première expérience préliminaire, nous montrons que cette méthode est efficace pour étudier de façon naturelle le langage intérieur, puisque les enregistrements électromyographiques révèlent que nous sommes capables de détecter le langage, même lorsque celui-ci est intériorisé.

Le second chapitre est dédié à l'étude du langage intérieur dans la flexibilité mentale. Nous avons dans un premier temps développé de nouvelles tâches d'alternance plus discriminantes du développement de la flexibilité mentale, que nous avons couplées dans un second temps à l'électromyographie de surface. Les différentes expériences de ce chapitre montrent l'importance du langage tout au long du processus de flexibilité, c'est-à-dire pendant l'encodage en mémoire des règles de décision, pendant les phases de décision mais également au cours de l'intervalle pendant lequel l'esprit doit se reconfigurer pour anticiper une décision ultérieure. Ce travail introduit également une variable développementale puisque le rôle du langage a été étudié dans plusieurs catégories d'âges et notamment chez les personnes âgées, une population pour laquelle un déclin des fonctions cognitives lié au vieillissement est observé. Les catégories d'âges extrêmes (enfants et personnes âgées) ont pour objectif de mettre en exergue des effets plus atténués chez les adultes.

Afin d'appliquer notre méthode à un autre domaine, le troisième et dernier chapitre de cette thèse est centré sur l'étude du langage intérieur dans la mémoire à court terme. En utilisant l'électromyographie laryngée, l'objectif principal de ce chapitre est de préciser le lien entre le langage, la boucle phonologique et l'effet de similarité phonologique, effet classique en mémoire à court terme à l'origine d'une diminution des performances de rappel lorsque les stimuli sont phonologiquement similaires.

Enfin, une conclusion générale reprendra l'ensemble des études effectuées dans cette thèse, en précisant les difficultés rencontrées et les perspectives nouvelles que la technique électromyographique peut nous offrir.

CHAPITRE 1 : LE LANGAGE INTERIEUR

Les premiers questionnements sur le langage intérieur remontent à la fin du 19^{ème} siècle avec les travaux introspectifs du psychologue français Egger (1881) dans lesquels il explique que le langage intérieur (inaudible pour autrui) accompagne continuellement ses réflexions. Un siècle plus tard, Sokolov explique de la même façon que le langage intérieur est un langage sollicité quotidiennement dans des activités cognitives diverses mais il en fait un outil d'étude qu'il objective par des mesures des mouvements imperceptibles de langue et de gorge (Sokolov, 1972). Le langage intérieur découle du langage privé ou égocentrique (qui peut être prononcé à voix haute) utilisé par les jeunes enfants préscolaires lorsqu'ils se parlent à eux-mêmes au cours de leurs différentes activités, afin de diriger leur propre pensée et leurs comportements. Le langage égocentrique est un langage qui n'est pas adressé à un auditeur autre que l'enfant lui-même et qui n'attend pas de réponse. Il présente ainsi une fonction d'autorégulation plutôt qu'une fonction de communication (Lidstone, Meins, & Fernyhough, 2010). Il va ensuite évoluer vers des chuchotements puis de simples mouvements de lèvres, et finir par s'intérioriser totalement en langage intérieur (Kohlberg, Yaeger, & Hjertholm, 1968 ; Lidstone, Meins, & Fernyhough, 2011 ; Piaget, 1926).

La technique de suppression articulatoire est actuellement la méthode la plus utilisée pour étudier le rôle du langage intérieur, notamment dans les tâches de flexibilité (Baddeley, Chincotta, & Adlam, 2001 ; Bryck & Mayr, 2005 ; Cinan & Tanor, 2002 ; Dunbar & Sussman, 1995 ; Emerson & Miyake, 2003 ; Goschke, 2000 ; Kray, Eber, & Lindenberger, 2004 ; Miyake, Emerson, Padilla, & Ahn, 2004 ; Saeki, Saito, & Kawaguchi, 2006). La suppression articulatoire vise à empêcher les sujets de verbaliser leur raisonnement en leur faisant répéter à haute voix des séquences de mots ou de lettres déconcertantes telles que « A, B, C, A, B, C, ... »¹. En empêchant les participants de verbaliser les tâches à effectuer et de mettre à jour correctement en mémoire de travail les règles appropriées aux tâches, cette méthode permet d'évaluer l'implication du langage intérieur dans la flexibilité en comparant les résultats obtenus à ceux pour lesquels les participants peuvent verbaliser leur raisonnement librement. Ainsi, le recours à la suppression articulatoire va se chevaucher temporellement avec les processus de production de la parole, ce qui va entraver l'utilisation du langage

¹ Dans ces différentes études, les participants devaient par exemple réciter à haute voix les jours de la semaine ou les mois de l'année (Baddeley, Chincotta, & Adlam, 2001), alterner les jours "Tuesday" et "Thursday" (Miyake, Emerson, Padilla, & Ahn, 2004), répéter "a, b, c" sur le rythme d'un métronome (Emerson & Miyake, 2003), ou le mot "the" (Bryck & Mayr, 2005 ; Dunbar & Sussman, 1995).

intérieur (Saito, 1997). Un second effet de la suppression articulatoire est d'empêcher l'information visuelle d'être recodée par un format phonologique (Baddeley & Hitch, 1974). On retrouve cet effet par exemple dans la tâche d'Emerson et Miyake (2003) dans laquelle les participants doivent effectuer des opérations indiquées sur une feuille de papier en indiquant la réponse à côté de chaque calcul tout en répétant à haute voix « *a, b, c* ». De ce fait, le recours à la répétition mentale, qui aurait été utile afin d'associer un calcul aux symboles visuels, est entravé par l'utilisation de la suppression articulatoire (Saito, 1997). Pour étudier le rôle de l'articulation dans des tâches d'apprentissage et afin de minimiser l'articulation des sujets, la suppression articulatoire, aussi peu naturelle qu'elle semble l'être, a succédé à d'autres techniques encore plus surprenantes telles que le placement d'une lame en bois ou d'un crayon entre les dents (Barlow, 1928 ; Underwood, 1964), le placement de la langue des participants entre leurs dents (Colvin & Myers, 1909 ; Gumenik, 1969), ou encore la tentative de faire traiter des stimuli sur un plan purement visuel en demandant aux participants d'essayer de ne pas verbaliser la tâche à effectuer (Mould, Treadwell, & Washburn, 1915).

La méthode classique de suppression articulatoire (répéter des séquences de mots à haute voix) présente toutefois un problème majeur puisque le fait d'empêcher les sujets de verbaliser correctement leur raisonnement entraîne une interférence avec la réalisation de la tâche demandée. Comment savoir alors si les effets observés sont effectivement dus au fait de ne pas pouvoir verbaliser librement ou alors simplement dus au fait d'utiliser des ressources cognitives supplémentaires pour effectuer les tâches ? D'autre part, l'aspect négatif de cette méthode (liée à l'idée de *supprimer* le langage intérieur) ne permet pas d'être informé correctement sur le rôle du langage et de connaître dans quelle mesure celui-ci va être sollicité par les participants pour s'aider à réaliser la tâche. Cette méthode n'offre au final que la possibilité de connaître les effets négatifs provoqués par la non-utilisation du langage intérieur mais elle ne permet pas d'évaluer pleinement dans quelle mesure et à quelle fréquence les participants vont solliciter le langage pour effectuer les tâches d'alternance. Nous développerons plus loin une méthode d'aspect plus positif consistant à mesurer le langage intérieur.

1. Le tracé électromyographique, reflet du langage intérieur

Les premières recherches sur le langage intérieur utilisant l'électromyographie remontent au début du 20^{ème} siècle (Jacobson, 1932). Contrairement aux autres méthodes, cette technique est la seule qui permette de mesurer le langage intérieur sans interférer avec la

tâche. L'électromyographie (EMG) mesure les impulsions électriques des muscles au repos et lors de la contraction à l'aide d'électrodes fixées sur la peau. Le signal électromyographique enregistré permet d'observer des trains de langage avec une résolution temporelle très fine même lorsque le langage est intériorisé (Garrity, 1975a, 1975b, 1977 ; Hardyck & Petrinovich, 1970 ; Sokolov, 1972). Sokolov a par exemple montré qu'il existait une activité électrique détectable des muscles impliqués dans les processus de verbalisation lors de la réalisation du test des matrices de Raven même si les participants déclaraient avoir résolu les problèmes de manière uniquement visuelle, et en dépit du fait que ce test a été conçu pour estimer l'intelligence non verbale. Plus intéressant encore, la sollicitation du langage intérieur pour réaliser la tâche augmentait avec la difficulté des matrices (Sokolov, 1972). D'autres travaux ont confirmé plus tard qu'une activité électrique des muscles laryngés peut être détectable avec ou sans mouvement du visage ou de la bouche, et en présence ou non de sons émis (Betts, Binsted, & Jorgensen, 2006 ; Jou, Schultz, Walliczek, Kraft, & Waibel, 2006 ; Schultz & Wand, 2010). Cette technique a ainsi permis de mettre en avant une activité électrique des muscles lors de l'utilisation du langage intérieur par rapport à une ligne de base au repos (Locke, 1970 ; McGuigan, 1970). On trouve même des essais d'analyse des phonèmes prononcés intérieurement grâce à des techniques avancées d'analyse du signal (Binsted & Jorgensen, 2006 ; Jorgensen, Lee, & Agabon, 2003). Deux types d'électrodes sont principalement utilisés pour enregistrer l'activité myoélectrique. Des aiguilles intramusculaires peuvent être insérées dans le muscle, mais cette technique invasive peut s'avérer douloureuse pour le sujet. Une technique plus récente est l'électromyographie de surface (EMGS) qui consiste à placer les électrodes directement sur la surface de la peau du sujet, au dessus des muscles concernés².

Les zones d'applications des électrodes pour étudier le langage intérieur varient d'une étude à l'autre mais les zones du menton, des lèvres (muscles orbiculaires), des mandibules (muscle temporal), du larynx et de chaque côté du cartilage thyroïdien sont les plus concernées par l'électromyographie de surface (Cole & Young, 1975 ; Garrity, 1975a ; Garrity & Donoghue, 1977 ; Hardyck & Petrinovich, 1970). Néanmoins, d'autres zones ont été utilisées avec des électrodes aiguilles telles que le bout de la langue (Jacobson, 1932), le

² Cette technique non invasive est de plus en plus utilisée mais le signal obtenu reste toutefois assez sensible aux interférences telles que celles générées par des phénomènes de surface comme la transpiration ou l'adiposité. Une amplification trop faible peut entraîner des problèmes de détection du signal, un filtrage trop fort peut supprimer des données importantes du signal. D'autres facteurs sont également susceptibles d'influer sur l'enregistrement, tels que la distance entre les électrodes ou la durée d'enregistrement. Le signal EMG, comme de nombreux signaux électrophysiologiques, doit être amplifié et traité en éliminant notamment les bruits de basse ou de haute fréquence ou tout autre facteur pouvant influencer sur la « lisibilité » des données.

front (Smith, Malmö, & Shagass, 1954), le muscle crico-aryténoïdien postérieur (un des muscles du larynx), le muscle mylo-hyoïdien (Edfeldt, 1960 ; Faaborg-Andersen & Edfeldt, 1958).

Ces différentes méthodes ont permis d'étudier le langage intérieur en lui-même mais aussi et surtout son implication dans différentes fonctions cérébrales, notamment dans la lecture, l'intelligence et la mémoire à court terme. A ce jour, aucune recherche utilisant l'électromyographie ne s'est intéressée au rôle du langage intérieur dans la flexibilité, et les études utilisant l'électromyographie de surface pour étudier la mémoire à court terme sont relativement rares. C'est pourquoi nous avons décidé de recourir à l'électromyographie de surface afin d'étudier de façon plus naturelle (sans contrainte imposée aux participants) l'utilisation du langage intérieur dans des tâches de flexibilité mentale mais également dans des tâches d'empan mnésique afin d'étudier plus précisément l'implication de la boucle phonologique dans la mémoire à court terme.

2. Physiologie et anatomie du langage

Deux zones cérébrales majeures situées dans l'hémisphère gauche sont impliquées dans la compréhension et la production du langage. Il s'agit des aires de Wernicke et de Broca (Figure 1).

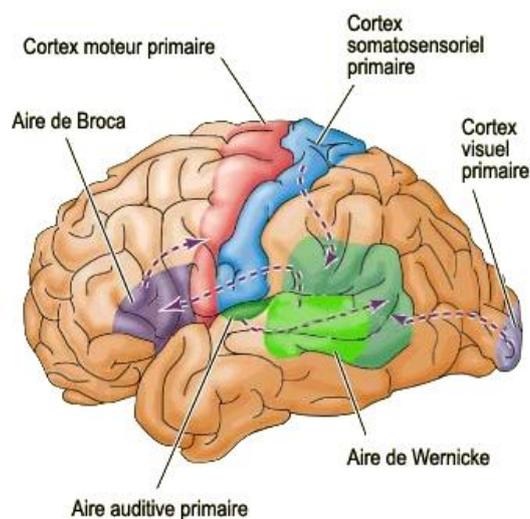


Figure 1 : Aires cérébrales impliquées dans la compréhension et la production de la parole - <http://lecerveau.mcgill.ca/>

L'aire de Wernicke (aires 22, 37 et 42 de Brodmann), située dans la partie postérieure du gyrus temporal supérieur, proche du cortex auditif primaire, intervient dans la compréhension du langage parlé et écrit. L'aire de Broca (aires 44 et 45 de Brodmann) est quant à elle constituée des parties operculaire (*pars opercularis-P-*) et triangulaire (*pars triangularis-T-*) du gyrus frontal inférieur gauche, et correspond à la zone de production de la parole. Ces deux zones cérébrales sont reliées entre elles par un ensemble de fibres nerveuses appelé faisceau arqué et sont également connectées à de nombreuses autres zones impliquées dans la compréhension et la production du langage telles que le cortex moteur primaire ou encore le cortex visuel primaire. L'aire motrice de Broca, chargée de la production de la parole, transmet les informations au cortex moteur primaire (zones concernées de l'homonculus) qui initie alors des signaux nerveux destinés aux muscles impliqués dans le langage (Aboitiz & Garcia, 1997 ; Keller, Crow, Foundas, Amunts, & Roberts, 2009).

2.1. La transmission neuromusculaire

L'enregistrement électromyographique consiste à enregistrer les courants électriques qui parcourent les muscles squelettiques striés lors de leur contraction. Les muscles squelettiques prennent leurs insertions sur deux os qui, lors de la contraction musculaire, vont se rapprocher. Ces muscles sont sous le contrôle volontaire du système nerveux central et sont constitués de plusieurs faisceaux musculaires, eux-mêmes composés d'un motoneurone et de fibres que ce dernier innerve. Cet ensemble, motoneurone et fibres musculaires, est regroupé sous le terme d'unité motrice (Ader & Carré, 2006). La quantité de faisceaux dans un muscle varie selon la taille et la finesse de l'action effectuée. Plus l'action d'un muscle est précise, fine, délicate (dextérité manuelle, oculomotricité par exemple), moins il comportera de faisceaux. De plus, l'intensité de la contraction musculaire est proportionnelle à la quantité d'unités motrices mises en jeu. Le motoneurone de l'unité motrice comporte plusieurs terminaisons, chacune innervant une fibre musculaire au niveau de la jonction dite neuromusculaire. La plaque motrice, accolée à la fibre musculaire et formée de plusieurs replis, est la zone qui reçoit la terminaison nerveuse du motoneurone. La contraction musculaire survient à la suite d'une excitation nerveuse. Le potentiel d'action des fibres squelettiques naît dans la partie médiane de la cellule, au niveau de la jonction neuromusculaire, et se propage ensuite vers les deux extrémités de la fibre. C'est une partie de la variation du champ électromagnétique passant au travers des liquides extracellulaires de la peau que l'on enregistre à l'aide des électrodes de surface et qui constitue le signal

électromyographique. Précisons ici que ce signal ne correspond pas à une mesure directe de la contraction d'une seule fibre mais à l'ensemble des champs électromagnétiques issus des phénomènes impliqués dans la contraction et détectables à la surface de la peau (Tassinary, Cacioppo, & Vanman, 2007). Il est important de noter que l'amplitude du potentiel d'action obtenu sur l'intégralité d'un muscle est proportionnelle à l'intensité de la stimulation.

2.2. L'appareil phonatoire

La phonation est possible grâce à un ensemble d'organes appelé appareil phonatoire. Celui-ci est constitué de plusieurs éléments que sont les fosses nasales, les cavités buccale et labiale, le pharynx, les cavités supra-glottales, les cordes vocales (recouvertes par une muqueuse), le larynx et enfin l'appareil respiratoire³. Le larynx est entouré de nombreux muscles qui vont permettre de moduler la tension des cordes vocales. Les muscles du larynx sont classés en deux groupes de muscles, les muscles extrinsèques et les muscles intrinsèques. Les premiers relient le larynx aux structures voisines et sont responsables du déplacement vertical de celui-ci pendant la phonation et la déglutition. Les seconds relient les cartilages laryngés afin d'assurer leur mobilité et sont responsables de la constriction et de la dilatation de la glotte ainsi que de la tension des cordes vocales.

Les muscles extrinsèques (Figure 2), situés sur la face antérieure du larynx, sont eux-mêmes répartis en deux groupes, les muscles sus-hyoïdiens comprenant les muscles géno-hyoïdiens, stylo-hyoïdien, mylo-hyoïdien et digastrique, et les muscles sous-hyoïdiens composés des muscles thyro-hyoïdien, omo-hyoïdien et sterno-hyoïdien. Ils interviennent entre autres dans les mouvements de la mandibule, de l'os hyoïde et du larynx.

³ La vibration des cordes vocales dans le larynx est permise grâce à l'augmentation de la pression de l'air expiré. Le larynx, qui abrite les cordes vocales et fait la jonction entre le pharynx et la trachée, est un conduit rigide constitué de différentes structures ostéo-cartilagineuses et ligamentaires dont notamment l'os hyoïde, le cartilage thyroïde (pomme d'Adam) et les cordes vocales.

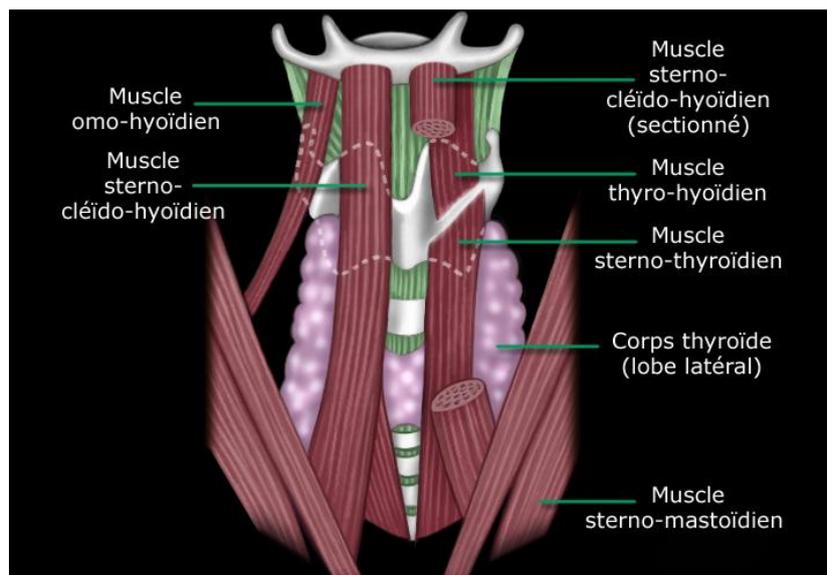


Figure 2 : Muscles sous-hyoïdiens - Université catholique de Louvain
<http://www.md.ucl.ac.be/didac/med2308/2.htm>

Les muscles intrinsèques (Figure 3) sont multiples, avec les muscles crico-aryténoïdiens (postérieurs et latéraux), les muscles ary-aryténoïdien (transverse et oblique) également appelés muscles inter-aryténoïdien, les muscles crico-thyroïdiens (composés de deux faisceaux, droits et obliques), les muscles thyro-aryténoïdiens (faisceau thyro-vocal et faisceau ary-vocal). Ces derniers, associés aux ligaments vocaux et à la muqueuse, composent les cordes vocales. Les muscles intrinsèques sont tous situés sur la face postérieure du larynx, excepté les deux crico-aryténoïdiens qui sont localisés sur la face antérieure du larynx.

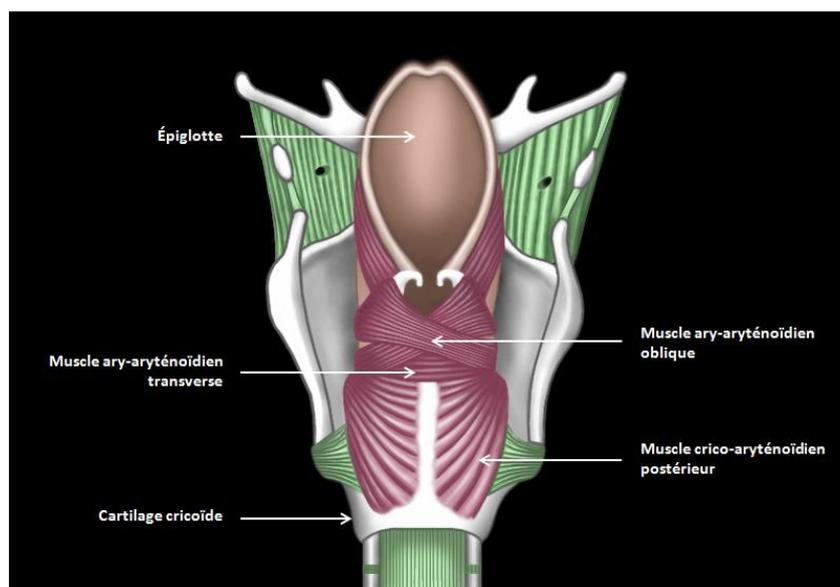


Figure 3 : Muscles intrinsèques du larynx (vue postérieure) – Université catholique de Louvain
<http://www.md.ucl.ac.be/didac/med2308/2.htm>

Les électrodes, placées de part et d'autre du larynx, permettent ainsi d'enregistrer l'activité de plusieurs groupes de muscles impliqués dans le langage par des mouvements du larynx, de la mandibule et des cordes vocales. Nous présentons dans la partie suivante une courte expérimentation mise en place afin d'évaluer la pertinence de l'électromyographie de surface.

3. Méthodologie de l'électromyographie laryngée de surface : étude préliminaire - Expérience 1

Afin d'évaluer l'électromyographie de surface comme méthode d'investigation du langage intérieur, nous avons mis en place une courte expérience dans laquelle les participants devaient solliciter le langage de façon plus ou moins extériorisée. Chaque participant recevait les consignes de lire les lettres de l'alphabet de façon totalement intériorisée, de façon intériorisée mais forcée, en murmurant, puis à haute voix.

3.1. Matériel et méthode

Participants

Pour cette étude préliminaire, cinquante-trois étudiants en psychologie à l'Université de Franche-Comté ont été recrutés ($M = 21.3$; $ET = 3.1$; 14 hommes et 39 femmes) en échange d'un certificat de passation d'expérience donnant lieu à une équivalence de crédits de cours.

Méthode

Cette tâche a été élaborée et exécutée à l'aide du logiciel E-Prime2® (Psychology Software Tools, Inc.) sur un ordinateur portable. L'expérience était divisée en cinq conditions correspondant à cinq niveaux d'extériorisation du langage : aucun langage intérieur, langage intérieur, langage intérieur forcé, murmure et haute voix. Dans la condition sans langage intérieur, les participants devaient s'efforcer autant que possible de ne pas recourir au langage intérieur en fixant simplement un point au centre de l'écran pendant quelques secondes. Dans la condition de langage intérieur, les participants devaient lire les lettres de l'alphabet de la même façon qu'ils lisent habituellement un livre (aucun son et aucun mouvement des lèvres). Dans la condition de langage intérieur forcé, les participants devaient crier intérieurement les lettres de l'alphabet. Dans la condition de murmure, ils devaient murmurer les lettres afin

qu'une personne située à côté d'eux puisse les entendre et enfin, dans la dernière condition, les sujets devaient simplement lire les lettres à haute voix.

Le logiciel E-Prime a été synchronisé avec un enregistreur électromyographique (EMG 100 C, Biopac®) fonctionnant avec le logiciel AcqKnowledge 4.1. Les électrodes utilisées dans cette expérience (EL503, BIOPAC®) étaient des électrodes de référence de type chlorure d'argent (Ag-AgCl), mesurant un centimètre de diamètre (3.5 cm avec la surface autocollante).



Figure 4 : Dispositif électromyographique

Chaque participant a été placé à 40 cm d'un écran d'ordinateur dans une salle calme en présence de l'expérimentateur (Figure 4). Deux paires d'électrodes placées l'une en dessous de l'autre et espacées d'environ 4 cm verticalement et 4 cm horizontalement (2 cm de part et d'autre de la ligne médiane verticale) ont été appliquées au niveau des muscles laryngés afin d'enregistrer deux voies de signal (Figure 5). Notre choix s'est porté sur cette zone afin de limiter les artefacts liés aux mouvements buccaux involontaires (pincement et humidification des lèvres par exemple) que nous aurions mesurés si nous avions placé les électrodes à cet endroit. L'électrode de masse a été placée sur le poignet droit de chaque sujet. Les zones ont été préalablement nettoyées à l'alcool. Un temps minimal de cinq minutes a été laissé entre le temps où les électrodes ont été positionnées sur le sujet et le début de l'expérience afin d'obtenir une conduction optimale.

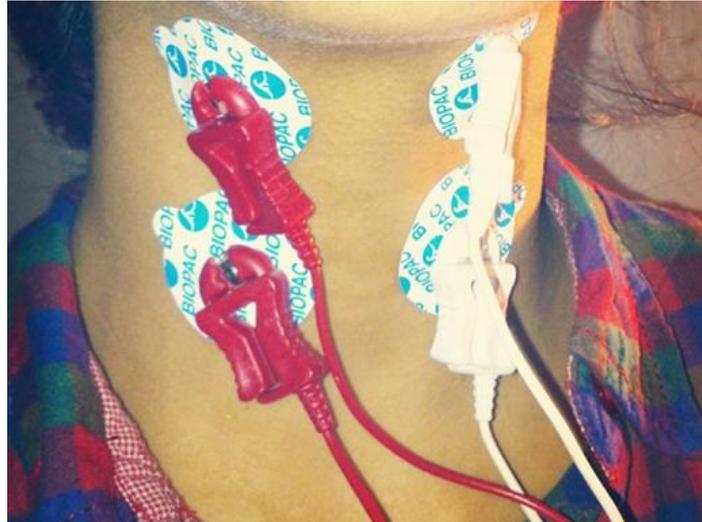


Figure 5 : Placement des électrodes au niveau laryngé

Procédure

Avant le début de chacune des conditions, les consignes étaient clairement explicitées à l'écran. L'expérimentateur donnait également un exemple pour chaque condition. Dans la condition sans langage intérieur, les participants devaient simplement fixer pendant dix secondes un point noir à l'écran et éviter ainsi de recourir au langage intérieur. Dans les quatre autres conditions, les lettres apparaissaient dans un ordre aléatoire afin que les participants ne puissent pas prédire l'ordre des lettres et donc anticiper sur l'utilisation du langage. Chaque lettre restait affichée à l'écran 750 ms avec une pause de 1000 ms entre chacune. Ces temps étaient assez brefs dans l'objectif d'éviter toute autre utilisation du langage intérieur entre chaque lettre (Figure 6).

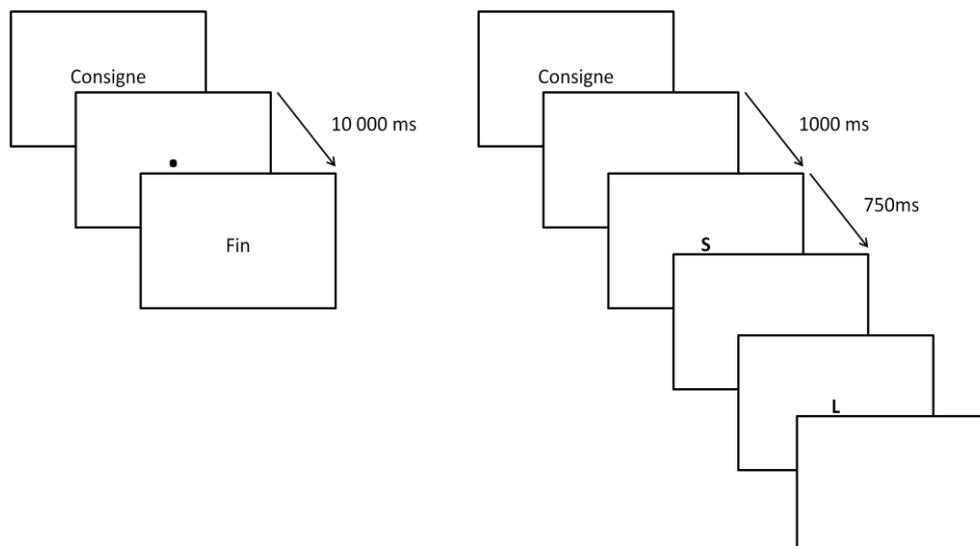


Figure 6 : Déroulement de la tâche de lecture alphabétique

Traitement des données électromyographiques

Afin de quantifier le discours intérieur, nous avons réalisé une série de traitements et de calculs sur les signaux EMG (échantillonnés à 1000 Hz – théorème de Shannon Nyquist) enregistrés au cours de l'expérience. Tout d'abord, à partir des signaux bruts, nous avons utilisé un filtre réjecteur de bande (filtre *comb band stop* ; fréquence = 50 Hz) afin d'éliminer le bruit du réseau électrique ainsi qu'un filtre passe haut (filtre *high-pass*) avec une fréquence de coupure de 30 Hz afin d'enlever les possibles artefacts du rythme cardiaque (Willigenburg, Daffertshofer, Kingma, & van Dieën, 2012). Enfin, nous avons calculé la valeur efficace (*Root Mean Square* – RMS) sur une fenêtre glissante de 30 ms sur chacun des deux signaux (Figure 7) tout en supprimant la ligne de base (*offset*).

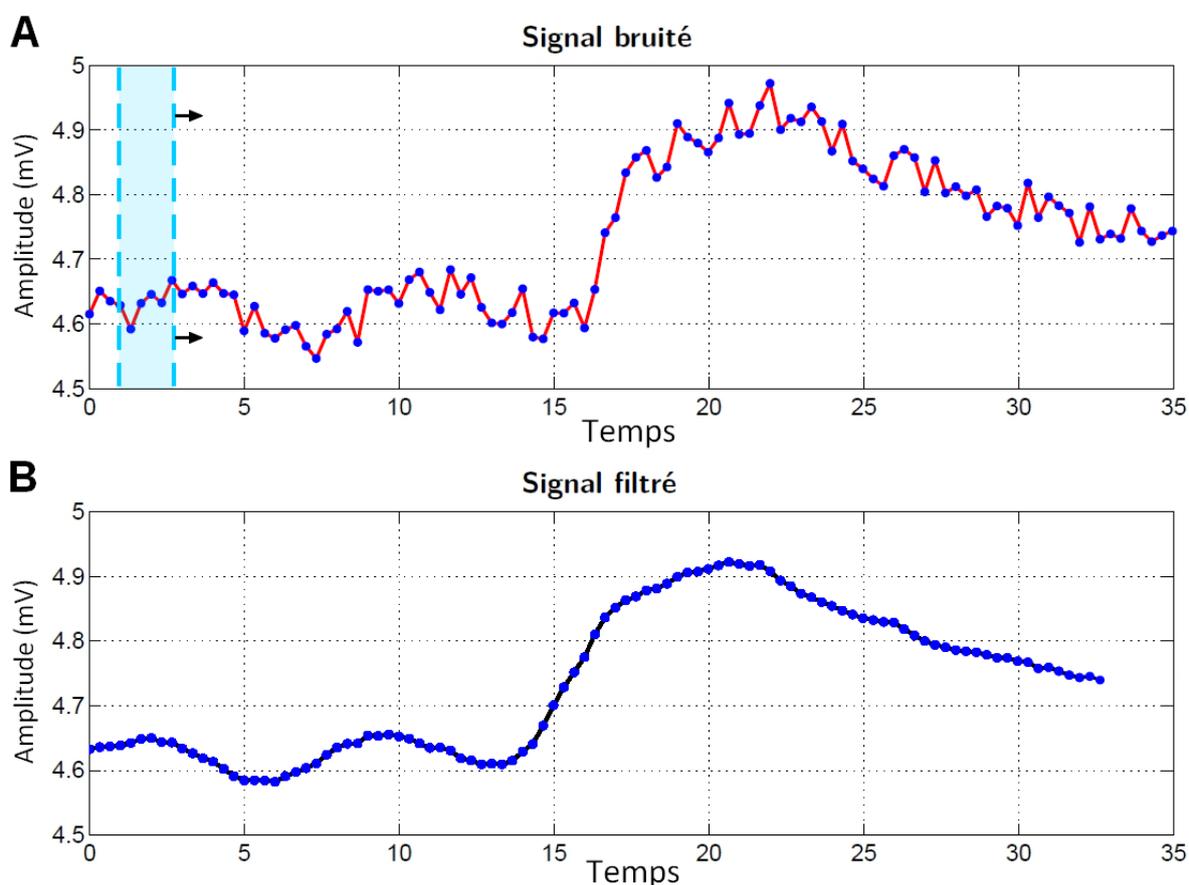


Figure 7 : Représentation schématique du calcul de la valeur efficace (Communication personnelle – Patrice Andrieu) ; A : Une fenêtre glissante de 30 ms se déplace le long du signal brut en se décalant de 1 ms à chaque mesure. B : La valeur moyenne de chaque mesure (chaque fenêtre) est calculée et représente le nouveau signal.

Après l'intégration des deux signaux RMS-EMG en utilisant la méthode des trapèzes, nous avons moyenné nos données provenant des deux voies électromyographiques pour obtenir une seule valeur intégrée EMG. Nous avons ensuite utilisé ce signal afin de refléter la quantité de langage intérieur produite. La méthode trapézoïdale consiste à calculer l'aire de chaque trapèze se situant sous le signal (Figure 8).

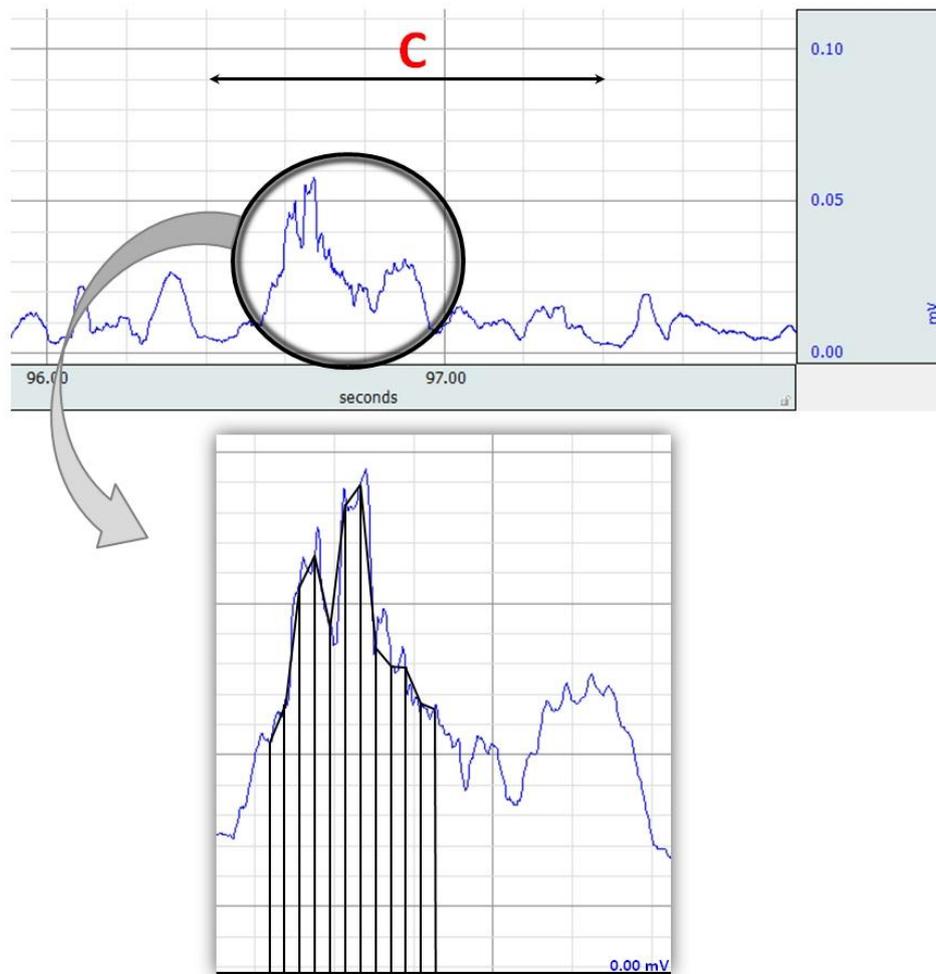


Figure 8 : Représentation schématique de l'intégration du signal par la méthode des trapèzes

Basée sur la fréquence d'échantillonnage, la durée de chaque trapèze est de 1 ms, ce qui permet ainsi d'avoir une reconstitution très similaire du signal réel. Nous avons ensuite utilisé ce signal afin de refléter la quantité de discours intérieur produite, exprimée en mV.ms. Nous définissons ainsi la « quantité de langage intérieur (QL) produite sur une période » par l'intégrale⁴ du signal traité sur l'intervalle considéré.

⁴ Dans le cas du calcul de la valeur efficace ou de la quantité de langage intérieur, la méthode des trapèzes a été utilisée pour le calcul numérique des intégrales.

Un exemple de chaque niveau de traitement d'une des voies électromyographiques enregistrées est visible dans la figure suivante :

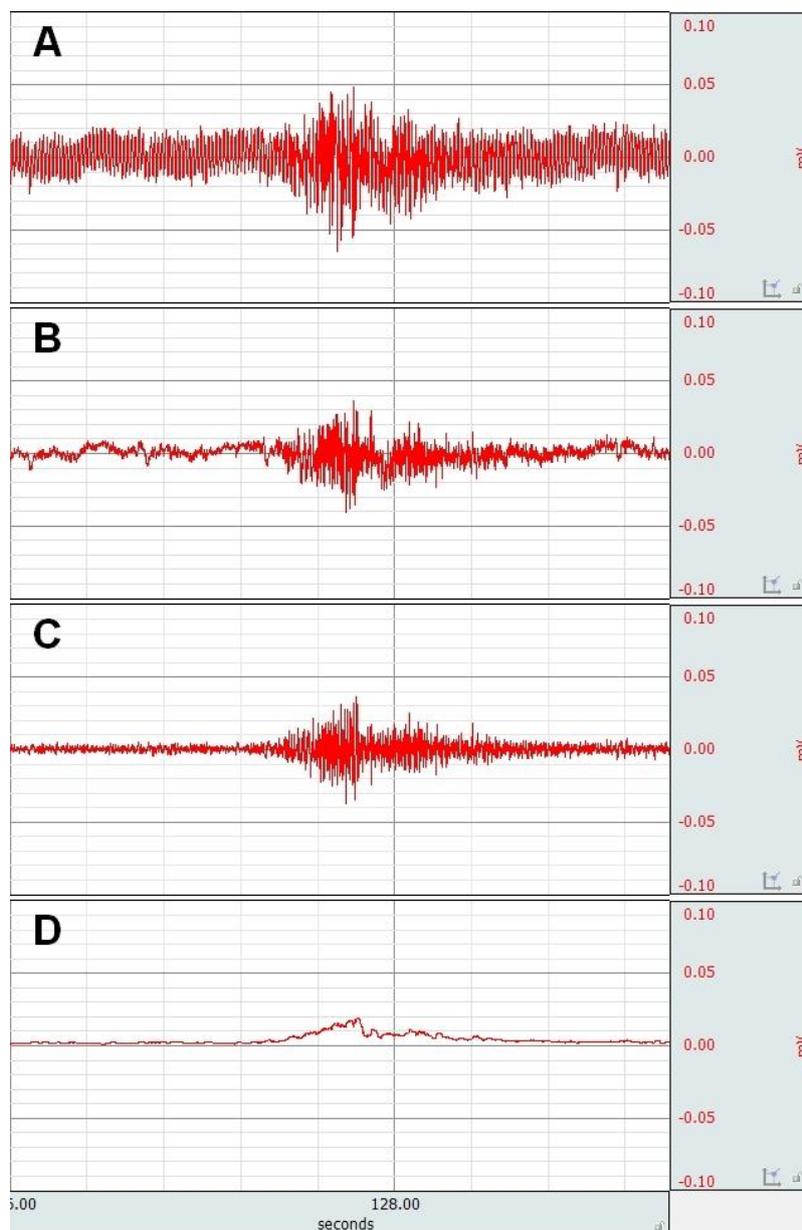


Figure 9 : Traitement électromyographique ; A : signal brut ; B : signal après application du filtre réjecteur de bande à 50 Hz ; C : signal après application du filtre passe haut de 30 Hz ; D : signal après application de la fenêtre glissante sur laquelle nous calculons la valeur efficace du signal.

3.2. Résultats

L'analyse de variance à mesures répétées effectuée sur des données agrégées montre une augmentation significative de la quantité de langage intérieur (QL) avec le niveau d'extériorisation des lettres, $F(4,208) = 89.5$, $p < .001$, $\eta^2_p = .63$ (Figure 11). Pour les cinq conditions, absence de langage intérieur, langage intérieur, langage intérieur forcé, murmure et haute voix, la quantité de langage intérieur moyenne est respectivement de 2.91 mV.ms

($ET = 0.87$), 3.21 mV.ms ($ET = 1.19$), 4.17 mV.ms ($ET = 1.82$), 5.57 mV.ms ($ET = 2.12$) et 6.13 mV.ms ($ET = 1.68$). Un exemple de chaque condition est visible dans la figure ci-dessous :

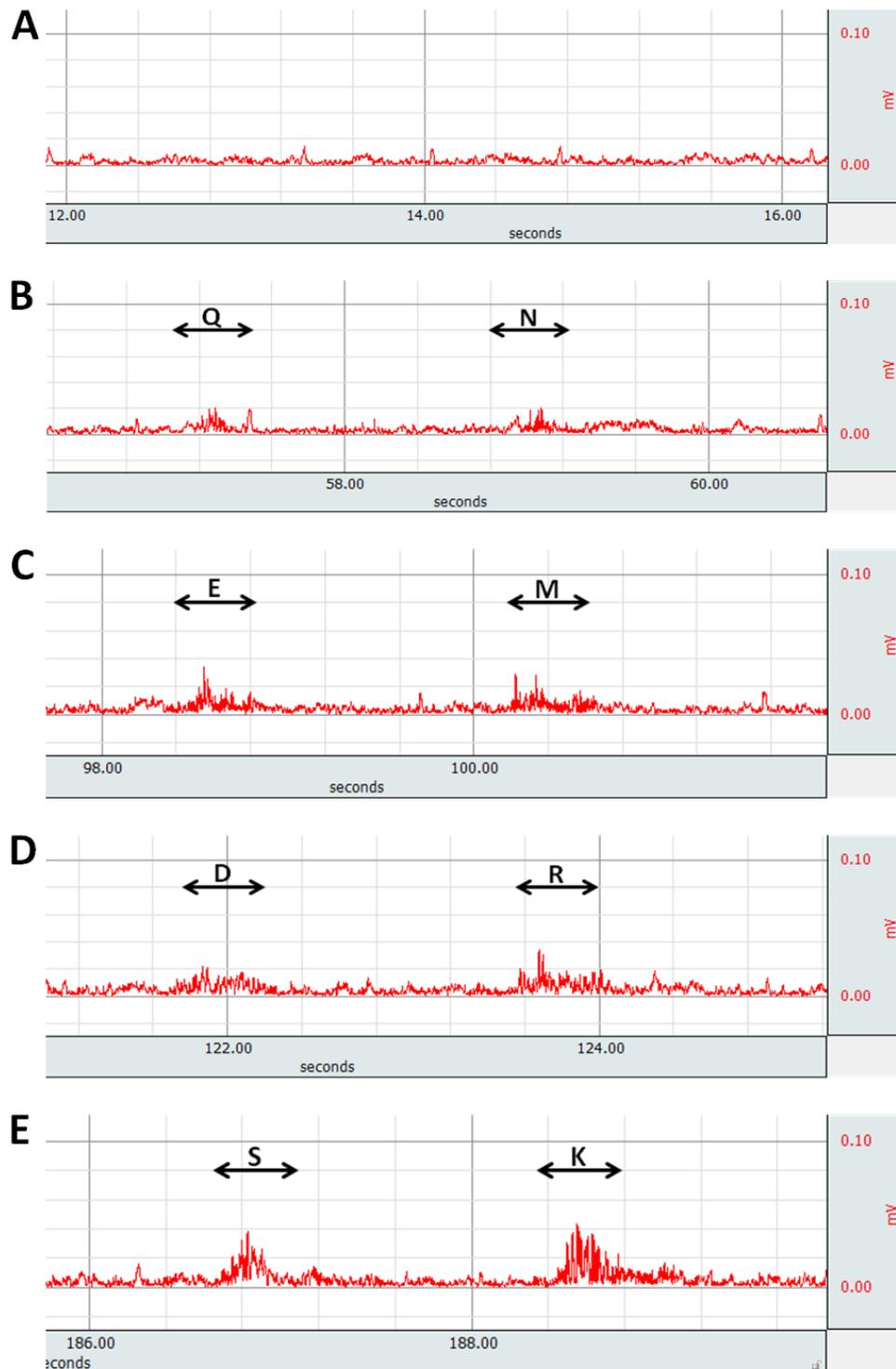


Figure 10 : Données électromyographiques obtenues dans les cinq conditions de l'expérience de lecture alphabétique. A : Absence de langage intérieur ; B : Langage intérieur ; C : Langage intérieur forcé ; D : Murmure ; E : Haute-voix

Les comparaisons par paire effectuées en utilisant la correction de Bonferroni indiquent une activité électrique supérieure lorsque les participants utilisent le langage intérieur par rapport à la condition dans laquelle il est demandé aux participants de ne pas recourir au langage ($p = .038$).

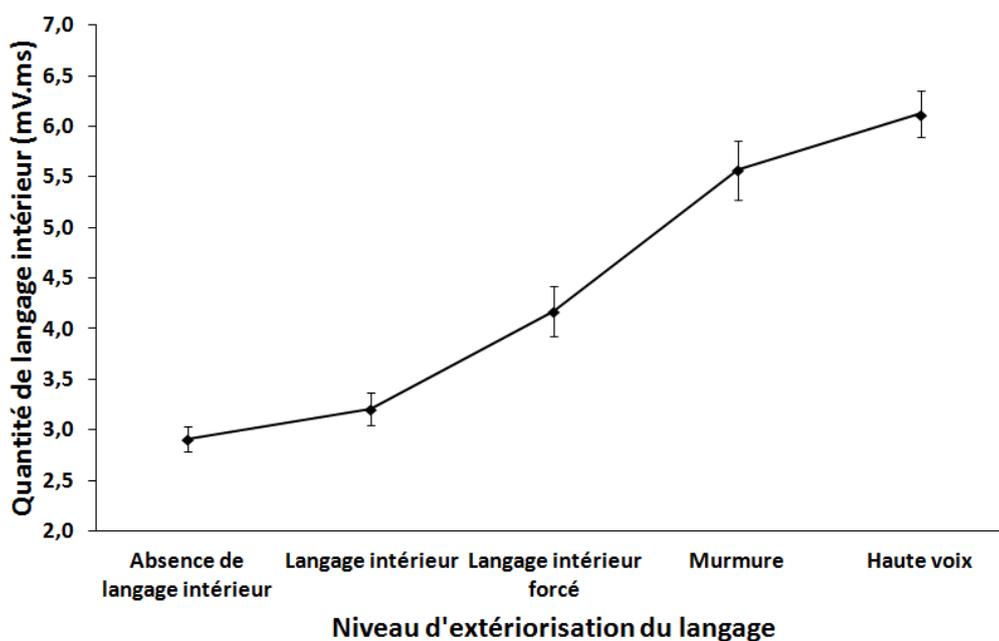


Figure 11 : Quantité moyenne de l'activité électrique des muscles laryngés (mV.ms) en fonction du niveau d'extériorisation du langage. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

3.3. Discussion / Conclusion

Cette étude préliminaire confirme que l'électromyographie de surface est un moyen efficace pour étudier le recours au langage intérieur puisque l'on observe une augmentation significative de l'amplitude électromyographique lorsque les participants parlent intérieurement par rapport à une condition de repos ne nécessitant pas la sollicitation du langage intérieur. Au vu de ces résultats, il est alors pertinent d'utiliser cette méthode pour étudier l'implication du langage intérieur dans diverses fonctions cérébrales, et notamment dans la flexibilité mentale et la mémoire à court terme. En effet, nous verrons dans les chapitres suivants que cette méthode nous a permis d'étudier l'implication du langage intérieur dans ces différentes fonctions de façon plus naturelle et de mettre au jour de nouvelles informations qu'il n'était pas possible d'obtenir avec d'autres méthodes plus classiques.

CHAPITRE 2 : LA FLEXIBILITE MENTALE

L'aptitude à assurer dans un même temps plusieurs tâches est une compétence qui intéresse autant la psychologie qu'elle intrigue le grand public⁵. La question de la capacité multitâche revient à poser deux questions : permet-elle d'effectuer plusieurs tâches de façon simultanée, ou alors d'alterner rapidement d'une tâche à l'autre ? Les travaux sur la période réfractaire psychologique (Maquestiaux & Didierjean, 2011), qui s'intéressent plutôt à la première question, semblent apporter un verdict assez sévère. En effet, malgré l'impression que tout un chacun peut parfois ressentir d'avoir la capacité d'être multitâche, il en résulte plutôt que l'attention se divise entre les tâches au prix d'un certain coût d'efficacité. À la manière des ordinateurs actuels, l'architecture cognitive semble privilégier un traitement séquentiel rapide donnant seulement l'illusion d'un traitement parallèle. Cependant, l'illusion ne survit pas à l'épreuve des faits expérimentaux : malgré l'effort cérébral fourni pour que le double traitement de l'information soit efficace, il ne l'est pas pour une très grande majorité des individus (Watson & Strayer, 2010). Répondre à la première question revient donc à répondre à la seconde, celle de l'alternance.

L'étude de l'alternance entre plusieurs tâches a progressivement revêtu le terme de flexibilité mentale. La flexibilité mentale intervient dans la sélection d'une réponse en fonction du contexte et de ce fait, il s'agit d'un processus qui dépend étroitement des capacités d'attention. Plus précisément, la capacité de flexibilité semble essentiellement reposer sur les capacités d'inhibition et de mise à jour d'informations en mémoire de travail (Arbuthnott & Frank, 2000 ; Blaye & Chevalier, 2011 ; Chevalier & Blaye, 2006, 2009 ; Diamond, 2006 ; Kirkham, Cruess, & Diamond, 2003 ; Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, & Howerter, 2000). Ce point de vue n'est pas contradictoire puisque la capacité de la mémoire de travail est de plus en plus théorisée comme reposant sur les processus attentionnels (Engle, 2002 ; Erickson, 2008 ; Kane, Hambrick, Tuholski, Wilhelm, Payne, & Engle, 2004 ; Miyake & Shah, 1999 ; Salthouse, 2005). L'inhibition permet de bloquer les réponses qui ne sont plus pertinentes pour une tâche et la mise à jour permet de se focaliser sur de nouvelles réponses à adopter. La reconfiguration mentale est le terme approprié qui regroupe l'inhibition et la mise à jour. Nous adoptons ici le point de vue qu'il est utile et pertinent de représenter ces mécanismes élémentaires sous forme d'arbres de décision (Figure 12) : la mise à jour d'informations consiste à choisir un embranchement, l'inhibition consiste à ne pas suivre un

⁵ Top Multitaskers Help Explain How Brain Juggles Thoughts, Scientific American Mind, March/April 20, <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=supertaskers-and-the-multitasking-brain>

embranchement, le maintien de l'attention consiste à poursuivre sur l'embranchement choisi et la planification fait référence à la construction de nouveaux embranchements. Enfin, les conséquences d'un raisonnement ou les résultats d'une action constituent les feuilles de l'arbre. La flexibilité se résume finalement à naviguer dans un arbre de décision en fonction des informations fournies par l'environnement.

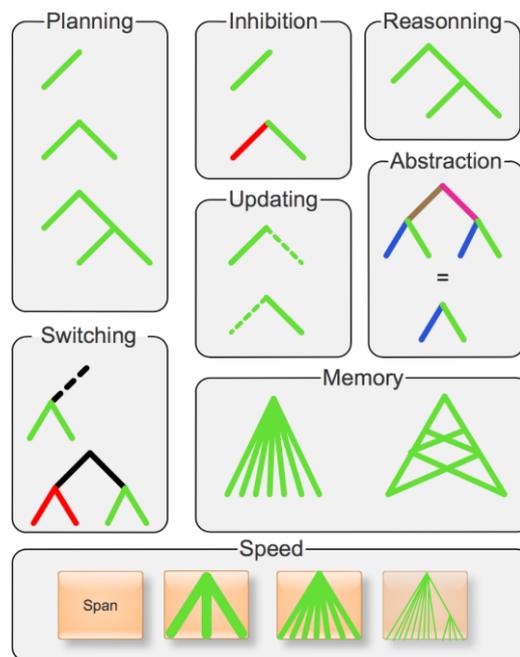


Figure 12 : Arbres de décision représentant les mécanismes élémentaires intervenant dans la flexibilité mentale (Fabien Mathy, communication personnelle)

Ces arbres seront utilisés pour représenter les tâches de flexibilité catégorielle que nous développerons en détail par la suite. Ils permettent de décrire le type de reconfiguration mentale requis pour l'application de différentes règles dans différents contextes. Nous allons commencer par résumer brièvement le développement de la flexibilité mentale d'un point de vue comportemental et neuro-anatomique, puis nous aborderons les méthodes d'investigation de la flexibilité chez l'adulte. Enfin, nous présenterons la tâche d'alternance catégorielle que nous avons élaborée ainsi que nos résultats qui tendent à montrer l'implication du langage intérieur dans l'encodage et dans l'utilisation des informations permettant une reconfiguration mentale optimale.

1. Développement anatomique et comportemental

Les travaux menés sur le développement des fonctions exécutives s'accordent sur le fait que celui-ci s'étend sur une période relativement longue depuis la jeune enfance jusqu'à

l'adolescence (Chevalier, 2010 ; Zelazo, Carlson, & Kezek, 2008) et qu'il dépend essentiellement de facteurs génétiques (Friedman, Miyake, Young, DeFries, Corley, & Hewitt, 2008). Dès 8 mois, les enfants sont par exemple capables de réaliser un détour pour atteindre un objet lorsqu'une barrière opaque ou transparente les sépare de celui-ci. Ce détour implique de garder à l'esprit un objectif à atteindre, de planifier la stratégie à adopter mais aussi d'inhiber le désir d'aller directement au but (Diamond, 2006). On retrouve à cette période charnière de 8-9 mois chez l'enfant un développement critique du cortex préfrontal (Zelazo, Carlon, & Kezek, 2008). Il se déroule ensuite une période critique vers 4 ans qui correspond à un développement important des capacités d'inhibition et de flexibilité qui se répercute sur des tâches cognitives telles que celles mesurées par le DCCS (*Dimensional Change Card Sort* ; Chevalier & Blaye, 2006 ; Frye, Zelazo, & Palfai, 1995 ; Perner & Lang, 2002) ou le Stroop (Nichelli, Scala, Vago, Riva, & Bulgheroni, 2005 ; Stroop, 1935). Le développement du cortex préfrontal présente en effet un pic de densité synaptique vers 4 ans et l'on observe ensuite jusqu'à l'adolescence une élimination synaptique progressive favorisant l'efficacité des réseaux neuronaux. Celle-ci s'accompagne notamment d'un accroissement de la vitesse de traitement et des capacités en mémoire de travail (Case, 1992 ; Espy, Kaufmann, Glisky, & McDiarmid, 2001 ; Huttenlocher & Dabholkar, 1997 ; Salthouse, 2005 ; Salthouse, Fristoe, McGuthry, & Hambrick, 1998). Nous laissons le lecteur se référer à l'article de Chevalier et Blaye (2006), qui donne une description détaillée du développement de la flexibilité cognitive chez l'enfant préscolaire.

L'évaluation des fonctions exécutives à l'âge préscolaire est importante au regard des troubles susceptibles de se manifester. Par exemple, il existe de nombreuses tâches de contrôle de l'impulsivité (répertoriées dans Carlson, 2005) comme la *Whisper task* (dire des noms d'animaux ou de héros sans s'exclamer à la reconnaissance de certains particulièrement appréciés), le *Simon says* (Jacques-a-dit), le *Pinball* (le sujet doit attendre le signal pour lâcher la balle dans le flipper). On retrouve entre autres le TRAILS-P (2-6 ans ; Espy & Cwik, 2004) qui a été mis en place pour remplacer le *Trail Making Test* (TMT, un test souvent utilisé chez l'adulte pour repérer les troubles dysexécutifs ; Tombaugh, 2004), le *Spatial Reversal* et le *Color Reversal* (l'enfant doit retrouver des récompenses cachées sous des tasses ; Espy, Kaufmann, Glisky, & McDiarmid, 2001), la *Meiran Switch task* (Smith, Taylor, Brammer, Toone, & Rubia, 2006), le DCCS (Frye, Zelazo, & Palfai, 1995 ; Gilbert & Shallice, 2002 ; Perner & Lang, 2002 ; Zelazo, Frye, & Raptus, 1996), une tâche paradigmatique que nous présenterons en détail ultérieurement en raison du lien étroit qu'elle entretient avec les tâches de flexibilité catégorielle que nous allons exposer. Gardons à l'esprit que le développement du

cortex préfrontal chez l'enfant est associé progressivement à un meilleur contrôle cognitif lui permettant une adaptation aux contraintes de l'environnement avec une meilleure maîtrise des comportements à risques mais aux dépens d'une moindre créativité puisque les comportements les moins adaptés sur le plan social sont progressivement réfrénés (Thompson-Schill, Ramscar, & Chrysikou, 2009).

2. Mesure de la flexibilité mentale

2.1. Une tâche historique : l'alternance mathématique

La flexibilité s'étudie grâce à des tâches d'alternance. Celles-ci ont pour objectif d'évaluer la capacité des sujets à réaliser une tâche puis de passer à une autre, et éventuellement de revenir à la première ou encore d'évaluer leur capacité à alterner entre les deux aléatoirement ou de façon régulière. Une tâche simple d'évaluation de la flexibilité consiste à étudier la capacité des sujets à réaliser séquentiellement deux tâches différentes. Par exemple, la tâche princeps d'alternance mathématique consiste à ajouter le chiffre 3 (tâche A) ou soustraire le chiffre 3 (tâche B) à différents nombres, et ce de façon alternée (ABABAB) ou répétée (AAABBB) (Jersild, 1927). Le principal résultat dans ce type de test est une augmentation du temps de réponse et parfois du nombre d'erreurs en cas d'alternance, en comparaison aux essais répétés. Des variantes à cette tâche ont été mises au point telles que *l'alternating runs paradigm* de Rogers et Monsell (1995) dans lequel on compare dans un même bloc les essais alternés et les essais répétés (AABBAABB). Malgré la possibilité d'améliorer la flexibilité mentale⁶, il demeure le plus souvent un coût résiduel qui peut s'expliquer à la fois par un effet d'inertie de la tâche précédente (qui produit une interférence proactive sur la tâche subséquente, Allport & Wylie, 2000 ; Gilbert & Shallice, 2002) et par l'effort opéré par le sujet pour se désengager de la tâche précédente (i.e., inhiber) et charger en mémoire les éléments de la seconde tâche (Meiran, 1996 ; Rogers & Monsell, 1995).

Dans ce type de tâche, deux mesures sont généralement étudiées : le coût d'alternance général (*general switch costs*, Reimers & Maylor, 2005) et le coût d'alternance spécifique

⁶ La difficulté à alterner peut être considérablement réduite dans certaines conditions. L'effet d'alternance est par exemple nettement diminué lorsque des indices préparent les sujets aux tâches. C'est le cas pour les listes univalentes dans lesquelles des stimuli différents sont associés à différentes tâches, au contraire des listes bivalentes pour lesquelles un même stimulus peut être catégorisé selon différentes règles selon les tâches, (Jersild, 1927), ou lorsqu'un indice relatif à la tâche est montré visuellement au sujet avant l'apparition du stimulus (Kray, 2006 ; Miyake, Emerson, Padilla, & Ahn, 2004). Le coût d'alternance est également diminué lorsque le temps de préparation avant la prochaine tâche est augmenté puisque cela laisse le temps aux participants d'aller chercher en mémoire de travail la règle à appliquer et d'inhiber la règle qui n'est plus appropriée (Gopher, Armony, & Greenspan, 2000 ; Kray, 2006 ; Monsell, 2003 ; Rogers & Monsell, 1995). Une pratique intensive des tâches d'alternance permet également de réduire le coût d'alternance (Strobach, Liepelt, Schubert, & Kiesel, 2012).

(*specific switch costs*, Reimers & Maylor, 2005). Le coût d’alternance général représente la différence entre les performances des blocs alternés (comprenant plusieurs tâches) et les performances des blocs contenant seulement une tâche. Cette mesure montre la difficulté à maintenir à l’esprit les différents types de réponses possibles et à les sélectionner en fonction des stimuli présentés. L’autre mesure fréquemment utilisée est le coût d’alternance spécifique qui représente la différence entre les performances des essais alternés et les performances des essais non alternés dans un bloc mixé (Figure 13). Ce type de coût met en avant la difficulté rencontrée par les sujets à alterner d’une réponse à l’autre (Reimers & Maylor, 2005 ; Müller, Zelazo, Hood, Leone, & Rohrer, 2004)⁷.

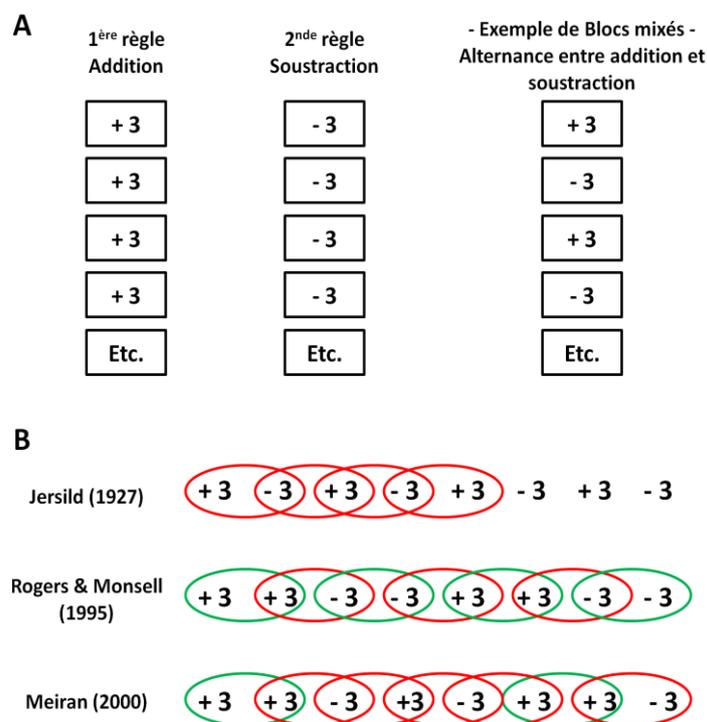


Figure 13 : A : Exemple d'une tâche d'alternance mathématique dans laquelle les sujets doivent d'abord ajouter le chiffre 3 à une première liste de nombres puis soustraire 3 aux nombres d'une seconde liste. Enfin, pour une troisième et dernière liste de nombres, les sujets doivent alterner entre addition et soustraction. B : Trois exemples de blocs mixés avec des essais uniquement alternés (Jersild, 1927), avec une alternance régulière d'essais répétés et alternés (Alternating runs paradigm, Rogers & Monsell, 1995) ou avec une présentation aléatoire d'essais répétés et alternés (Meiran, 2000)

⁷ Il est intéressant de noter qu'aucun coût d'alternance n'est observé lorsque les participants n'ont pas conscience de la présence de règles. En effet, les participants à qui l'on fait simplement apprendre la réponse de chaque stimulus sans évoquer l'existence de règles (ex. 3, 7, K et M = *Left* et 4, 8, A et E = *Right*) ne présentent pas de coût d'alternance à l'inverse des participants à qui l'on présente les règles de tri (ex. Pour la tâche 1, impair = *Left* et pair = *Right* et pour la tâche 2, consonne = *Left* et voyelle = *Right*). De plus, si le groupe de participants n'ayant pas connaissance des règles est informé de leurs existences, il présentera aux essais suivants un coût d'alternance qui n'était pas observé avant (Dreisbach, 2012). Ce résultat montre ainsi l'impossibilité des participants à faire abstraction des règles de tri une fois que celles-ci sont parvenues à leur conscience. Ce type d'apprentissage est cependant limité par les capacités de la mémoire à court terme.

Dans nos études, nous utiliserons principalement le modèle de Fagot (1994) repris par Meiran en 2000 (Figure 14). Dans ce modèle, l'indicateur le plus global est l'*alternation cost* (coût d'alternance général) qui est caractérisé par la différence entre les temps de réponses des essais alternés du bloc mixé et des essais (répétés) des blocs simples. Ce coût d'alternance est constitué de deux éléments, le coût d'alternance spécifique appelé "*task switching cost*" (Meiran, 2000) ou "*shifting cost*" (Fagot, 1994) qui correspond à la différence entre les temps de réponses des essais alternés et des essais répétés du bloc mixé, et le "*mixed-list cost*" qui concerne la différence entre les temps de réponses des essais répétés du bloc mixé et des essais (répétés) des blocs simples. L'utilisation de ces trois coûts permet ainsi d'avoir une mesure plus précise des effets liés à la reconfiguration mentale lors d'une alternance.

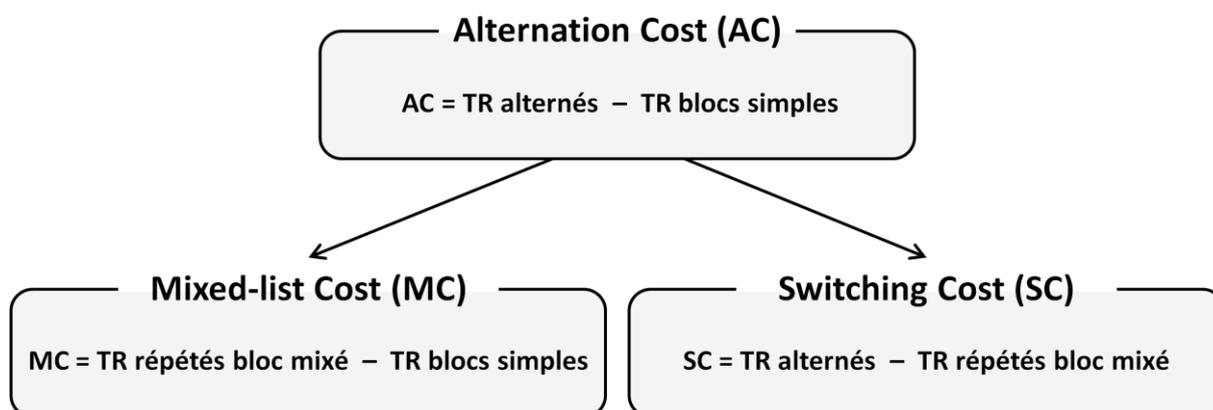


Figure 14 : Composants du coût d'alternance d'après Meiran (2000). Ces coûts sont obtenus à l'aide d'une soustraction de type $X - Y$; TR = Temps de réponse.

2.2. Les effets classiques dans les tâches d'alternance

Le fait d'alterner entre deux tâches entraîne un coût d'alternance correspondant au temps nécessaire pour aller chercher en mémoire de travail la règle pertinente à appliquer et pour inhiber la consigne qui n'est plus appropriée à la tâche (Allport & Wylie, 2000). Ce temps correspond ainsi au délai nécessaire pour reconfigurer les informations de la tâche (*task-set reconfiguration* ; Monsell, 2003 ; Rogers & Monsell, 1995). Comme cela a été évoqué précédemment, certaines modifications dans la structure de la tâche à réaliser (i.e., augmenter le temps de préparation, présenter des indices) permettent de diminuer de façon conséquente le coût d'alternance mais il reste systématiquement un coût d'alternance résiduel qui semblerait provenir de la récupération d'informations relatives à la tâche pertinente en fonction du stimulus présenté (Monsell, 2003). En effet, malgré un temps de préparation important entre la réponse et le stimulus suivant permettant de se préparer au changement de

tâche, cette préparation à l'alternance n'est complète qu'une fois toutes les informations reçues, c'est-à-dire uniquement lorsque le nouveau stimulus est présenté afin de mettre en lien la nouvelle règle et les caractéristiques du stimulus (Kimberg, Aguirre, & D'Esposito, 2000 ; Sohn, Ursu, Anderson, Stenger, & Carter, 2000). Pour reprendre la notion d'arbre de décision, le temps alloué avant la présentation du prochain stimulus va permettre au participant de retourner à la racine de l'arbre afin d'inhiber l'ancienne règle puis d'emprunter ensuite l'embranchement correspondant à la nouvelle règle pertinente. Enfin, la présentation du stimulus va permettre de sélectionner la branche menant à la feuille correspondant à la réponse souhaitée.

Des études ont mis en avant que le coût d'alternance est plus important chez les enfants et les personnes âgées (Cepeda, Kramer, & Gonzalez de Sather, 2001 ; Kray, Eber, & Lindenberger, 2004 ; Kray & Lindenberger, 2000 ; Reimers & Maylor, 2005 ; Salthouse, 1998 ; Salthouse, Fristoe, McGuthry, & Hambrick, 1998 ; Zelazo, Craik, & Booth, 2004). Ces résultats en forme de courbe en U s'expliquent probablement par des aspects liés à la fonctionnalité neuro-anatomique. En effet, chez les enfants, le cortex préfrontal n'est pas encore entièrement développé et à l'inverse, le déclin des fonctions cognitives, majoritairement lié à des atteintes de ce même cortex préfrontal, est avancé chez les personnes âgées. Confirmant cet effet d'âge, une autre étude portant sur l'évolution du contrôle exécutif au cours de la vie a mis en avant que la présence d'un temps de préparation entre la présentation d'un indice et la présentation de la cible permet d'améliorer les performances des sujets avec un bénéfice majeur pour les enfants et les personnes âgées (Cepeda, Kramer, & Gonzalez de Sather, 2001).

2.3. Une tâche paradigmatique : le DCCS

Le *Dimensional Change Card Sort* (DCCS) est une tâche paradigmatique utilisée chez les enfants préscolaires pour étudier leur capacité à alterner entre deux règles (Zelazo, Frye, & Rapus, 1996) et qui est inspirée du *Wisconsin Card Sorting Test* (WCST⁸ ; Grant & Berg, 1948) chez l'adulte (Cinan & Tanor, 2002 ; Nyhus & Barcelo, 2009). Dans ce test, les enfants doivent trier deux types de cartes, un lapin bleu et un bateau rouge en les associant à deux cartes cibles, un lapin rouge et un bateau bleu. L'expérimentateur va par exemple dans un premier temps demander à l'enfant de classer en fonction de la couleur le lapin bleu avec le

⁸ Le WCST, ou Wisconsin Card Sorting Test, est depuis longtemps appliqué au diagnostic de pathologies neurologiques et psychiatriques (Heaton, Chelune, Talley, Kay, & Curtiss, 1993). Ce test permet d'étudier la présence de persévérations dans la formulation d'hypothèses, signe d'un dysfonctionnement exécutif et plus particulièrement d'un manque de flexibilité mentale.

bateau bleu et le bateau rouge avec le lapin rouge. Puis dans une seconde partie, on demande à l'enfant de trier en fonction de la forme, le lapin bleu avec le lapin rouge et le bateau rouge avec le bateau bleu. Ces tâches sont construites de manière à appliquer des règles ambivalentes en fonction des différentes dimensions sur lesquelles les participants doivent se focaliser de façon alternée. Par exemple, le lapin bleu doit être classé en premier dans la catégorie Bleu lorsqu'on joue au jeu Couleur et ensuite, dans la catégorie Lapin pour le jeu Forme. Ce type de stimulus est appelé bivalent, au contraire des stimuli univalents tels que des lettres ou des chiffres qu'il faut respectivement classer comme voyelle/consonne ou pair/impair. Le DCCS entraîne des difficultés importantes qui se traduisent par un échec massif chez les enfants de 3 ans (Frye, Zelazo & Palfai, 1995 ; Zelazo, Frye, & Rapus, 1996) et que l'on retrouve à l'échelle de coûts d'alternance élevés chez les adultes (Diamond & Kirkham, 2005). Cependant, en séparant les dimensions Couleur et Forme des stimuli dans le DCCS, les résultats des enfants de trois ans se trouvent améliorés (Kloo & Perner, 2005 ; Kloo, Perner, Aichhorn, & Schmidhuber, 2010). Par exemple, au lieu de prendre les cartes standards du DCCS, Kloo et Perner (2005) ont présenté aux enfants des cartes avec les deux dimensions séparées : la première carte cible montrait un cercle rouge avec à côté le contour d'une banane et la seconde carte cible un cercle bleu avec à côté le contour d'une cerise. Les cartes tests représentaient un cercle bleu avec le contour d'une banane et un cercle rouge avec le contour d'une cerise. De cette façon, les cartes ne représentaient plus un seul objet bivalent mais deux objets univalents, ce qui permettait ainsi de bien distinguer les deux dimensions Couleur et Fruit (par exemple, pour la carte présentant un cercle bleu avec le contour d'une banane, l'enfant devait se focaliser sur la banane dans le jeu Fruit et sur le cercle bleu dans le jeu Couleur).

Comme nous venons de le voir, le DCCS présente de nombreuses difficultés pour les enfants avec la bivalence des stimuli, le « clash » visuel provoqué par les cartes cibles, mais aussi par la complexité de la structure de la tâche puisque le nombre de règles conditionnelles de type « si... - alors... » à employer pour effectuer la tâche correctement est conséquent. Par exemple : « Si c'est le jeu Forme et si c'est un lapin bleu alors je dois placer la carte sur le lapin rouge mais si c'est un bateau rouge alors je dois le mettre sur le bateau bleu. En revanche, si c'est le jeu Couleur et si c'est un lapin bleu alors je dois placer la carte sur le bateau bleu mais si c'est un bateau rouge, alors je dois le mettre sur le lapin rouge ». Face à ces difficultés, nous avons décidé de développer un nouveau paradigme, la tâche d'alternance catégorielle. Cette tâche, qui offre la possibilité de pallier ces problèmes et d'obtenir des structures de décision plus variées et plus simples, permet d'étudier de façon plus approfondie

le développement de la flexibilité chez les enfants préscolaires et notamment en ce qui concerne les plus jeunes pour qui l'utilisation de règles enchâssantes n'est pas encore possible (Chevalier & Blaye, 2006 ; Frye, Zelazo, & Palfai, 1995 ; Zelazo & Frye, 1998).

2.4. Une tâche synthétique : La tâche d'alternance catégorielle

Nous avons ainsi développé une tâche qui permet de synthétiser la structure des règles du DCCS et le paradigme de classification du WCST. Il s'agit d'une tâche d'alternance catégorielle inspirée des tâches de catégorisation par règle (Feldman, 2000) qui permet de moduler la complexité de la structure de décision du DCCS. En effet, dans le DCCS, l'enfant doit se focaliser de façon alternée sur une dimension ou une autre pour un même objet, un mécanisme autrement appelé *category set shifting* (e.g., Moore, Schettler, Killiany, Rosene, & Moss, 2009), *extra-dimensional shifting* (e.g., Perner & Lang, 2002), ou encore *perceptual shifting* (e.g., Ravizza & Carter, 2008). Dans la tâche d'alternance catégorielle, nous présentons à l'enfant deux cartes cibles, un chat et un mouton, ainsi que quatre cartes tests : une fleur blanche, une fleur foncée, un papillon blanc et un papillon foncé. Avec cette tâche, nous supprimons la difficulté créée par l'ambivalence des stimuli. En effet, au contraire du DCCS, aucune carte test ne peut être triée à deux endroits différents selon la règle à employer. Un second avantage par rapport au DCCS est l'absence de clash visuel entre les stimuli et les catégories puisque les cartes cibles sont totalement différentes des cartes tests (Perner & Lang, 2002). La tâche d'alternance catégorielle implique en effet des réponses indépendantes des stimuli (les cartes tests ne présentent aucune dimension commune avec les cartes cibles). Le dernier avantage est d'obtenir une structure emboîtée similaire au DCCS que nous pouvons moduler et simplifier afin d'obtenir des structures décisionnelles plus variées (Figure 15) qui vont ainsi permettre d'évaluer plus finement chez les enfants préscolaires l'acquisition de la compétence de flexibilité.

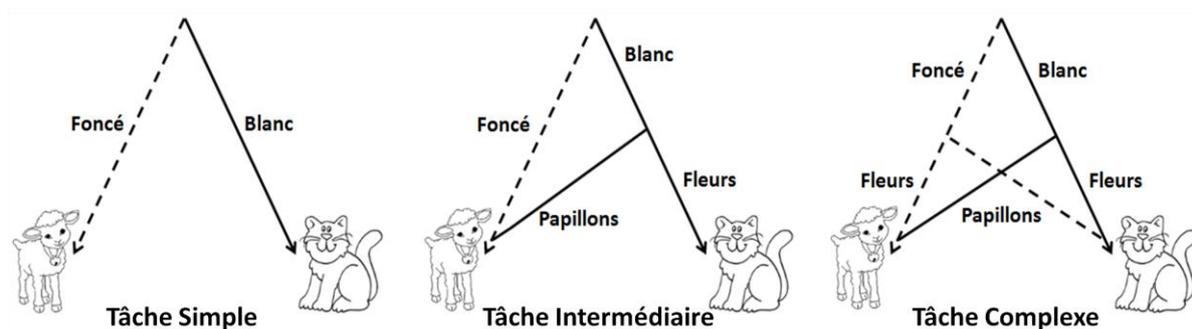


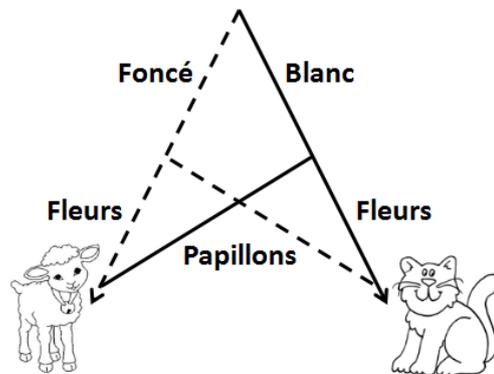
Figure 15 : Arbres de décisions des trois tâches simple, intermédiaire et complexe de la tâche d'alternance catégorielle. On peut noter sur ces schémas que le nombre d'embranchements augmente avec la difficulté de la tâche. La tâche simple présente deux embranchements, la tâche intermédiaire en présente trois et la tâche complexe quatre.

La difficulté de la tâche d'alternance catégorielle dépend essentiellement de la seconde règle puisque la première consigne est identique dans les trois conditions. Dans la tâche simple, qui sert de tâche de référence puisqu'elle n'implique pas réellement une alternance de règles, on demande aux enfants de se focaliser uniquement sur la couleur des stimuli. Par exemple, pour la première règle, les enfants doivent donner la fleur foncée au mouton et la fleur blanche au chat. Dans la seconde règle, le même tri doit être effectué avec les papillons (i.e., le papillon foncé est donné au mouton et le papillon blanc au chat). Dans la phase d'alternance, les enfants doivent donc se focaliser uniquement sur la couleur des cartes puisque toutes les images foncées (indépendamment de leurs formes) sont destinées au mouton et toutes les images blanches (abstraction faite de leurs formes) au chat. Dans la tâche intermédiaire les participants doivent se focaliser sur les deux dimensions forme et couleur mais pour un seul type d'objet. Par exemple, pour la première règle, les enfants doivent donner la fleur foncée au mouton et la fleur blanche au chat. Le changement s'opère pour la seconde règle qui implique de donner au mouton les papillons foncés et papillons blancs. Cette modification implique dans le bloc d'alternance de se focaliser uniquement sur la forme de l'image quand il s'agit d'un papillon et de se focaliser à la fois sur la couleur et la forme de l'image lorsque celle-ci est une fleur. Enfin, dans la tâche complexe, les enfants sont dans l'obligation de se focaliser sur la forme et la couleur de chaque objet pour pouvoir procéder correctement au tri des stimuli. On demande aux enfants dans la première règle de donner la fleur foncée au mouton et la fleur blanche au chat. Dans la seconde règle, ils doivent effectuer un tri contraire puisque le papillon foncé doit être donné au chat et le papillon blanc au mouton. Cette tâche requiert donc de réaliser une catégorisation inverse entre les deux règles, comme dans le DCCS. On obtient ainsi dans les deux tâches un arbre de décision à quatre embranchements (Figure 16). La seule différence est que la tâche catégorielle emboîte des

décisions fondées sur la valeur des dimensions forme et couleur alors que le DCCS emboîte des décisions fondées sur le type de jeu (Forme ou Couleur) et le type de carte (bateau x et lapin y).

Alternance Catégorielle

Règles	Mouton	Chat
Règle 1		
Règle 2		
Alternance	 	 



DCCS

Règles		
Couleur		
Forme		
Alternance	 	 

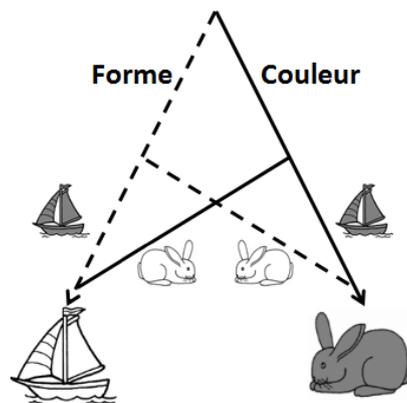


Figure 16 : Structure de la tâche d'alternance catégorielle complexe et du DCCS avec l'arbre de décision correspondant.

Les résultats divergent quant à l'effet de la difficulté de la tâche sur le coût d'alternance. Rubinstein, Meyer et Evans (2001), dans une tâche d'alternance mathématique, ont mis en avant un coût d'alternance plus important lorsque les sujets devaient effectuer des multiplications et des divisions que lorsqu'ils devaient alterner entre des additions et des soustractions. Ce résultat est néanmoins contredit par Emerson et Miyake (2003) et Allport, Styles et Hsieh (1994) pour des tâches de nature similaire. Comment peut-on expliquer cette différence de résultats ? L'étude d'Emerson et Miyake (2003) et celle de Rubinstein, Meyer et Evans (2001) utilisent des tâches d'alternance mathématique pour lesquelles on peut néanmoins relever une différence majeure. Tandis que la difficulté de la première étude repose sur la valeur de l'opération (ajouter ou soustraire 1, 3 ou 6), la difficulté de la seconde étude repose sur le type d'opération à effectuer sur des nombres différents (addition et soustraction vs multiplication et division). Il est possible qu'ajouter ou soustraire 1, 3 ou 6

n'ait pas présenté assez de différences de difficulté pour mettre en avant un effet différentiel sur le coût d'alternance. Notre hypothèse est que les trois structures de règles des tâches catégorielles présentent suffisamment de différences de complexité pour induire des coûts d'alternance différents. Cette tâche d'alternance catégorielle a également été élaborée dans l'objectif de montrer que l'acquisition de la flexibilité se fait par étape et que les enfants de 3 ans sont déjà capables d'alterner entre deux règles lorsque celles-ci sont simples. En grandissant, les enfants vont être capables de réussir la tâche intermédiaire vers 4 ans puis la tâche complexe à l'âge de 5 ans (comme pour le DCCS).

En conformité avec les résultats de Rubinstein, Meyer et Evans (2001), nous avons testé les performances d'enfants préscolaires de 3 ans ($N = 42$), 4 ans ($N = 39$) et 5 ans ($N = 43$), en les soumettant aux trois tâches de flexibilité catégorielle de difficulté croissante ainsi qu'au DCCS (Mathy, Courenq, Laurent, & Millot, soumis). Chaque tâche était divisée en trois blocs de tests. On demandait aux enfants d'apprendre la première règle (le classement des fleurs) dans le bloc 1 avec en premier lieu des essais d'entraînement dans lesquels on leur donnait un feedback sur leurs réponses puis des essais tests ($n = 6$) sans feedback. De la même façon, ils devaient apprendre la seconde règle dans le bloc 2 (la catégorisation des papillons) avec des essais d'entraînement puis des essais tests. Enfin dans le bloc 3, on demandait aux enfants de trier l'ensemble des cartes ($n = 12$) et donc d'alterner entre les deux règles apprises précédemment mais cette fois-ci sans phase d'entraînement auparavant. Pour le DCCS, on leur indiquait oralement dans le bloc 3 la règle à utiliser (Forme ou Couleur).

Les résultats ont permis de mettre en avant un accroissement du nombre d'erreurs dans les tâches d'alternance catégorielle lorsque la complexité des embranchements augmente. Toutefois, chez les enfants de 5 ans, le nombre d'erreurs est plus important dans la tâche complexe que dans le DCCS. Nous pouvons peut-être expliquer ceci par le fait que les cartes tests de la tâche d'alternance catégorielle n'ont aucun rapport avec les cartes cibles associées ce qui ne permet donc pas à ces dernières de servir de soutien lorsque l'enfant est en difficulté pour se rappeler la règle à utiliser. Les analyses ont en outre montré que la quantité d'erreurs réalisées dans ces tâches diminue avec l'âge puisque les enfants de trois ans ont systématiquement commis plus d'erreurs que ceux de quatre ans, eux-mêmes ayant commis plus d'erreurs que les enfants de cinq ans excepté dans la tâche de complexité simple dans laquelle les deux groupes ont présenté un taux de réussite similaire (Figure 17).

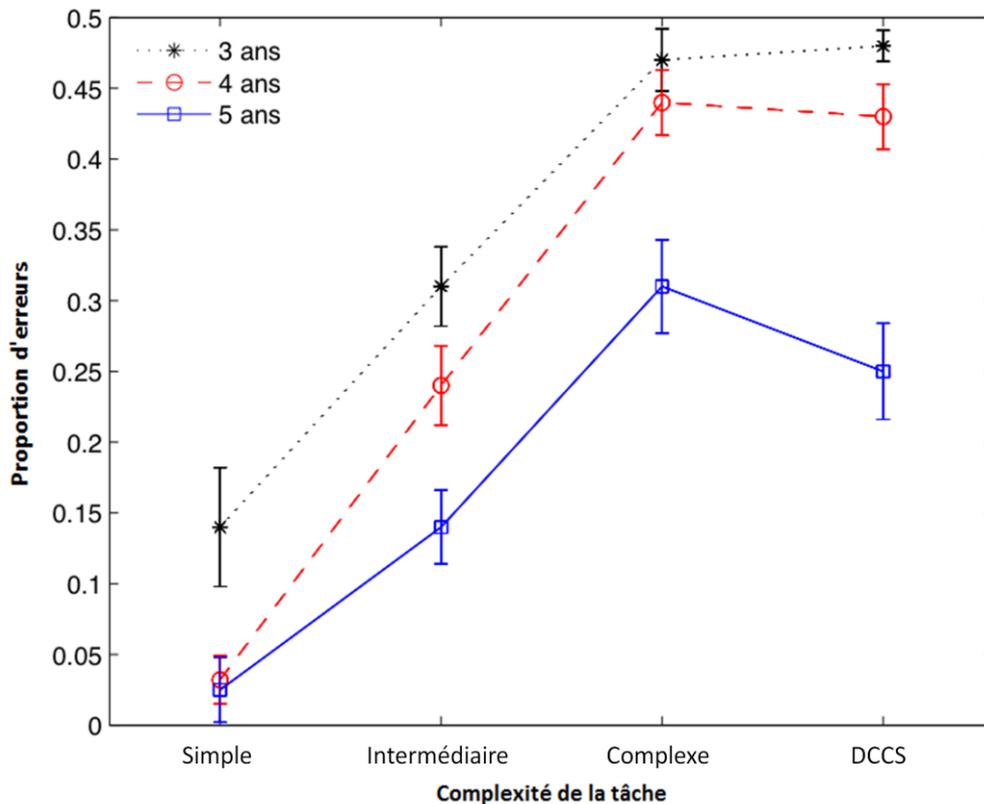


Figure 17 : Figure issue de l'analyse des données de l'expérience de Mathy, Courenq, Laurent, et Millot. Proportion d'erreurs effectuées par les enfants de 3, 4 et 5 ans dans le bloc d'alternance en fonction de la complexité des tâches. Les barres d'erreurs sont à +/- une erreur standard et il y a 12 essais dans chaque bloc d'alternance.

La tâche d'alternance catégorielle, de par ses structures de décision variées, permet de montrer de façon plus précise l'évolution des capacités de flexibilité chez les enfants préscolaires, contrairement à la tâche classique du DCCS qui montre uniquement une réussite chez les enfants de 4-5 ans. Nous avons souhaité répliquer cette expérience chez un groupe d'enfants en utilisant une version informatisée de nos tâches dans l'objectif d'obtenir des données supplémentaires, notamment les temps de réponses.

3. Étude du développement de la flexibilité : Réalisation de tâches d'alternance de difficulté croissante chez des enfants d'âge préscolaire – Expérience 2

3.1. Matériel et méthode

La finalité de cette expérience était de répliquer l'ordre des trois tâches d'alternance catégorielle (Simple, Intermédiaire et Complexe) trouvé dans l'expérience de Mathy, Courenq, Laurent et Millot (soumis), mais en utilisant cette fois-ci une méthode informatisée afin d'avoir un meilleur contrôle de l'ensemble des paramètres. L'objectif principal était

d'obtenir une analyse plus fine de la performance basée sur les temps de réponses (RT). L'âge n'était pas d'un intérêt primordial dans cette étude donc la tranche d'âge de l'échantillon a été intentionnellement réduite. Dans cette expérience, il était demandé à chaque participant de classer trois types de stimuli en fonction des trois niveaux de complexité des règles (correspondant à ceux de l'expérience de Mathy, Courenq, Laurent et Millot), mais cette fois-ci les cartes devaient être triées à l'aide des touches du clavier d'ordinateur. Dans l'ensemble, bien que l'expérience ait été informatisée, la procédure était en grande partie équivalente à celle de l'étude précédente. Les seules différences résidaient dans le fait que les deux blocs d'apprentissage (avec feedback) étaient effectués en premier (au lieu d'être en alternance avec les blocs d'essai), que le nombre de cartes par bloc a été légèrement augmenté pour obtenir des temps de réponses plus fiables, et enfin, que nous avons utilisé des ensembles de stimuli différents.

Participants

Trente-six enfants préscolaires ($M = 5.7$ ans ; $ET = 0.4$; 15 garçons et 21 filles) issus de deux classes de deux écoles maternelles différentes ont volontairement participé à cette étude. La majorité des enfants était d'un milieu socioéconomique moyen. Des formulaires de consentement ont été distribués à tous les parents et nous avons inclus dans l'expérience uniquement les participants pour lesquels nous avons reçu un accord signé. Les enfants ont été choisis dans cette tranche d'âge parce que nous souhaitions qu'ils trouvent les trois tâches difficiles, mais tout à fait réalisables.

Matériel

Les tâches de catégorisation ont été élaborées et exécutées à l'aide du logiciel E-Prime2® (Psychology Software Tools, Inc.) sur un ordinateur portable. Les deux écoles maternelles ont mis à disposition pour l'étude une pièce dans laquelle les enfants ont pu effectuer l'expérience au calme.

Stimuli

Trois ensembles de quatre images mesurant 5×5 cm ont été construits sur la base de deux formes et de deux couleurs propres à chaque ensemble : le premier ensemble comportait des images simples (un carré bleu, un carré rouge, un rond bleu et un rond rouge), le second des images de complexité *a priori* intermédiaire (une étoile ou un pentagone, avec hachures

horizontales ou verticales) et le dernier des images plus abstraites correspondant à des objets inconnus non lexicalisés (deux formes complexes avec pour chacune deux nuances de luminosité). Les images complexes ont été tirées de la base de données de Jessica S. Horst : NOUN (Novel Object et Unusual Name). Nous formulons l'hypothèse que les catégories de stimuli et la complexité des tâches fonctionnent de façon indépendante parce que leur interaction ne peut être calculée en l'absence d'un plan factoriel complet. Ce facteur est donc omis dans les analyses qui suivent. Nous considérons simplement ici que l'intérêt d'utiliser trois types d'images était d'éviter la répétition des mêmes stimuli dans les tâches. Les ensembles de stimuli et les trois tâches ont été équilibrés de sorte que chaque tâche a été associée en proportion égale à chaque catégorie d'images. Les résultats seront donc uniquement focalisés sur la complexité des tâches.

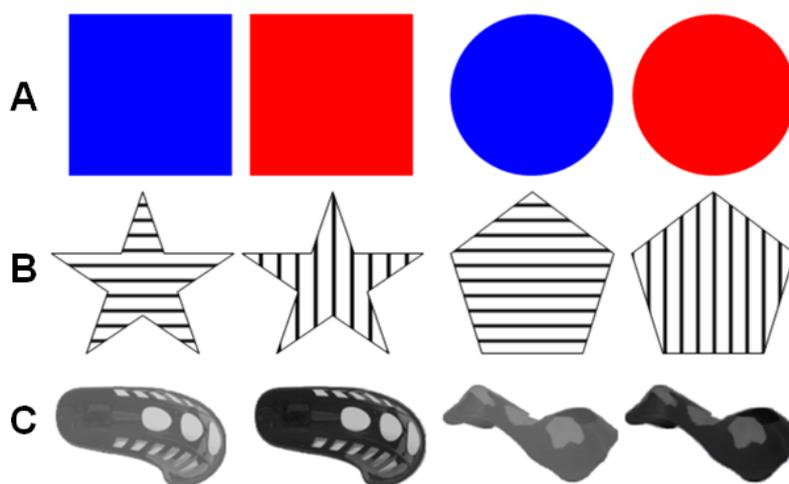


Figure 18 : Images utilisées dans nos trois tâches d'alternance catégorielle. A : images simples ; B : images intermédiaires ; C : images complexes.

Procédure

Chaque enfant était assis face à l'ordinateur portable et l'expérimentateur était assis près de lui afin de lui donner les instructions au cours des trois tâches. Les participants ont été informés qu'ils allaient devoir donner une série d'images à Mickey ou à Donald selon la préférence des personnages, en appuyant pour cela sur le bouton "Mickey" du clavier pour choisir Mickey ou sur le bouton "Donald" pour choisir Donald. La couleur des vêtements des deux personnages (rouge et bleu) a été modifiée pour ne pas créer de clash visuel avec les stimuli carré et rond qui étaient également de ces deux couleurs.

Les touches du clavier ont été identifiées par des autocollants de couleur (le visage du personnage) afin de rappeler aux enfants l'endroit sur lequel ils devaient placer leurs doigts pendant la tâche (l'expérimentateur a invité les participants à utiliser leurs index pendant les tâches). Les enfants ont été invités à faire le maximum d'efforts pour éviter les erreurs. Dans cette expérience, les instructions ont été présentées à la fois visuellement et verbalement, comme expliqué dans la section suivante.

Plan expérimental

Tous les participants devaient effectuer les trois tâches d'alternance catégorielle de complexité croissante (dans un ordre randomisé). Chaque tâche a impliqué deux règles, et chacune des deux règles comportait un ensemble distinct de deux objets visuels (la combinaison des deux règles donnait lieu au tri de quatre objets). La durée totale de l'expérience était d'environ 20 minutes, incluant les instructions et les pauses.

Chaque tâche a été divisée en cinq blocs dans lesquels les participants étaient tenus d'apprendre la première règle permettant la catégorisation des deux premiers stimuli avec un feedback (Bloc 1, composé de 8 stimuli), apprendre la deuxième règle permettant la catégorisation des deux autres stimuli avec également un feedback (Bloc 2, composé de 8 stimuli), appliquer la première règle sans feedback (Bloc 3, composé de 8 stimuli), appliquer la seconde règle sans feedback (Bloc 4, composé de 8 stimuli), et enfin alterner entre les deux règles sans feedback (Bloc 5, composé de 16 stimuli). Les stimuli ont été présentés dans un ordre aléatoire à l'intérieur de chaque bloc. Le feedback visuel dans les deux premiers blocs durait 1500 ms et indiquait si la réponse était correcte ou non. Quand la bonne réponse était donnée, le mot "OK" apparaissait en vert au centre de l'écran, et lorsque la réponse était incorrecte, le mot «FAUX» apparaissait en rouge. Le feedback était donné visuellement mais également oralement par l'expérimentateur : "ta réponse est correcte" ou "ta réponse est fausse".

Nous avons enregistré les mesures suivantes : temps de réponses en millisecondes, exactitude des réponses (correctes ou non), coût d'alternance (*switch cost*) correspondant à la différence moyenne des temps de réponses lorsqu'il y a un changement de règle, et l'*alternating cost* correspondant à la différence moyenne des temps de réponses entre les essais alternés et les blocs répétés.

Règles et consignes

Les consignes apparaissaient visuellement avant chacun des blocs (Figure 19), mais étaient également décrites verbalement par l'expérimentateur en prenant soin de ne pas décrire les stimuli autrement qu'en utilisant des démonstratifs (par exemple, "Cette image va à Mickey", "Ces images vont à Donald "). Ainsi, les stimuli n'ont à aucun moment été nommés afin de limiter la longueur des instructions. Pendant les instructions, les images ont été organisées en rangées sur l'écran, chaque ligne suivie par une flèche pointant vers l'image qui correspondait à la catégorie attribuée. Par exemple, l'instruction avant le Bloc 5 a rappelé aux enfants les règles en utilisant simultanément deux flèches pointant vers Mickey ou Donald. Les enfants disposaient de tout le temps nécessaire pour apprendre les règles et l'expérimentateur leur demandait s'ils étaient prêts avant de commencer le tri des stimuli.

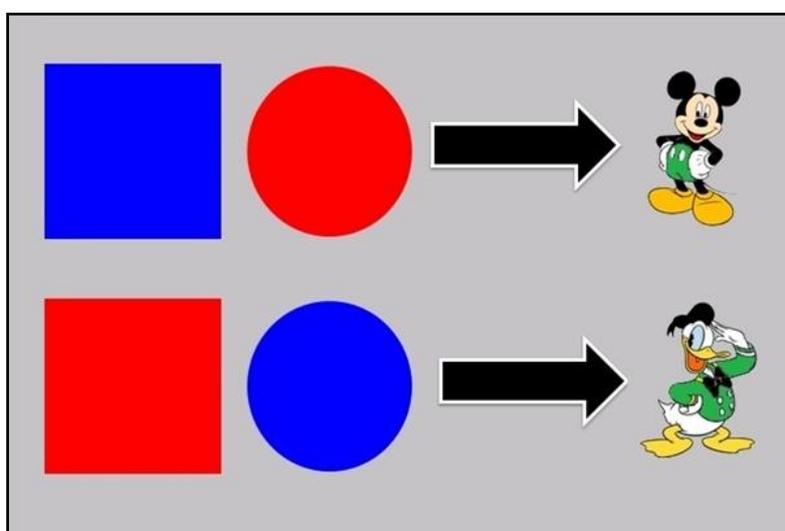


Figure 19 : Exemple de consigne du Bloc 5 pour la tâche complexe. Le carré bleu et le rond rouge doivent être donnés à Mickey ; le carré rouge et le rond bleu doivent être donnés à Donald

Dans chacun des cinq blocs, les stimuli ont été présentés de manière séquentielle et aléatoire. Une croix de fixation apparaissait au centre de l'écran pendant 1000 ms avant l'apparition de chaque stimulus. Chacun de ces quatre blocs était constitué de huit essais (e.g., quatre stimuli *carré bleu*, et quatre stimuli *carré rouge*). Les stimuli apparaissaient dans un ordre aléatoire au sein de chaque bloc. Le dernier bloc de chaque tâche était un bloc mixé dans lequel l'ensemble des quatre stimuli rencontrés dans les blocs précédents était à trier. Ce bloc comportait 16 essais, chaque stimulus étant présenté quatre fois dans un ordre aléatoire. Au total, chaque participant a effectué 3 tâches \times 5 blocs = 15 blocs, ce qui représente un total de $3 \times (4 \times 8 + 1 \times 16) = 144$ essais.

Notre procédure était semblable à la procédure de tirage randomisé d'Altmann et Gray (2008), la différence étant que nos stimuli étaient univalents et ne nécessitaient pas l'utilisation de règles indicées. Notre mode de présentation n'a fourni aucun temps de préparation aux participants (autre que la croix de fixation de 1000 ms), comme cela peut être le cas dans la procédure d'essais alternés (*alternating-run procedure*) de Rogers et Monsell (1995) dans laquelle l'alternance de règle est prévisible (AABBAABB etc.), ou dans le cas d'une tâche indicée dans laquelle un indice annonce la tâche à réaliser avant chaque stimulus (Meiran, 1996).

Tâches

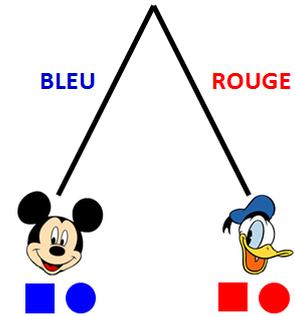
Dans la tâche de complexité simple (Figure 20-A) qui sert de test de référence, les enfants devaient effectuer un tri en se focalisant uniquement sur la dimension couleur. Il était demandé à chaque participant de trier dans le premier bloc deux objets de forme identique en fonction de leur couleur et d'effectuer la même tâche dans le second bloc avec une nouvelle forme. Les blocs 3 et 4 étaient une simple application des règles sans feedback. Dans le bloc mixé, les sujets devaient donc simplement se focaliser sur la couleur des stimuli puisque les deux formes de même couleur allaient à droite et les deux autres formes de l'autre couleur allaient à gauche.

Dans la tâche de complexité intermédiaire (Figure 20-B), les enfants devaient, comme dans la tâche simple, trier une première forme selon sa couleur. La seconde règle requérait cette fois de catégoriser tous les stimuli de la seconde forme dans une même classe (Mickey). Dans le bloc mixé, cette tâche nécessitait donc que les participants se focalisent aussi sur les formes puisque chacune d'elles appelait des règles différentes (e.g., *carré bleu* pour Mickey et *carré rouge* pour Donald dans la Règle 1, et *rond bleu* et *rond rouge* pour Mickey dans la Règle 2).

Enfin, la tâche complexe (Figure 20-C) présentait un niveau supérieur de complexité puisque les participants devaient trier les couleurs d'une première forme dans les blocs 1 et 3 différemment des couleurs de la seconde forme dans les blocs 2 et 4. Dans le bloc mixé, les participants devaient donc aussi se focaliser sur les formes puisque chacune d'elles appelait des règles différentes. Cependant, au contraire de la tâche intermédiaire, les deux règles présentaient une complexité équivalente et étaient inversées (l'inversion requérait donc pour le sujet d'inhiber plus fortement l'apprentissage de la première règle que dans la tâche intermédiaire).

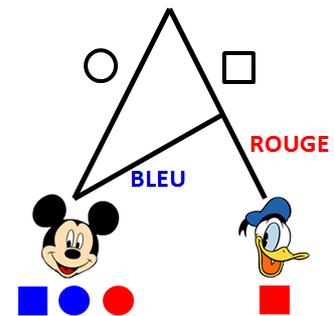
A Tâche Simple

Phases	Feedback	Mickey	Donald
1 - Règle 1	✓	■	■
2 - Règle 2	✓	●	●
3 - Règle 1	✗	■	■
4 - Règle 2	✗	●	●
5 - Alternance	✗	■ ●	■ ●



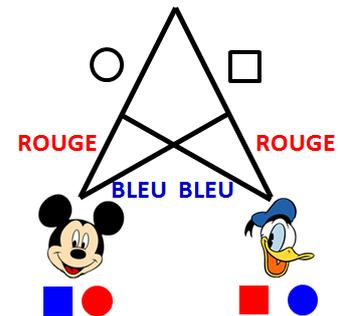
B Tâche Intermédiaire

Phases	Feedback	Mickey	Donald
1 - Règle 1	✓	■	■
2 - Règle 2	✓	● ●	
3 - Règle 1	✗	■	■
4 - Règle 2	✗	● ●	
5 - Alternance	✗	■ ● ●	■



C Tâche Complexe

Phases	Feedback	Mickey	Donald
1 - Règle 1	✓	■	■
2 - Règle 2	✓	●	●
3 - Règle 1	✗	■	■
4 - Règle 2	✗	●	●
5 - Alternance	✗	■ ●	■ ●



D Catégories

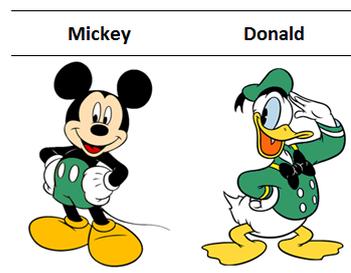


Figure 20 : Règles de classification et arbres de décisions des tâches d'alternance catégorielle simple, intermédiaire et complexe.

3.2. Résultats

Nous avons effectué une série d'ANOVA à mesures répétées avec la complexité des tâches comme principale variable indépendante et le taux d'erreurs et les temps de réponses

comme variables dépendantes. L'ordre des tâches, le type de stimulus et l'âge des participants ont été écartés des analyses afin d'en raccourcir la présentation. Notre objectif premier était d'analyser l'effet de nos tâches sur les temps de réponses. Nous avons également utilisé les coûts d'alternance (*switch cost*) et les coûts de mélange (*mixed-list cost*) comme variables indépendantes. Les temps moyens de réponses correctes ainsi que les proportions moyennes d'erreurs pour chaque bloc sont visibles dans l'annexe 1.

3.2.1. Proportion d'erreurs

Nous avons émis comme hypothèse que les performances d'alternance allaient varier entre les trois tâches. L'ANOVA à mesures répétées a montré un effet significatif de la complexité des tâches sur la proportion d'erreurs dans le Bloc 5, $F(2,70) = 56.6$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .62$. Les comparaisons par paire utilisant le test de Bonferroni ont montré que le pourcentage moyen d'erreurs dans la tâche simple ($M = 5\%$, $ET = 1.4$) était significativement plus faible que dans la tâche intermédiaire ($M = 14\%$, $ET = 2.9$), qui à son tour était significativement plus faible que dans la tâche complexe ($M = 43\%$, $ET = 3.7$). Un pattern similaire a été obtenu quand nous avons sélectionné les données correspondant à la première tâche réalisée par les participants (signifiant que nous avons exclu les deux autres tâches des analyses) pour supprimer un possible effet de report (*carry-over effect*) (respectivement, 4%, 12%, et 45%, $F(2,33) = 21$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 55\%$).

Ce simple résultat souligne la pertinence de la tâche intermédiaire. Cependant, la difficulté de cette tâche a peut-être été sous-estimée car l'utilisation d'une règle univalente globale (par persévération de la première règle) conduit à un taux de réponses correctes de 75% chez 8 enfants (contre 2 dans la tâche simple et 3 dans la tâche complexe). Afin de résoudre ce problème, nous avons établi un critère de réussite plus strict au terme duquel les participants obtiennent le score de 1 uniquement s'ils ont été capables d'alterner entre les deux règles du dernier bloc en commettant au maximum deux erreurs sur les 16 cartes à trier. Nous avons observé respectivement 31, 22 et 5 participants qui ont alterné presque parfaitement entre les deux règles des tâches simples, intermédiaires et complexes.

Le test de McNemar a été significatif pour les deux tableaux croisés entre les tâches simple et intermédiaire (un seul participant a réussi correctement la tâche intermédiaire sans réussir la tâche simple ; quatre participants n'ont réussi aucune des deux tâches, et 10 ont uniquement réussi la tâche simple), et entre la tâche intermédiaire et la tâche complexe (seuls deux participants ont réussi la tâche complexe sans réussir la tâche intermédiaire ; 12

participants n'ont réussi aucune des deux tâches, et 19 ont uniquement réussi la tâche intermédiaire).

3.2.2. Temps de réponse

Dans l'ensemble, les temps de réponses dans le bloc d'alternance (quelle que soit l'exactitude des réponses) varient de 1861 ms ($ET = 620$) pour la tâche la plus simple, à 2553 ms ($ET = 820$) pour la tâche la plus complexe, $F(2,70) = 17.1$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .30$. Les comparaisons post-hoc n'ont pas montré de différence significative entre la tâche simple et la tâche intermédiaire, mais les temps de réponses étaient significativement plus élevés pour la tâche complexe que pour les deux autres tâches. Cependant, étant donné que les possibilités d'obtenir des temps de réponses plus rapides sont plus importantes dans la tâche intermédiaire (trois cartes appartiennent à la même catégorie donc 12 cartes sur 16 dans le bloc mixé sont triées du même côté), nous avons effectué trois analyses plus affinées, basées sur les temps de réponses correctes pour détecter un ordre de ces temps qui permettrait de mieux se conformer aux hypothèses. Tout d'abord, nous avons sélectionné les essais pour lesquels les participants ont été amenés à la fois à changer de règle et de touche réponse. Dans ce cas, la discrimination entre les temps de réponses correctes a été augmentée et une relation plus linéaire a été observée (respectivement 1902 ms, 2247ms et 2692 ms pour les trois tâches, voir figure 21), $F(2,64) = 5,6$, $p = .006$, $\eta_p^2 = .15$. Une tendance similaire a été mise en évidence lorsque nous avons limité notre analyse au seul stimulus qui nécessitait d'être trié dans la catégorie Donald dans les trois tâches (par exemple, le carré rouge pour les stimuli simples), $F(2,50) = 4$, $p = .025$, $\eta_p^2 = .14$ (respectivement 1821, 2079 et 2544 ms pour les trois tâches ; Figure 21). Une dernière analyse a porté sur les quatre premiers essais du bloc d'alternance et a une nouvelle fois montré que les temps de réponses correctes variaient significativement avec la complexité des tâches, $F(2,58) = 10,5$, $p = <.001$, $\eta_p^2 = .27$ (respectivement 1907 ms, 2258 ms et 3317 ms pour les trois tâches ; Figure 21). Toutefois, dans les trois analyses précédentes, bien qu'on observe encore une fois une diminution linéaire continue et plus régulière des performances, les comparaisons post-hoc n'ont pas systématiquement différencié significativement les trois conditions (voir la figure 21, dans laquelle la moyenne des temps de réponses correctes et les écarts-types sont représentés).

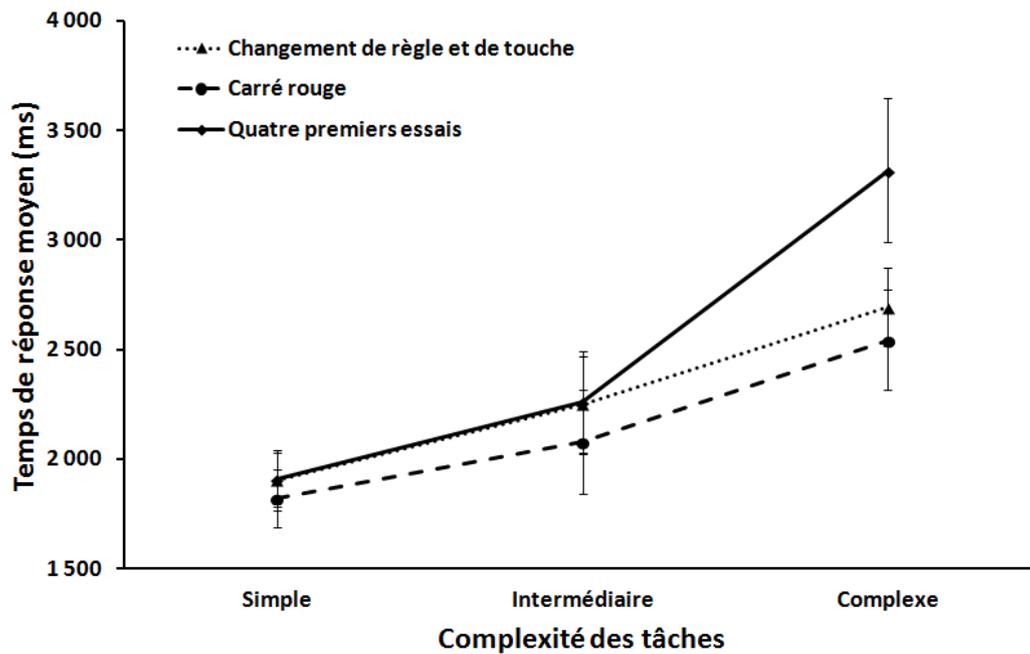


Figure 21 : Temps de réponses correctes dans le bloc mixé en fonction de la complexité des tâches et selon le type d'analyse : changement de règle et de touche, carré rouge et quatre premiers essais. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

3.2.3. *Switching cost et alternation cost*

Enfin, la figure 23 montre l'ensemble des variations des temps de réponses (correctes ou non) selon le type de switch dans le bloc 5. Nous avons choisi ici de rapporter les coûts d'alternance de tous les essais (soit 36 participants \times 16 essais) pour montrer la nette séparation de la tâche intermédiaire et de la tâche complexe selon les différents types de switch, et l'augmentation régulière de la difficulté selon que les participants étaient tenus de changer de touche réponse sans changer de règle, de changer de règle sans changer de bouton réponse ou de changer à la fois de règle et de touche réponse. Ces différents types de switch sont visibles dans la figure 22. Les tâches intermédiaires apparaissent ici comme plus simples que la tâche complexe.

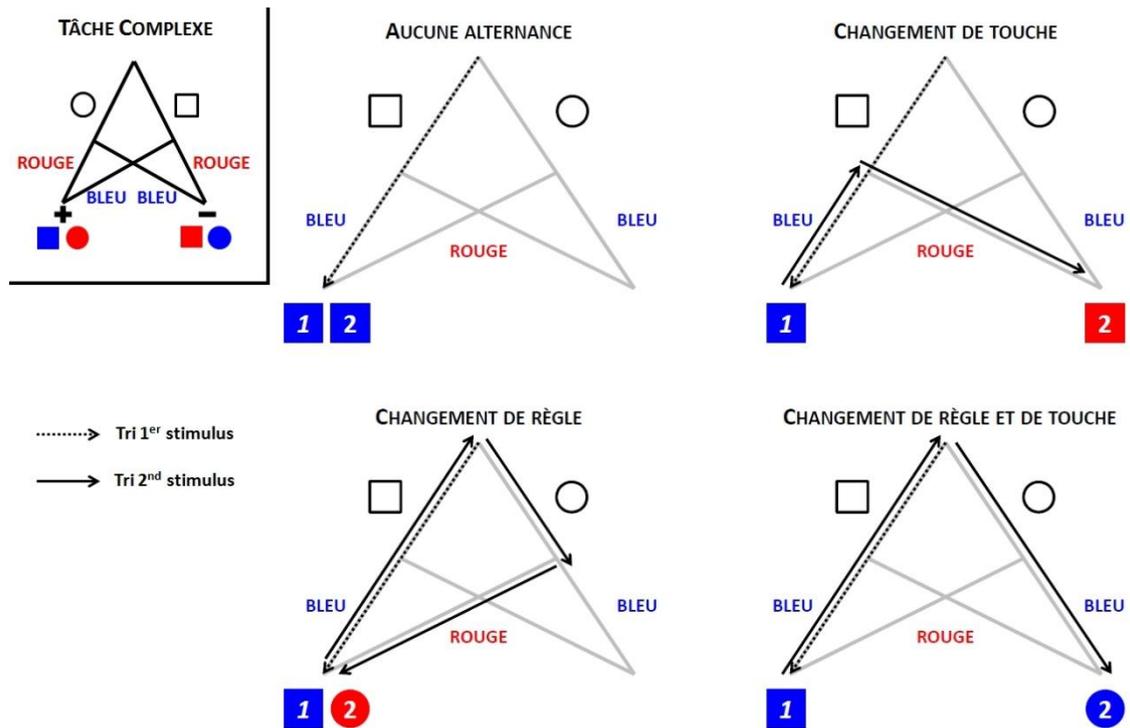


Figure 22 : Schéma d'explication des différents types de switch en fonction de l'enchaînement des stimuli. Exemple avec la tâche complexe et les stimuli simples.

Une question importante était de savoir si les enfants devaient effectuer des alternances dans la tâche intermédiaire, car l'arbre de décision pourrait être réduit à une règle simple utilisant uniquement une négation du type « Mickey aime tout sauf les carrés rouges tandis que Donald n'aime que les carrés rouges », ce qui permettrait de réduire l'arbre de décision à deux branches (carré rouge ? oui = Donald vs non = Mickey). Avec de telles associations présentes à l'esprit, les enfants n'auraient donc jamais à alterner dans le Bloc mixé. Cependant, les différences de temps de réponse ne semblent pas correspondre à l'idée que tous les stimuli aient été classés à la même vitesse dans la tâche intermédiaire.

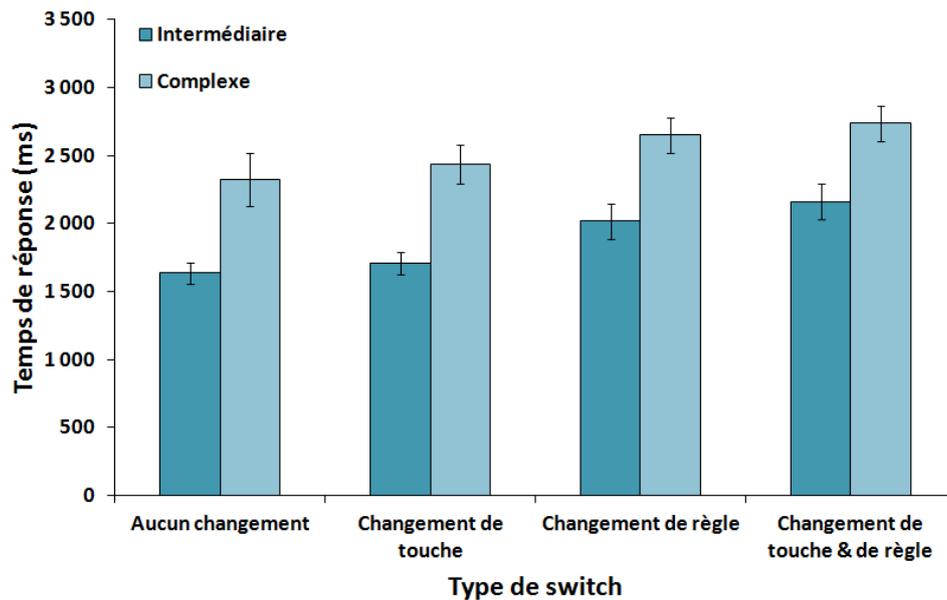


Figure 23 : Temps de réponses correctes pour les tâches intermédiaire et complexe, mesurés pendant le bloc d'alternance, en fonction du type de switch. Les barres d'erreur sont à \pm une erreur standard.

Enfin, nous avons calculé l'*alternation cost* pour chaque participant et chaque tâche (*alternation cost* = temps de réponse moyen des essais avec changement de règle au bloc 5 moins la moyenne des temps de réponses aux blocs 3 et 4). L'analyse de variance a montré que les coûts d'alternance pour les tâches simple, intermédiaire et complexe (113 ms, 614 ms et 699 ms respectivement) ont augmenté de façon significative avec la difficulté des tâches, $F(2,70) = 4,7$, $p = .013$, $\eta_p^2 = .12$. En utilisant la correction de Bonferroni, les comparaisons post-hoc ont seulement permis de différencier la tâche simple de la tâche complexe malgré une tendance entre la tâche simple et la tâche intermédiaire ($p = .052$).

3.3. Discussion

L'objectif de cette étude était de montrer que les tâches d'alternance catégorielle offrent une structure de règles plus variées que le DCCS standard et permettent une mesure plus précise de l'évolution de la flexibilité cognitive chez les enfants d'âge préscolaire. Dans le DCCS, les enfants doivent alterner leur attention entre les deux dimensions (couleur et forme) d'un objet bivalent. Sur la base de la littérature (par exemple, Monsell, 2003), nous avons supposé que les performances de flexibilité cognitive dépendent du type de reconfiguration mentale nécessaire pour se déplacer entre les ensembles de règles contradictoires.

La formalisation de la complexité des règles à deux dimensions utilisées dans nos tâches d'alternance catégorielle est fondée sur la littérature concernée par la catégorisation

artificielle (Feldman, 2003b). Les trois tâches peuvent sembler simplistes et leur ordonnancement sans équivoque, mais la hiérarchisation des autres tâches plus complexes de catégorisation, qui pourraient être utilisées, est moins évidente puisque le traitement sous-jacent n'est pas encore élucidé, et que l'ordonnancement dépend de comment ce traitement est modélisé (Feldman, 2003a, 2003b ; Fific, Little & Nosofsky 2010 ; Goodwin & Johnson-Laird, 2013 ; Kemp, 2012 ; Lewandowsky, 2011 ; Little, Nosofsky, & Denton, 2011).

L'expérience de Mathy, Courenq, Laurent et Millot a confirmé l'organisation hiérarchique des tâches en fonction du niveau de complexité, incluant la tâche intermédiaire, sur la base des taux moyens d'erreurs et sur les implications logiques entre la réussite des tâches. Notre expérience, quant à elle, a confirmé l'organisation hiérarchique des tâches selon le niveau de complexité, basée sur les temps de réponses (ces résultats rappellent ceux de Deák, Ray, & Pick, 2004 ; Emerson & Miyake, 2003 ; Rubinstein, Meyer, & Evans 2001, concernant les effets de la complexité de la tâche), même si nous n'avons pas trouvé statistiquement une démarcation claire entre les trois tâches. Dans l'ensemble de nos tâches, la performance semble simplement varier de façon continue avec la complexité des règles. Nos résultats ne semblent pas soutenir l'idée que le développement de la flexibilité est mieux décrit comme étant un changement discontinu (van Bers, Visser, van Schijndel, Mandell, & Raijmakers, 2011) puisque les enfants réussissent mieux notre tâche d'alternance intermédiaire. Un point intéressant est que la tâche intermédiaire exige toujours la formulation et l'utilisation d'une règle d'ordre supérieur pour sélectionner les différentes sous-règles.

En outre, nous croyons que la comparaison entre la tâche d'alternance catégorielle complexe et le DCCS Avancé a contribué à l'idée que les difficultés rencontrées dans le DCCS peuvent être uniquement attribuables à la complexité de la structure des règles même si d'autres facteurs sont également à prendre en compte. Par exemple, une difficulté potentielle pour les enfants est de redécrire les cartes bivalentes selon les différentes règles du DCCS, mais notre tâche complexe, que nous pensons être comparable en complexité, ne fait pas usage de cartes bivalentes et apparaît comme aussi difficile que le DCCS Avancé. La difficulté ne semble donc pas être uniquement liée à la capacité à décrire un seul stimulus de multiples façons (Kloo & Perner, 2003, 2005 ; Perner & Lang, 2002 ; Zelazo, Müller, Frye, & Marcovitch, 2003). La difficulté semble être fondée sur le degré de complexité de l'ensemble des règles qui doit être gardé à l'esprit pour trier les cartes. La théorie de la Complexité et du Contrôle Cognitifs (CCC) (Zelazo & Frye, 1998) prévoit qu'une règle d'ordre supérieur est requise au sein d'une même arborescence hiérarchique dès que les règles sont emboîtées et présentent des paramètres conflictuels (Zelazo, Müller, Frye, & Marcovitch 2003, III, p. 48).

Selon cette théorie, les jeunes enfants peuvent utiliser deux règles (forme ou couleur) si elles sont présentées dans des contextes distincts, mais l'alternance entre les deux règles nécessite leur intégration sous une règle plus complexe lorsque les règles inférieures sont incompatibles. Nous pensons que ce système complexe de règles d'ordre supérieur peut être utilisé par les enfants plus âgés pour sélectionner délibérément les règles, ce qui leur permet de réussir à la fois le DCCS et la tâche complexe d'alternance catégorielle. En outre, les explications en termes de persévération ne fonctionnent pas correctement dans nos tâches d'alternance catégorielle : cette explication indique que les très jeunes enfants sont incapables de se désengager de la règle utilisée avant l'alternance et qu'ils continuent de l'appliquer au cours de la phase post-switch dans le DCCS. En effet, il peut être difficile de se désengager de la première règle pour charger les éléments de la seconde règle en mémoire de travail (Hanania, 2010 ; chez les adultes, voir Meiran, 1996 ; Rogers & Monsell, 1995). Cependant, bien que la règle utilisée avant l'alternance fût similaire dans la tâche intermédiaire, les performances étaient supérieures à celles de la tâche complexe. D'autres modèles qui mettent en valeur le rôle de l'inhibition, ce qui peut aider à limiter les effets d'interférence entre les règles (Allport & Wylie, 2000 ; Bialystok & Martin, 2004 ; Kirkham, Cruess, & Diamond, 2003), ou le rôle de la mémoire de travail (Cepeda & Munakata, 2007 ; Chevalier & Blaye, 2008 ; Morton & Munakata, 2002), peuvent mieux rendre compte de notre résultat puisque dans la tâche intermédiaire, la seconde règle est à la fois plus facile à mémoriser et à inhiber.

Cette étude soutient l'idée que la complexité conceptuelle peut être manipulée pour sonder les limites des capacités humaines vis à vis de l'information (Feldman, 2000 ; Halford, Baker, McCredden, & Bain, 2005 ; Halford, Wilson, & Phillips, 1998). Beaucoup d'autres tâches d'alternance catégorielle, en plus des trois manipulées dans la présente étude, pourraient aider à mesurer les performances de flexibilité des enfants, ainsi que la capacité des individus plus âgés. La complexité relationnelle peut être manipulée lorsque les dimensions interagissent pleinement, mais l'ensemble des interactions décrites par Halford ne produit que des problèmes qui sont isomorphes à la tâche du DCCS ou à la tâche complexe (même si un plus grand nombre de variables peut être ajouté pour augmenter la complexité de la structure intégrée). La préparation pour une action appropriée dépend étroitement de l'attention et des capacités d'inhibition, qui permettent la mise à jour des informations en mémoire de travail (Arbuthnott & Frank, 2000 ; Blaye & Chevalier, 2011 ; Diamond, 2006 ; Kirkham, Cruess, & Diamond, 2003). Cependant, il est important de noter que les fonctions exécutives, et en particulier la flexibilité cognitive, se développent en parallèle avec le langage (Deák, 2003). Du fait que le langage joue un rôle prédominant dans la flexibilité cognitive en récupérant et

en réactivant le but de la tâche à partir de la mémoire à long terme, cela pourrait expliquer pourquoi les différentes structures de règles conduisent à des performances différentes (Emerson & Miyake, 2003 ; Laurent, Millot, Andrieu, Camos, Floccia, & Mathy, soumis ; Miyake, Emerson, Padilla, & Ahn, 2004 ; Monsell, 2003).

3.4. Conclusion

Notre introduction rapporte l'évidence dans la littérature d'une progression dans les tâches d'alternance avant 5 ans, mais contrairement à l'ensemble de ces études s'intéressant à l'alternance dans des tâches hétérogènes relativement dissemblables ou essayant simplement de manipuler la tâche DCCS, nous avons cherché à tester les capacités de flexibilité au sein d'un paradigme commun. Notre étude, ajoutée à celle de Mathy, Courenq, Laurent et Millot (soumis), montre une amélioration des capacités de flexibilité cognitive liée à l'âge chez les enfants d'âge préscolaire qui ne suggère aucun changement qualitatif strict à 4/5 ans. Dans le même esprit, de la même façon qu'il a été démontré que les enfants peuvent réussir la tâche de fausse croyance avant leur quatrième anniversaire (par exemple, Rubio-Fernández & Geurts, 2012), les structures des règles d'alternance les plus simples permettent aux plus jeunes de réaliser une meilleure performance dans ce type de tâche. Considérant que la tâche du DCCS ne différencie pas avec précision les différents stades de développement entre les âges de 3 et 5 ans, l'utilisation de tâches d'alternance catégorielle de complexité croissante montre que les capacités de flexibilité cognitive se développent progressivement au cours de la période préscolaire. Bien que nos tâches aient tendance à mettre en perspective la tâche du DCCS (réussir le DCCS serait l'une des étapes de ce processus plutôt qu'une étape spécifique), nos résultats sont en accord avec la théorie de la Complexité et du Contrôle Cognitifs (CCC) qui postule qu'en grandissant, les enfants deviennent capables de se représenter des structures de règles de plus en plus complexes.

Limitations

Un aspect particulier de nos tâches est l'utilisation de stimuli univalents, qui ne rendent pas ces tâches directement comparables aux DCCS ou à d'autres tâches telles que la *task-span procedure* (Logan, 2004) dans lesquelles les stimuli sont ambigus puisque plusieurs règles peuvent être appliquées sur ceux-ci. Notre hypothèse selon laquelle les structures de décision entre la tâche complexe d'alternance catégorielle et le DCCS avancé sont similaires pourrait être critiquée pour ce motif. En effet, une différence essentielle entre les deux tâches réside

dans l'utilisation des mêmes stimuli dans le DCCS tandis que différents stimuli ont été utilisés pour la tâche complexe d'alternance catégorielle. Par conséquent, les enfants peuvent encoder deux ensembles indépendants de règles pour les deux ensembles indépendants de stimuli dans la tâche complexe sans nécessairement s'appuyer sur une structure hiérarchique intégrée. Cependant, un avantage de nos tâches d'alternance catégorielle par rapport à la tâche du DCCS est que les dimensions des cartes cibles sont différentes de celles des stimuli, ce qui élimine le clash visuel décrit par Perner et Lang (2002). Dans notre tâche, les cartes ne peuvent être classées que dans une seule catégorie, contrairement au DCCS, ce qui élimine également la difficulté de devoir redécrire les stimuli selon la règle à appliquer. Beaucoup d'autres tâches d'alternance impliquent différents ensembles de stimuli associés avec des règles différentes et ces tâches ne semblent pas, *a priori*, être moins typiques que les tâches de flexibilité utilisant les mêmes ensembles de stimuli. Un exemple classique est la tâche du Trail Making Test (TMT) dans laquelle les participants doivent alterner entre les chiffres et les lettres (Arbuthnott & Frank, 2000) ; un autre exemple dans le même article est un paradigme dans lequel les participants sont invités à juger si une lettre présentée est une voyelle ou une consonne ou si un chiffre présenté est pair ou impair. Un autre exemple plus récent est l'utilisation de trois tâches, chacune avec deux caractéristiques associées (rouge/vert pour la tâche couleur, horizontal/vertical pour l'orientation de la ligne, etc.) par Costa et Friedrich (2012) dans leur expérience 1 (voir aussi Crone, Bunge, van der Molen, & Ridderinkhof, 2006 ; Friedrich, Nelson, & Costa, 2012). Il est possible que l'utilisation de stimuli bivalents soit devenue dominante en se basant sur certaines hypothèses non fondées concernant le paradigme d'alternance, puisque les tâches d'alternance peuvent être étudiées de manière fiable à l'aide de stimuli univalents. Parce que les stimuli univalents ont une validité écologique (de nombreux scénarios dans la vie quotidienne nécessitent de répondre avec flexibilité à des stimuli univalents, e.g., je réponds à mon correspondant téléphonique, puis je fais un geste communicatif à autrui pour ne pas interférer avec la conversation téléphonique, puis je baisse le volume de la radio dont la puissance vient d'augmenter en raison des publicités, puis je ferme une vitre qu'un courant d'air vient d'ouvrir, etc., avant de reprendre la conversation), nous croyons que nos tâches stimulus-dépendant traitent des questions de la littérature sur la flexibilité.

Comme il a été indiqué précédemment, le langage joue un rôle essentiel dans la flexibilité mentale. Nous souhaitons donc utiliser une nouvelle fois nos tâches d'alternance catégorielle pour étudier dans quelle mesure le langage intérieur va intervenir dans la

réalisation de celles-ci. Pour cela nous utiliserons l'électromyographie de surface dans l'objectif d'apporter des informations supplémentaires à celles obtenues avec la méthode de suppression articulaire.

4. Effets de la suppression articulaire sur la flexibilité

Les études se focalisant sur l'implication du langage intérieur dans la flexibilité cognitive ont permis de mettre en avant différents effets. La suppression articulaire entraîne une diminution des performances des participants avec notamment une augmentation du coût d'alternance lorsque les sujets doivent par exemple alterner entre une catégorisation de chiffres comme ayant une petite (inférieure à 5) ou grande valeur (supérieure à 5) ou comme étant pair ou impair (Monsell, 2003). L'augmentation du coût d'alternance observée n'est pas due au fait que le sujet réalise deux tâches parallèlement mais bien au fait qu'il ne puisse verbaliser sa réflexion (Emerson & Miyake, 2003). On observe également une augmentation du nombre d'erreurs ainsi qu'une augmentation du temps de réponse dans les essais alternés, en comparaison avec les essais répétés. Cependant, l'effet de la suppression articulaire est en général nettement diminué lorsque des indices pertinents sont présents afin de préparer les sujets à l'une des règles de classification (Kray, 2006 ; Miyake, Emerson, Padilla, & Ahn, 2004). Emerson et Miyake (2003), dans leur tâche d'alternance mathématique avec suppression articulaire, ont montré que la présence d'indices visant à indiquer quelle opération effectuer supprimait l'augmentation du coût d'alternance, et ce d'autant plus lorsque le niveau de pertinence des indices augmentait⁹. Ces résultats indiquent que lors d'une tâche indicée, les participants n'ont pas à aller chercher en mémoire de travail la règle pertinente à appliquer, si bien que la sollicitation du langage intérieur est diminuée. Les indices conduisent donc à des coûts d'alternance similaires à ceux obtenus sans la suppression articulaire.

L'ensemble de ces travaux tend à montrer que le langage intérieur semble être impliqué dans la récupération ou la réactivation de l'objectif de la tâche à réaliser en mémoire à long terme et peut servir d'aide interne pour diriger le comportement (Emerson & Miyake, 2003 ; Liefoghe, Vandierendonck, Muylaert, Verbruggen, & Vanneste, 2005 ; Miyake, Emerson, Padilla, & Ahn, 2004). Des études ont par exemple mis en avant que la suppression articulaire entraînait chez des adultes sains des performances similaires à celles observées chez des patients souffrant de lésions du lobe frontal au test *Wisconsin Card Sorting Test*

⁹ Par exemple, la présence du signe "+" ou du signe "-", permettant d'indiquer si l'opération à effectuer était une addition ou une soustraction, entraînait de meilleures performances que des indices implicites tels que la couleur rouge pour indiquer l'addition et la couleur noire pour la soustraction.

(WCST) pour lesquelles les patients ont réalisé un nombre d'erreurs de persévération similaire (Cinan & Tanor, 2002 ; Dunbar & Sussman, 1995). Au final, le discours intérieur ne semble pas être un composant totalement indispensable pour réussir une tâche d'alternance mais il semble efficace pour coder des règles de raisonnement abstraites et faciliter les processus exécutifs.

Comme cela a été évoqué précédemment, l'utilisation de la suppression articulaire pose toutefois un problème majeur dans l'étude du rôle du langage intérieur à l'égard de la flexibilité mentale. En effet, cette méthode entraîne une interférence avec la tâche et ne permet donc pas d'analyser correctement dans quelle mesure le langage intérieur est sollicité pour permettre au raisonnement d'être flexible. Comment savoir si les résultats obtenus sont dus au fait de ne pas pouvoir recourir au langage intérieur ou au fait de réaliser parallèlement à la tâche de flexibilité une tâche nécessitant elle-même des ressources cognitives non négligeables ?

Nous proposons ici différentes expérimentations mises en place pour évaluer l'implication du langage intérieur dans la flexibilité à l'aide de l'électromyographie de surface. En outre, ces études ont été réalisées dans différentes populations de sujets afin de quantifier la sollicitation du langage en fonction de l'âge des participants puisqu'il a été notamment montré que les personnes âgées présentent de moins bonnes performances que les jeunes adultes. Nous souhaitons ainsi savoir si le langage intérieur peut servir de support pour compenser le déclin cognitif observé chez les sujets les plus âgés.

5. Étude électromyographique de la sollicitation du langage intérieur dans l'alternance de tâche chez le sujet adulte – Expérience 3

Cette étude a été mise en place afin de quantifier le rôle du langage intérieur dans des tâches d'alternance catégorielle dans lesquelles les participants devaient alterner entre deux règles relativement complexes. Contrairement aux études classiques étudiant le rôle du langage intérieur dans la flexibilité, l'objectif de la présente étude était double : proposer des tâches qui permettent aux participants de verbaliser librement leur raisonnement, et quantifier le langage intérieur. Pour cela, nous avons utilisé la méthode d'électromyographie de surface pour apporter des données supplémentaires à celles obtenues avec la méthode de suppression articulaire. Nous faisons l'hypothèse que le langage sera proportionnel à la complexité des tâches. Plus une tâche sera complexe, plus les participants auront besoin de s'auto-répéter les

règles pour les encoder durant les phases d'instructions mais également pour les appliquer pendant les phases de tri.

5.1. Matériel et méthode

Participants

Trente-cinq jeunes adultes (31 femmes et 4 hommes, $M = 19.7$ ans, $ET = 1.8$) ont volontairement participé à cette expérience. Les participants ont été recrutés parmi les étudiants de l'Université de Franche-Comté et ont tous donné un consentement écrit.

Matériel

Les trois tâches d'alternance catégorielle ont été développées et réalisées à l'aide du logiciel E-Prime2® software (Psychology Software Tools, Inc.) sur un ordinateur portable. Dans chacune de ces trois tâches, quatre images différentes (créées à l'aide du logiciel Photofiltre 6.4.0 ; Copyright © 2001- 2010 Antonio Da Cruz) devaient être catégorisées. Les trois groupes d'images mesurant $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ étaient constitués de deux formes spécifiques et de deux couleurs spécifiques par groupe (Figure 24 A, B, et C respectivement). Afin de ne pas observer de différence entre les images au niveau de l'enregistrement électromyographique, nous avons fait en sorte que le nom de chaque forme soit constitué de deux syllabes (carré, ovale, rectangle, losange, triangle et étoile) et que le nom de chaque couleur soit constitué d'une seule syllabe (bleu, rouge, gris, jaune, vert et rose). L'ordre des tâches, les types de problèmes et les groupes d'images ont été contrebalancés entre les participants.

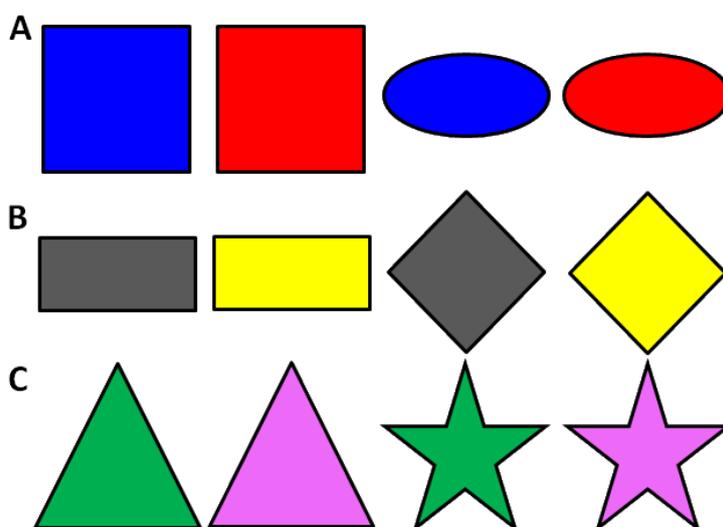


Figure 24 : Images utilisées dans nos trois tâches d'alternance catégorielle

Procédure

Chaque participant était assis à environ 50 cm de l'écran d'ordinateur dans une pièce silencieuse avec l'expérimentateur. La présence de celui-ci était nécessaire afin de noter la présence d'artefacts (par exemple, toux, déglutitions, jurons) susceptibles de contaminer l'EMG et dans le cas d'identification de tels problèmes, les données avec artefacts n'ont pas été prises en compte dans les analyses ultérieures. Les participants ont reçu comme consigne de trier les objets à gauche ou à droite à l'aide des touches L et S du clavier en suivant les instructions présentées visuellement. Aucune instruction n'a encouragé les participants à verbaliser leur pensée au cours de la tâche, mais 1) les participants ont été informés que l'expérience consistait à mesurer les verbalisations inconscientes et silencieuses et 2) les participants ont été invités à ne pas verbaliser à haute voix afin de s'assurer que les conditions d'expérimentation soient les mêmes pour tous. Les participants ont également été encouragés à répondre aussi rapidement que possible et à faire le maximum d'efforts pour éviter les erreurs. Comme pour l'expérience avec les enfants, les participants devaient réaliser trois tâches de flexibilité de complexité croissante. Chaque tâche impliquait deux règles portant chacune sur le tri de deux objets visuels (la combinaison des deux règles permettait le tri des 4 objets d'un même groupe d'images). Chacune de ces tâches était composée de cinq blocs : l'apprentissage de la première règle en triant deux stimuli avec feedback (Bloc 1), l'apprentissage de la seconde règle en triant les deux autres stimuli avec feedback (Bloc 2), l'application de la première règle sans feedback (bloc 3), l'application de la seconde règle sans feedback (bloc 4), et enfin l'alternance entre les deux règles en triant l'ensemble des quatre stimuli sans feedback (bloc 5). Le feedback (« OK » écrit en vert ou « FAUX » écrit en rouge) pour les deux premiers blocs durait 1500 ms et permettait d'informer le participant si sa réponse était correcte ou non. Les feedbacks étaient nécessaires pour permettre aux participants d'apprendre correctement les règles, mais deux blocs sans feedback ont été ajoutés afin de s'assurer que les participants seraient préparés à l'absence de feedback dans le bloc mixé. Les feedbacks ont été enlevés pendant le bloc d'alternance pour limiter l'intervalle réponse-stimulus susceptible de diminuer les coûts d'alternance. Les stimuli ont été présentés successivement dans chacun des cinq blocs. Une croix de fixation s'affichait au milieu de l'écran pendant 1000 ms avant chaque stimulus (Figure 25). Les quatre premiers blocs étaient composés de 20 essais chacun (la présentation était aléatoire et chaque stimulus apparaissait 10 fois). Le dernier bloc de chaque tâche est un bloc mixé comprenant 60 essais, chaque

stimulus étant présenté 15 fois, dans un ordre aléatoire. Au total, chaque participant a réalisé trois tâches de 5 blocs chacune, soit 15 blocs représentant un total de $(3 \times 4 \times 20) + (3 \times 1 \times 60) = 420$ essais.

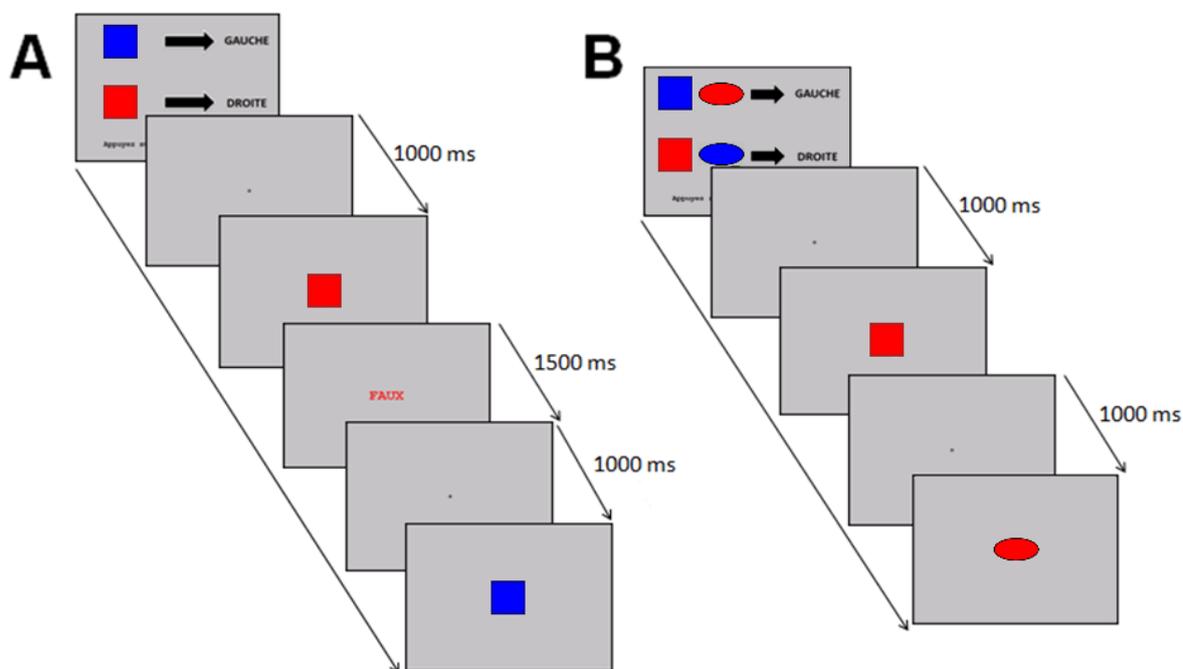


Figure 25 : Déroulement de l'expérience d'alternance catégorielle. A : Bloc simple avec feedback ; B : Bloc mixé.

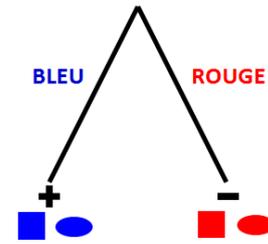
Les tâches d'alternance catégorielle

Les trois tâches utilisées dans cette expérience sont les mêmes que celles utilisées dans l'expérience 2 avec les enfants. Pour chacun de ces problèmes de complexité croissante, la règle 1 correspondait au tri de la première forme (par exemple, les carrés) et la règle 2 correspondait au deuxième type de forme (par exemple, les ovales). Chaque règle indiquait comment trier les couleurs selon la forme des stimuli. Une instruction visuelle apparaissait avant chaque bloc, indiquant aux participants comment trier les images. Les images étaient en lignes sur l'écran, chaque ligne étant suivie d'une flèche pointant vers la touche correspondant à la catégorie attribuée à l'image. Les participants pouvaient passer autant de temps que nécessaire sur les instructions afin de mémoriser les règles. Ce laps de temps était mesuré, ainsi que les signaux de langage obtenus au cours de cette période.

Les trois tâches (simple, intermédiaire, complexe) sont illustrées dans la figure 26, qui résume les structures de décision et les étapes de calcul nécessaires pour chaque problème.

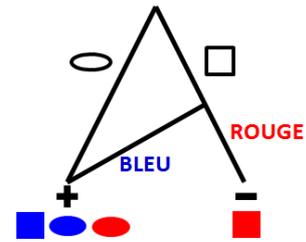
A Tâche Simple

Phases	Feedback	Gauche	Droite
1 - Règle 1	✓	■	■
2 - Règle 2	✓	●	●
3 - Règle 1	✗	■	■
4 - Règle 2	✗	●	●
5 - Alternance	✗	■ ●	■ ●



B Tâche Intermédiaire

Phases	Feedback	Gauche	Droite
1 - Règle 1	✓	■	■
2 - Règle 2	✓	● ●	■
3 - Règle 1	✗	■	■
4 - Règle 2	✗	● ●	■
5 - Alternance	✗	■ ● ●	■



C Tâche Complexe

Phases	Feedback	Gauche	Droite
1 - Règle 1	✓	■	■
2 - Règle 2	✓	●	●
3 - Règle 1	✗	■	■
4 - Règle 2	✗	●	●
5 - Alternance	✗	■ ●	■ ●

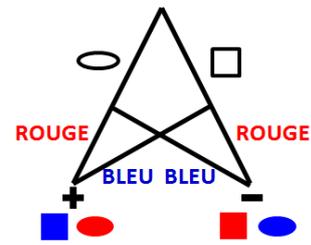


Figure 26 : Tâches d'alternance catégorielle et arbres de décision

Habituellement, le formalisme qui décrit la complexité de ces tâches est basé sur la complexité booléenne (Feldman, 2000), mais par souci de simplification, nous illustrons ici la complexité par des arbres de décision qui peuvent être associés à chaque règle de catégorisation (Figure 26). Même si on peut imaginer que les participants peuvent facilement recoder la structure intermédiaire par "carré rouge à droite, les autres à gauche", ce qui rendrait la règle de décision comparable à celle de la tâche simple (sauf que la conjonction de deux éléments serait nécessaire au lieu d'un seul pour prendre une décision), des études antérieures avec plus de 300 enfants et adultes participants (Bradmetz & Mathy 2008 ; Mathy, 2012) ont montré que ce n'est pas le cas et que la hiérarchie détermine clairement les temps d'apprentissage des problèmes ainsi que les temps de réponses lorsque les règles de tri doivent être induites sur la base d'un apprentissage supervisé.

Électromyographie de surface

Comme pour la première étude décrite ci-dessus et utilisant l'électromyographie de surface, le logiciel E-Prime logiciel a été synchronisé avec un enregistreur électromyographique (EMG 100 C, Biopac ®) fonctionnant sous le logiciel AcqKnowledge 4.1. Le dispositif d'enregistrement électromyographique et le traitement des données sont en tous points similaires à cette étude.

Plus simplement, nous avons défini la quantité de langage intérieur (QL) comme la quantité du signal EMG au cours d'une période donnée, obtenue en intégrant le signal (exprimée en mV.ms). Les temps de réponses étaient censés varier avec le QL exprimé en mV.ms, mais nous avons choisi de ne pas calculer un taux en QL/sec puisque cela ne reflète pas la quantité totale de langage généré par les stimulations. Le QL a été utilisé afin d'indiquer à la fois l'intensité et la durée du langage intérieur.

En outre, nous avons également pris en compte les mesures suivantes : le temps (ms) passé sur les instructions (avant que le participant n'appuie sur la barre d'espace), le temps de réponse (RT) en millisecondes (en excluant les réponses erronées de nos analyses), la précision de la réponse (exprimée en proportion). Suite à la terminologie utilisée par Meiran (2000, p. 236), nous avons également calculé le *switch cost* (augmentation du temps de réponse suite à un changement de tâche, soit la différence entre les temps de réponses des essais alternés et des essais répétés du bloc mixé), le *mixed-list cost* (différence entre les temps de réponses des essais répétés du bloc mixé et des essais des blocs simples) et l'*alternation cost* (différence entre les temps de réponses des essais alternés du bloc mixé et des essais des blocs simples).

Encore une fois, pour chaque participant, les trois groupes d'images étaient associés aléatoirement aux trois tâches d'alternance. La décision d'utiliser plusieurs groupes d'images a été prise pour limiter les effets de reports (*carry-over effects*). Nous postulons que les images et la complexité des tâches fonctionnent de façon indépendante de par le fait que leur interaction ne peut pas être calculée en l'absence d'un plan factoriel complet.

5.2. Résultats

Effets des consignes (bloc mixé seulement)

Nous avons observé un effet significatif de la complexité des tâches sur le temps passé sur les instructions, $F(2,68) = 55.5$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .62$, et les comparaisons post-hoc ont systématiquement différencié les trois problèmes de plus en plus complexes (respectivement

3610 ms, 6121 ms, et 13417ms, avec des écarts-types respectifs égaux à 1550, 3239, et 6956). Nous avons observé une tendance similaire pour le QL, $F(2,68) = 40.9$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .55$, respectivement de 14.6 mV.ms ($ET = 9.2$), 26.0 mV.ms ($ET = 16.8$), et 58.4 mV.ms ($ET = 38.8$) ; les analyses post-hoc ont significativement séparé les trois conditions.

Effets des blocs sur le temps de réponse, la proportion d'erreurs et le QL-RT

Les essais avec des temps de réponses s'écartant de plus de 3 écarts-types de la moyenne de l'ensemble de la distribution ou au-dessous de 200 ms ont été considérés comme des valeurs aberrantes et ont été exclus de l'analyse, ce qui correspond à 2,5% des données (cf. Goschke, 2000, p. 337). La même sélection a retiré 1,6% des données QL-RT (QL-RT représente la quantité de langage intérieur produite pendant l'intervalle de stimulus-réponse). La figure 27 représente respectivement pour chaque bloc dans les parties A, B et C les temps de réponses correctes, la proportion d'erreurs, et le QL-RT des réponses correctes. La moyenne des données et les écarts-types sont présentés en annexe 2.

Une ANOVA à mesures répétées sur les temps de réponses correctes a indiqué qu'il existe une différence significative entre les cinq blocs ($F(4,136) = 65.9$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .66$), entre les tâches ($F(2,68) = 52.3$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .61$), ainsi qu'une interaction significative entre les facteurs Blocs et Tâches ($F(8,272) = 61.5$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .64$). Un pattern similaire de significativité a été trouvé pour la proportion d'erreurs ($F(4,136) = 3.0$, $p = .021$, $\eta_p^2 = .08$; $F(2,68) = 6.4$, $p = .003$, $\eta_p^2 = .16$; $F(8,272) = 4.4$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .12$) pour le QL-RT ($F(4,136) = 41.9$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .55$; $F(2,68) = 22.5$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .40$; $F(8,272) = 33.0$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .49$).

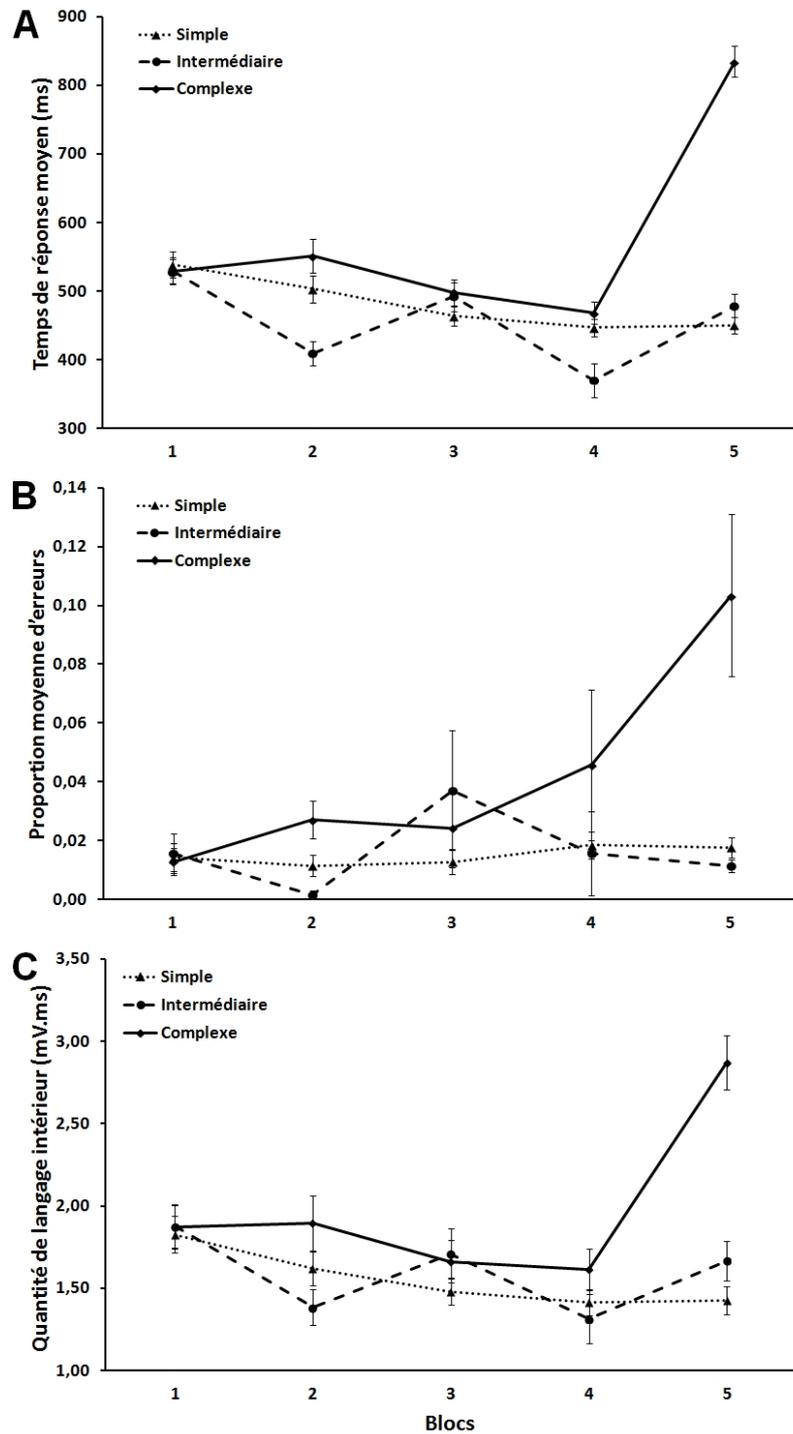


Figure 27 : Performances en fonction du numéro de bloc. A: Temps moyen de réponse correcte ; B: Proportion d'erreurs ; C: Quantité moyenne de langage intérieur pendant l'intervalle stimulus-réponse. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Les figures A, B et C montrent une diminution évidente des performances pour la tâche complexe lors du Bloc 5 (le bloc alterné). Les analyses post-hoc, en utilisant une correction de Bonferroni, ont révélé que la performance au cours de Bloc 5 pour la tâche complexe était significativement plus élevée que celle des blocs précédents pour les temps de

réponses et la quantité de langage intérieur. La tâche complexe a ainsi donné lieu à de grandes difficultés d'alternance dans le bloc mixé qui se sont traduites par une plus grande utilisation du langage intérieur. Dans le bloc mixé, l'indépendance entre les temps de réponses et la quantité de langage a été obtenue lorsque nous avons divisé QL-RT par RT (cette division a abouti à l'amplitude moyenne de QL selon RT) : bien que non significative, il a été observé une tendance à la hausse en fonction de la complexité du problème (respectivement, 0.0041 mV, 0.0044 mV, et 0.0050 mV). Pour obtenir un effet significatif, nous avons réalisé une seconde analyse basée sur l'ensemble des essais à ($F(2,5008) = 10,5, p < .001, \eta_p^2 = .004$). Malgré la faiblesse de cet effet, celui-ci tend à montrer qu'il y avait une plus grande amplitude du langage intérieur pour les problèmes les plus complexes dans le bloc mixé.

Un autre exemple d'indépendance du temps de réponse et du langage a été observé par un effet significatif de la complexité des tâches lorsque la quantité de langage a été limitée aux premières 200 ms dans le bloc mixé (la valeur de 200 ms a été choisie arbitrairement). Durant ce bref intervalle, il a de nouveau été montré une tendance à la hausse en fonction de la complexité du problème (respectivement, .63 mV.ms, .70 mV.ms, et .71 mV.ms ; $F(2,68) = 4.6, p = .014, \eta_p^2 = .12$). Nous avons observé un autre pattern similaire pendant l'intervalle réponse-stimulus qui était également constant pour chaque tâche avec une durée de 1000 ms (respectivement, 3.32 mV.ms, 3.67 mV.ms, et 3.71 mV.ms ; $F(2,68) = 4.2, p = .019, \eta_p^2 = .11$).

Alternation costs, mixed-list cost et switching costs

Ces trois types de coûts ont été calculés pour chaque participant et chaque tâche. En ce qui concerne l'*alternation cost* (moyenne des temps de réponses des essais alternés du bloc 5 – moyenne des temps de réponses des blocs 3 et 4), nous avons observé une augmentation significative de celui-ci en fonction de la complexité des tâches, $F(2,68) = 171.2, p < .001, \eta_p^2 = .83$ (les analyses post-hoc ont systématiquement séparé les trois conditions, avec comme moyenne respective 4.5, 65.0, et 438.9 ms). Un même effet global de la complexité des tâches a été trouvé pour le QL-RT ($F(2,68) = 105.3, p < .001, \eta_p^2 = .76$), pour lequel les analyses post-hoc ont discriminé les trois tâches (.001, 0.22 et 1.59 mV.ms).

Le même schéma de significativité a été trouvé pour le *mixed-list cost* (moyenne des essais répétés du bloc mixé – moyenne des essais des blocs 3 et 4) pour les deux valeurs RT et QL-RT, avec des valeurs moyennes respectives égales à 4.4 ms, 40.9 ms et 290.9 ms ($F(2,68) = 111.9, p < .001, \eta_p^2 = .77$), ces trois conditions étant discriminées par l'analyse post-hoc, et

0.02 mV.ms, 0.13 mV.ms et 1.0 mV.ms ($F(2,68) = 72.7, p < .001, \eta_p^2 = .68$). Toutefois, l'analyse post-hoc n'a pas été en mesure de discriminer de façon significative les tâches simple et intermédiaire pour le QL-RT.

Le *switch cost* moyen pour une tâche donnée était $(\text{Changement de règle} + \text{Changement de règle et de touche})/2 - (\text{Changement de touche} + \text{Aucun changement})/2$, ce qui a donné des valeurs de 9 ms, 22 ms et 138 ms respectivement pour les tâches simple, intermédiaire et complexe. Cette fois encore, la complexité des tâches a induit un large effet sur le coût d'alternance ($F(2,66) = 224.1, p < .001, \eta_p^2 = .87$, avec une discrimination de la tâche complexe dans les analyses post-hoc), et sur la quantité de langage ($F(2,66) = 85.9, p < .001, \eta_p^2 = .72$), avec une différenciation des trois tâches dans les analyses post-hoc).

La figure 28 montre le temps de réponse moyen selon le type de switch ainsi que la quantité de langage sollicitée. La condition "Changement de touche" implique un changement de bouton réponse sans changement de règle, la condition "Changement de règle" implique un changement de règle sans changer de touche réponse et la condition "Changement de touche et de règle" implique de changer à la fois de bouton réponse et de règle. Lorsque nous avons pris en considération la tâche complexe uniquement, nous avons observé un effet principal du type de switch sur le temps de réponse ($F(3,99) = 29.7, p < .001, \eta_p^2 = .47$) et sur le langage ($F(3,99) = 31.0, p < .001, \eta_p^2 = .49$). Les analyses post-hoc ont permis de différencier toutes les conditions sauf "Changement de touche" et "Changement de touche et de règle". Le pattern des résultats concernant les temps de réponses, semblable à celui obtenu par Meiran (2000), indique que l'activation persistante de la touche-réponse précédente peut interférer avec la tâche suivante. Ce qui est nouveau, c'est que cet effet est associé à une plus grande verbalisation.

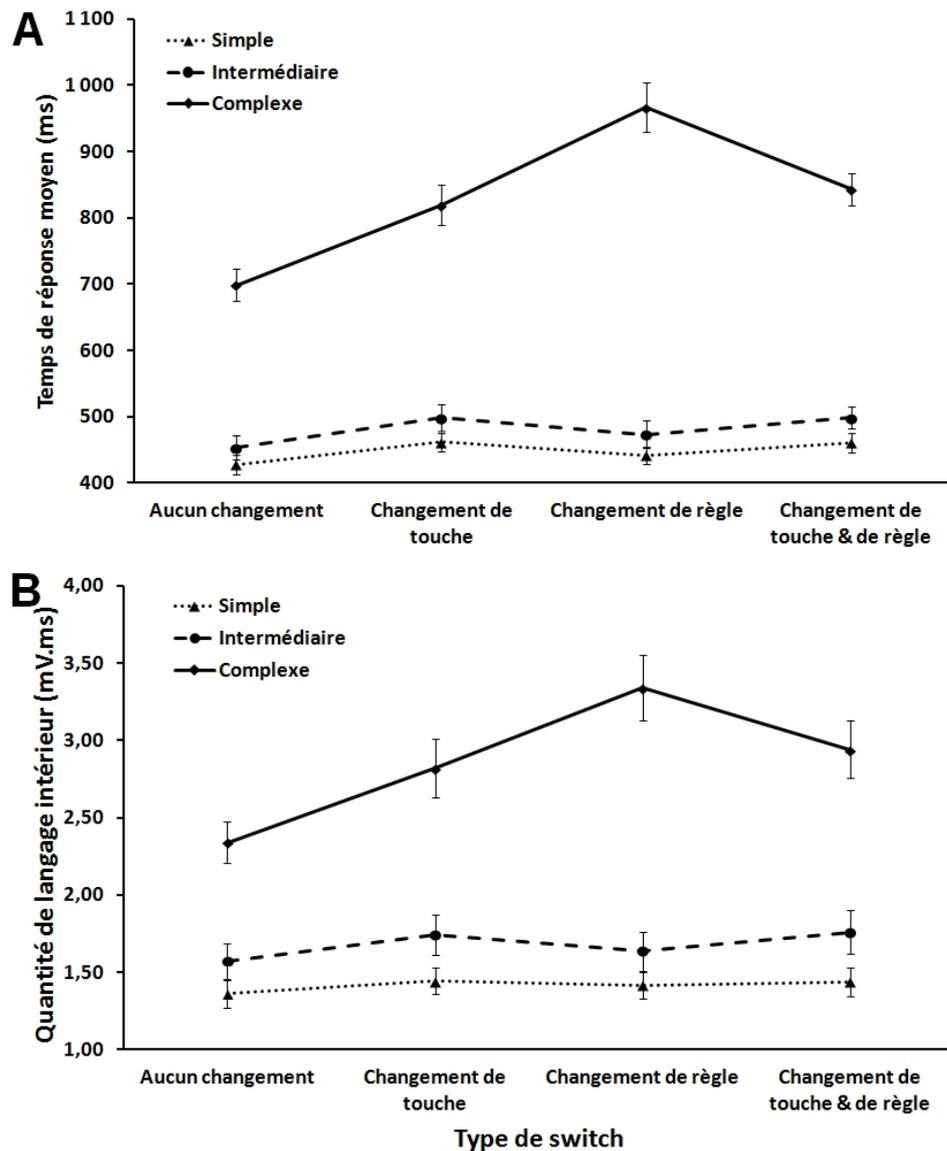


Figure 28 : Temps de réponse en fonction du type d'alternance et de la complexité des tâches. La condition "Changement de touche" implique de changer de touche réponse sans changer de règle. La condition "Changement de règle" implique de changer de règle mais pas de touche réponse. La condition "Changement de touche et de règle" implique de changer à la fois de règle et de touche réponse. Les barres d'erreurs représentent + / - une erreur standard.

Corrélations

Nous avons constaté une corrélation substantielle entre le QL et les temps de réponses lorsque nous avons pris en compte tous les essais des participants (420 essais × 35 participants, moins les essais pour lesquels la réponse est fautive et pour lesquels le temps de réponse est aberrant) pour la totalité des blocs et des tâches, avec une corrélation globale de Pearson égal à $r = .72$ ($p < .001$; $N = 13868$). Lorsque nous avons réalisé une régression multiple sur les temps de réponses correctes en utilisant plusieurs variables indépendantes

(numéro de bloc, complexité des tâches et QL), le plus grand coefficient était QL ($\beta_{QL} = .70$, $p < .001$, $R^2 = .54$, $N=13867$).

5.3. Discussion

Notre objectif principal était d'étudier le rôle du langage intérieur dans les processus de flexibilité en utilisant l'électromyographie de surface. Les participants ont été invités à effectuer trois tâches de catégorisation de complexité croissante. Nous avons émis l'hypothèse que la quantité de langage intérieur serait proportionnelle à la complexité des tâches. Les résultats suggèrent que l'électromyographie de surface semble être une méthode efficace pour quantifier le langage intérieur lorsqu'il est utilisé en conjonction avec des variables comportementales plus traditionnelles telles que le temps de réponse. Au cours de l'apprentissage des règles, les participants ont systématiquement sollicité le langage intérieur, la force de cette dépendance augmentant avec le niveau de complexité des tâches. Dans l'ensemble, nous avons trouvé une corrélation entre la quantité de langage produite par les participants pendant les réponses et les temps de réponses. Notre analyse par Bloc a suggéré une baisse de performance pendant le bloc mixé, ce qui a entraîné une augmentation du langage intérieur qui a été particulièrement sensible à la tâche complexe. Des études antérieures sur l'usage du langage intérieur ont simplement permis de montrer que la suppression du langage intérieur conduit à une baisse des performances d'alternance (Baddeley, Chincotta, & Adlam, 2001 ; Cinan & Tanor, 2002 ; Dunbar & Sussman, 1995 ; Emerson & Miyake, 2003 ; Goschke, 2000 ; Jersild 1927 ; Kray, Eber, & Lindenberger, 2004 ; Miyake, Emerson, Padilla, & Ahn, 2004 ; Saeki, Saito, & Kawaguchi, 2006). Notre étude complète ces résultats en démontrant le rôle du langage dans l'alternance.

Nos tâches d'alternance catégorielle ont été conçues pour réduire le contrôle endogène (c'est-à-dire lorsque la présence d'indice annonce le switch), tandis que la nécessité d'alterner était toujours présente. Nos résultats nuancent légèrement les résultats antérieurs (Baddeley, Chincotta, & Adlam, 2001 ; Bryck & Mayr 2005) qui ont montré que la verbalisation n'est pas indispensable en l'absence de mécanismes ascendants indiquant quelle tâche est pertinente. Le contrôle est plus exogène dans les tâches d'alternance catégorielle pour laquelle les alternances sont indicées par les stimuli. Pourtant, le langage intérieur était présent dans nos résultats et peut avoir ainsi régulé le contrôle exécutif d'une manière subtile, par exemple en aidant à la mise à jour de la tâche appropriée. Cela signifie que la verbalisation pourrait être encore plus intense dans les tâches endogènes.

Nos résultats tendent à montrer que le langage intérieur a été sollicité en particulier pour pouvoir alterner entre les règles de la tâche complexe. Cette tendance était corrélée avec une plus grande proportion d'erreurs et des temps de réponses plus longs. Le coût d'alternance inhérent à la tâche complexe a été à l'origine d'une plus grande sollicitation du langage intérieur que pour les deux autres tâches, ce qui signifie que l'usage de la parole intérieure dans cette tâche a soit prolongé le temps de réponse, soit reflété les processus de décision logique. Toutefois, ce résultat ne traite pas directement la question de savoir si les coûts d'alternance ont reflété le temps requis pour reconfigurer le système cognitif de la nouvelle tâche ou l'inertie de la tâche. Les effets de congruences entre les tâches (Wendt, Kiesel, Mathew, Luna-Rodriguez, & Jacobsen, 2013) ont aussi semblé stimuler les performances puisqu'il a été observé une réponse plus tardive et une verbalisation plus faible lorsque les participants devaient à la fois changer de touche-réponse et de règle que lorsqu'ils devaient seulement changer de règle sans avoir à changer de bouton-réponse. Ceci indique que l'activation persistante de la touche-réponse précédente peut interférer avec une tâche subséquente (autrement interprété comme un effet de report de l'association S-R précédente, par exemple, Crone, Bunge, van der Molen, & Ridderinkhof, 2006).

Complexité des tâches

Nos résultats montrent que les trois tâches ont impliqué différents niveaux de difficulté puisque la proportion d'erreurs, le temps passé sur les instructions, et la quantité de langage intérieur sollicité pendant les phases d'apprentissage ont augmenté avec la difficulté, bien que non systématiquement. Les deux tâches les plus simples étaient trop faciles pour recruter l'utilisation des processus de la parole, et des effets planchers ont été observés dans les blocs mixés. Ce n'était pas le cas pour les expérimentations effectuées avec les enfants d'âge préscolaire qui ont confirmé le classement de nos trois tâches d'alternance, la tâche intermédiaire se situant entre les deux autres, sur la base des proportions moyennes d'erreurs et sur les implications logiques entre les taux de réussite aux différentes tâches (Mathy, Courenq, Laurent, & Millot, soumis). Pris ensemble, les présents résultats ne sont pas strictement conformes à l'idée que la difficulté d'un problème de catégorisation dépend de la compressibilité de l'information qui peut être accessible pour coder le problème.

Il y a donc une possibilité que les participants de cette étude aient pu utiliser une autre stratégie pour rendre la tâche intermédiaire plus facile comme par exemple utiliser la règle "carré rouge à droite, sinon touche gauche", notamment parce que les règles ont été

enseignées au lieu d'être découvertes comme dans des tâches de classification inductives. Bien que cette stratégie nécessite de traiter deux éléments au lieu d'un seul pour le problème le plus simple, la structure de décision se réduit à une structure qui ne nécessite pas un processus d'alternance. Nous pouvons cependant affirmer que les participants ont plus utilisé le langage intérieur pour la tâche complexe que pour les deux autres tâches lors des phases de catégorisation (notamment dans le bloc mixé). Cela a été révélé par une plus grande quantité de langage produit entre le stimulus et la réponse (ce qui suggère un lien entre les signaux de parole et de la complexité des arbres de décision).

Switch Cost

Les analyses effectuées sur les blocs mixés uniquement ont montré que le coût d'alternance, mesuré par la différence entre les essais répétés et les essais alternés, augmentait avec la complexité des tâches (ce qui est consistant avec les résultats de Rubinstein, Meyer, & Evans, 2001), et particulièrement pour la tâche complexe. Toutefois, en contraste avec d'autres observations (Arbuthnott & Frank, 2000 ; Arrington & Logan, 2004 ; Blaye & Chevalier, 2011 ; Diamond, 2006 ; Dias, Robbins, & Roberts, 1996 ; Kirkham, Cruess, & Diamond, 2003 ; Monsell, 2003 ; Rogers & Monsell, 1995), nos résultats n'ont pas permis d'identifier clairement un pattern tel que *aucun changement* < *changement de touche* < *changement de règle* < *changement de touche et de règle* pour toutes les tâches. Cependant, les analyses post-hoc pour la tâche complexe ont différencié la condition "changement de touche" de la condition "changement de règle", ce qui suggère que l'inertie est plus grande pour une règle que pour une réponse, ou à l'inverse, que la reconfiguration mentale (*task-set reconfiguration*) est plus facile pour une réponse que pour une règle. Nous pensons que ceci est dû au fait que, dans l'arbre de décision, un retour à la racine de l'arbre est nécessaire pour un changement de règle. Ceci est en accord avec le fait que l'absence d'un changement de règle est plus facile parce que la règle est déjà présente en mémoire de travail, à l'inverse des conditions avec changement de règle pour lesquelles la règle pertinente doit être récupérée en mémoire à long terme (Mayr & Kliegl, 2000).

Limitations

Comme nous l'avons évoqué dans l'expérience précédente, un aspect particulier de nos tâches est l'utilisation de stimuli univalents, qui ne rendent pas les tâches strictement comparables à d'autres tâches pour lesquelles les stimuli sont ambigus car plusieurs règles peuvent leur être appliquées (comme dans le DCCS par exemple, Diamond & Kirkham, 2005

; Frye, Zelazo, & Palfai, 1995). Nos résultats sont également intéressants en comparaison à ceux des Jersild (1927) qui a l'origine n'a trouvé aucun coût d'alternance en utilisant des listes d'alternances univalentes. Bien que les coûts d'alternance soient plus importants avec des stimuli bivalents que lorsque les stimuli sont associés à leur propre tâche (Allport, Styles, & Hsieh, 1994 ; Bryck & Mayr 2005 ; Costa & Friedrich, 2012 ; Crone, Bunge, van der Molen, & Ridderinkhof, 2006 ; Friedrich, Nelson, & Costa, 2012 ; Jersild, 1927 ; Lien, Ruthruff, & Kuhns, 2008 ; Rogers & Monsell, 1995 ; Ruthruff, Remington, & Johnston, 2001), de nombreuses autres tâches impliquant différents types de stimuli associés à des tâches différentes ne semblent pas être, *a priori*, moins typiques que l'exécution des tâches utilisant les mêmes ensembles de stimuli (Arbuthnott & Frank, 2000 ; Strobach, Liepelt, Schubert, & Kiesel, 2012 ; Wendt, Kiesel, Mathew, Luna-Rodriguez, & Jacobsen, 2013).

Conclusion

Contrairement aux études utilisant la suppression articulatoire, l'utilisation de l'électromyographie de surface dans notre procédure nous a permis d'explorer le langage intérieur sans perturber l'exécution des tâches. Nos résultats indiquent que le langage intérieur soutient probablement la régulation et la planification des comportements complexes grâce à sa fonction extra-communicative. Le langage semble jouer un rôle prédominant dans les tâches de flexibilité monovalentes, permettant ainsi aux stimuli d'être encodés et aux décisions logiques d'être associées à l'information verbale.

L'objectif des deux expériences suivantes est une nouvelle fois d'étudier le rôle du langage intérieur dans la flexibilité cognitive mais en s'intéressant cette fois-ci à l'effet de l'âge. Comme cela a été abordé dans l'introduction, des études ont mis en avant que le coût d'alternance est plus important chez les enfants et les personnes âgées (Cepeda, Kramer, & Gonzalez de Sather, 2001 ; Kray & Lindenberger, 2000 ; Kray, Eber, & Lindenberger, 2004 ; Reimers & Maylor, 2005 ; Salthouse, 1998 ; Salthouse, Fristoe, McGuthry, & Hambrick, 1998 ; Zelazo, Craik, & Booth, 2004). Des études ont rapporté que le déclin cognitif lié à l'âge impliquait une détérioration sélective des fonctions exécutives en raison de leur vulnérabilité vasculaire (Raz, Dahle, Rodrigue, Kennedy, & Land, 2011 ; Silver, Goodman, & Bilker, 2009 ; West, 1996). Nous souhaitons donc étudier dans quelle mesure le langage va être sollicité par les participants les plus âgés afin de soutenir les fonctions exécutives.

6. Étude de la sollicitation du langage intérieur dans l'alternance de tâches et effet de l'âge - Expériences 4 et 5

Ces deux études visent à quantifier le rôle du langage dans des tâches de flexibilité catégorielle requérant d'alterner entre deux règles plus ou moins complexes. Nous proposons de mettre en évidence des difficultés d'alternance proportionnelles à la complexité des règles, à la complexité des stimuli mais également une augmentation des difficultés d'alternance avec l'âge, en faisant l'hypothèse qu'un recours au langage intérieur est à la fois plus important avec l'âge et avec la difficulté des règles. L'idée est que le langage permet de soutenir les processus exécutifs lorsqu'ils sont hautement sollicités. Cette fonction du langage est parfois appelée extra-communicative (Lupyan, 2009), dans le sens où elle permet d'amplifier de façon non nécessaire l'information symbolique en information lexicale (Deák, 2003). Le langage peut se révéler ainsi être un support important dans la catégorisation même lorsque des réponses non-verbales sont attendues (Lupyan, 2009). A l'intérieur de l'arbre de décision, le langage intérieur va permettre aux participants de se déplacer mentalement d'une branche à l'autre mais également de retourner à la racine de l'arbre dans l'objectif de s'adapter plus facilement aux changements de règles imposées par la tâche. Les tâches utilisées dans cette étude sont les mêmes que celles employées dans l'expérience 2. Les participants devaient réaliser aléatoirement trois tâches de flexibilité de difficulté simple, intermédiaire et complexe avec en parallèle la réalisation d'un enregistrement électromyographique afin de quantifier le langage produit par les sujets tout au long de l'expérience.

6.1. Matériel et méthode

Participants

Trente jeunes adultes (16 femmes et 14 hommes, $M = 23.7$ ans ; $ET = 3.4$), vingt-deux adultes d'âge modéré (13 femmes et 9 hommes, $M = 50.6$ ans ; $ET = 5.6$) et vingt-et-une personnes âgées (15 femmes et 6 hommes, $M = 76.5$; $ET = 9.8$) ont participé volontairement à cette étude. Les trois groupes sont respectivement labélisés 25, 50 et 75 ans dans les analyses suivantes. Le groupe des 25 ans a été recruté à l'Université de Franche Comté. Le groupe des 50 ans est constitué de sujets dont tous (excepté deux) ont suivi des études supérieures et exercent toujours une activité professionnelle. Les participants de 75 ans ont été principalement recrutés dans des foyers logement de Besançon. Les plus jeunes d'entre eux

ont été recrutés à l'Université Ouverte. Tous les participants ont donné leur consentement écrit.

Méthode

Cette fois encore, les tâches de catégorisation ont été élaborées et exécutées à l'aide du logiciel E-Prime2® (Psychology Software Tools, Inc.) sur un ordinateur portable. Les images utilisées dans cette étude ont été créées à l'aide du logiciel Photofiltre 6.4.0 (Copyright © 2001- 2010 Antonio Da Cruz). Il s'agit des mêmes stimuli utilisés dans l'expérience 2 chez les enfants préscolaires (Figure 29). Ces trois classes d'images ont été choisies de façon à solliciter à des degrés divers le langage chez les sujets. L'hypothèse est que des formes ou couleurs fondamentales telles que les *rond*, *carré*, *bleu*, *rouge* ne nécessitent pas un recodage verbal complexe, au contraire des formes et couleurs telles que *pentagone*, *étoile*, *hachurée verticalement*, *hachurée horizontalement*, qui sont à la fois moins habituelles et plus longues à coder phonologiquement, et au contraire des formes totalement abstraites qui nécessitent un codage nouveau (par exemple, le "truc" courbé avec des trous) ou une association nouvelle à un objet connu (par exemple, la genouillère ; cette condition est donc plus exploratoire dans le sens où elle présente le risque que les images ne soient traitées que sur un plan perceptuel si le sujet ne parvient pas à faire une analogie avec des objets existants).

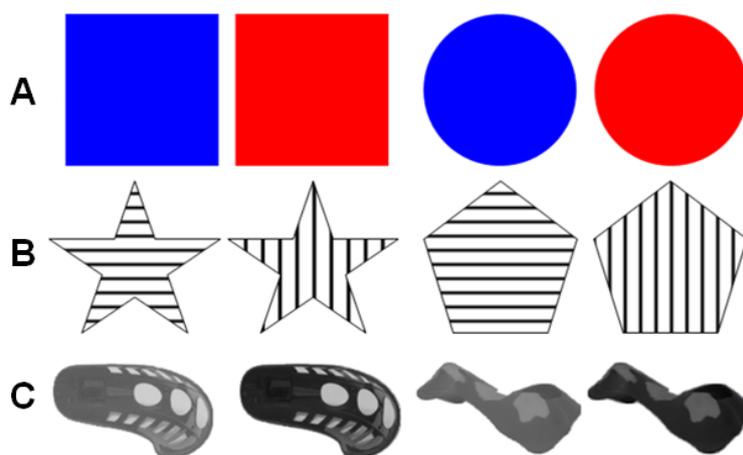


Figure 29 : Images utilisées dans l'étude. A : images simples ; B : images intermédiaires ; C : images complexes. Note. Les deux images de gauche étaient toujours associées à la première règle.

Le logiciel E-Prime a été synchronisé avec un électromyogramme (EMG 100 C, Biopac®) fonctionnant avec le logiciel AcqKnowledge 4.1. Chaque participant a été placé à 50 cm d'un écran d'ordinateur dans une salle calme en présence de l'expérimentateur. Le

dispositif électromyographique ainsi que le traitement des données électromyographiques sont en tous points similaires aux autres expériences décrites.

Procédure

Les tâches de catégorisation sont les mêmes que celles des expériences 2 et 3. La seule différence avec l'expérience 3 réside dans le nombre de stimuli présenté aux participants. Les blocs 1 à 4 étaient constitués de 8 essais (chaque stimulus apparaissait donc quatre fois), et le bloc 5 (bloc mixé) était constitué de 16 essais (4×4 stimuli). Pour plus de détails, se référer à la partie matériel et méthode de l'expérience 3.

Avant l'expérience, une évaluation cognitive des participants de 75 ans a été effectuée via des tests neuropsychologiques afin de retirer de l'étude toute personne souffrant d'éventuels troubles cognitifs pouvant fausser les résultats. Les participants ont pour cela effectué le test de dépistage des démences (Mini-Mental State Examination, MMSE), test permettant de réaliser une évaluation globale des capacités cognitives. Une mesure de l'intelligence fluide a été réalisée grâce aux matrices de Raven. Les capacités en mémoire de travail ont été testées à l'aide de la tâche de Séquence Lettres-Chiffres, un subtest du WISC IV. L'évaluation de la flexibilité mentale, fonction centrale de notre étude, a été permise à l'aide du Trail Making Test et du test du Stroop. Enfin, une tâche de fluence verbale et catégorielle couplant l'évaluation des capacités langagières et mémorielles a été réalisée.

6.2. Résultats

Les participants n'ayant pas passé les neuf conditions correspondant au plan factoriel Difficulté de la tâche × Complexité des stimuli, deux ANOVAs à mesures répétées ont été effectuées pour le facteur Type de tâche et pour le facteur Type de stimuli, avec la variable Âge comme facteur inter-sujet pour chaque ANOVA. Cependant, certaines analyses ont été menées avec tous les essais (144 essais par participant), en tenant compte du Type de tâche et du Type de stimuli comme facteurs inter-sujets pour tester leur interaction.

Pour réaliser les ANOVAs à mesures répétées, les données ont été agrégées afin d'obtenir une mesure unique moyenne par participant pour chaque variable dépendante. La même méthode d'agrégation a été utilisée pour les ANOVAs à mesures répétées effectuées pour les facteurs Blocs et Type de switch. Des comparaisons par paire au moyen d'un ajustement de Bonferroni ont été calculées pour toutes les conditions de chaque facteur intra-

sujet. Ayant déjà abordé l'effet de la difficulté des tâches dans les expériences précédentes, nous nous attarderons plus en détail sur les effets liés à l'âge.

Les essais présentant des temps de réponses s'écartant de plus de trois écarts-types de la moyenne de l'ensemble de la distribution ou inférieurs à 200 ms ont été exclus des analyses, ceci correspondant à 1.5 % des données (similaire à Goschke, 2000, p. 337). La même sélection (quantité de langage s'écartant de plus de trois écarts-types de la moyenne) a retiré 1.0 % des données EMG.

Les tests cognitifs effectués chez les participants de 75 ans n'ont pas révélé de participant présentant des troubles cognitifs, leurs scores individuels étant similaires aux scores moyens de cette population d'âge. De ce fait, l'ensemble des résultats de ce groupe a été conservé pour les analyses suivantes. Les scores moyens obtenus par les participants sont visibles dans l'annexe 3. Concernant les données EMG, 3 personnes du groupe des 75 ans ont refusé l'utilisation des électrodes et les données de 2 personnes de ce même groupe ont dû être retirées des analyses suite à un problème d'électrodes. Les analyses effectuées sur les données EMG des personnes âgées n'ont donc porté que sur 16 personnes au lieu de 21.

Temps de réponse, quantité de langage et proportion d'erreur en fonction des blocs

Les données moyennes et écarts-types sont visibles dans l'annexe 4.

Temps de réponse :

L'analyse de variance univariée réalisée a montré un effet des blocs sur le temps de réponse moyen, $F(4,280) = 50.4$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .42$, avec pour chaque bloc un temps moyen respectif de 864 ms ($ET = 354$), 750 ms ($ET = 285$), 735 ms ($ET = 329$), 645 ms ($ET = 264$) et 871 ms ($ET = 293$). Les comparaisons par paire effectuées étaient toutes significatives ($p_s < .001$) excepté entre le Bloc 1 et le Bloc 5 ($p = 1$), ainsi qu'entre le Bloc 2 et le Bloc 3 ($p = 1$). La diminution régulière du temps de réponse dans les Blocs 2 et 4 (comparée à celle des Blocs 1 et 3) suggère qu'il n'était pas difficile pour les participants de se désengager de la première règle pour apprendre la seconde. L'augmentation observée dans le Bloc 5 suggère que la demande cognitive liée à l'alternance entre les règles a un impact négatif sur le processus de décision. On a également observé un net effet de l'âge sur les temps de réponses, $F(2,70) = 43.8$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .56$, avec des comparaisons par paire révélant trois groupes distincts. Les moyennes sont respectivement de 577 ms, 737 ms, et 1092 ms, avec des temps de réponses qui ont augmenté avec l'âge (Figure 30).

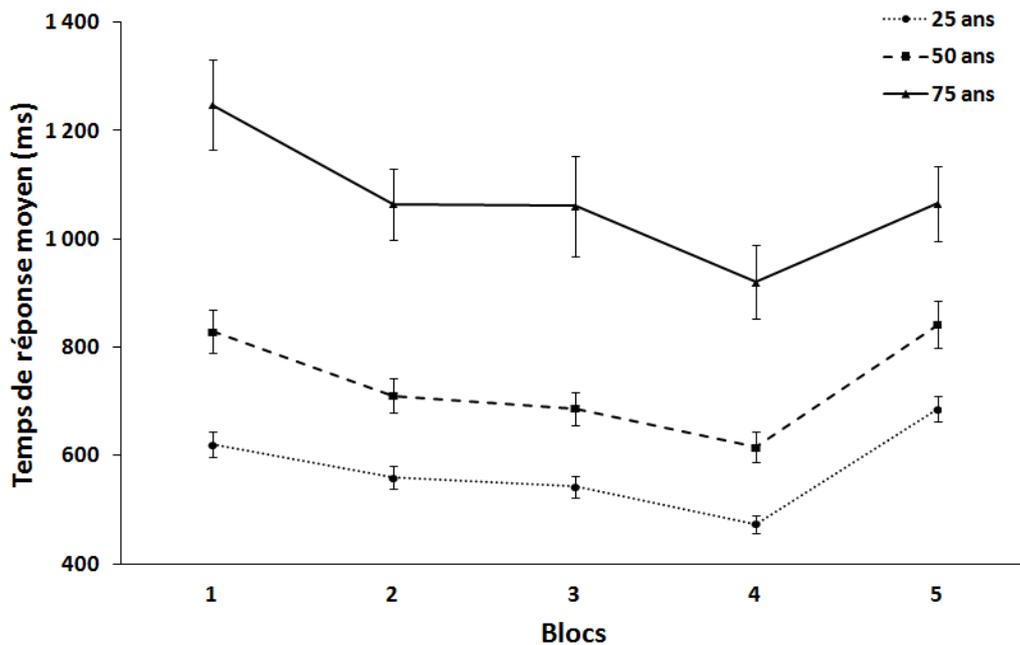


Figure 30 : Temps de réponse moyen (ms) en fonction des cinq blocs de classification et des trois classes d'âge : 25, 50 et 75 ans. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Bien que les courbes semblent parallèles sur la figure 30, il existe quelques variations entre les différents temps de réponses qui expliquent l'interaction significative entre les variables Âge et Bloc, $F(8,280) = 5.0$, $p = .009$, $\eta_p^2 = .13$. Cette interaction semble due à la plus importante différence entre les groupes dans le premier bloc que dans le cinquième.

Proportion d'erreurs (Figure 31) :

L'ANOVA réalisée sur la proportion d'erreurs dans les Blocs 1 à 5, respectivement .07 ($ET = .07$), .04 ($ET = .05$), .03 ($ET = .06$), .04 ($ET = .07$) et .10 ($ET = .11$), a indiqué une différence significative entre les cinq conditions, $F(4,280) = 16.5$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .19$. Les comparaisons par paire effectuées ont montré des taux d'erreurs plus élevés dans le Bloc 1 que dans les Blocs 2, 3 et 4 ($p < .05$) et une proportion d'erreurs nettement plus élevée dans le Bloc 5 que dans les Blocs 1, 2, 3 et 4 ($p_s < .01$), principalement due à la très forte augmentation du nombre d'erreurs pour les 75 ans dans la tâche complexe. Il n'existe pas d'effet principal de l'âge ($F(2,70) = 2.9$, $p = .06$) sur la proportion d'erreurs (les proportions moyennes sont respectivement de .05, .05, et .08). Les résultats ont montré une interaction significative entre les facteurs Âge et Blocs, $F(8,280) = 5.2$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .13$, due à la forte diminution des performances dans le Bloc 5 chez les 75 ans (la proportion d'erreurs dans le cinquième bloc était significativement plus grande que celles des blocs précédents pour ce groupe d'âge, montrant ainsi l'effet préjudiciable de l'alternance chez les participants âgés).

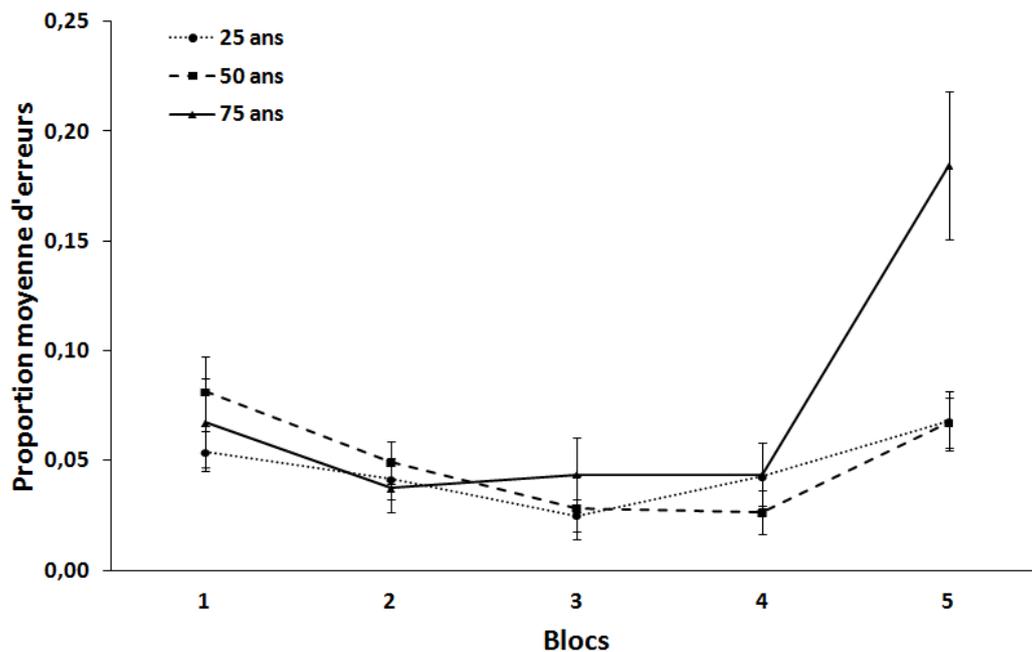


Figure 31 : Proportion moyenne d'erreurs effectuées par les participants de 25, 50 et 75 ans en fonction des blocs de classification. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Quantité de langage intérieur pendant les temps de réponses (EMG-RT) :

La quantité moyenne de langage produite durant l'intervalle stimulus-réponse (EMG-RT) en fonction des Blocs (1 à 5) a suivi un pattern proche de celui des temps de réponses (Figure 32), à l'exception de la plus faible augmentation dans le Bloc 5 : 4.33 mV.ms ($ET = 2.21$), 3.50 mV.ms ($ET = 1.65$), 3.30 mV.ms ($ET = 1.89$), 2.95 mV.ms ($ET = 1.53$) et 4.14 mV.ms ($ET = 1.84$) respectivement pour les Blocs 1 à 5, $F(4,260) = 41.2$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .39$. Les comparaisons par paire ont montré une quantité de langage supérieure dans le Bloc 1 par rapport aux Blocs 2, 3 et 4 ($p < .001$), inférieure dans le Bloc 4 par rapport aux Blocs 1, 2, 3 et 5 ($p < .01$), et supérieure dans le Bloc 5 par rapport aux Blocs 2, 3 et 4 ($p < .01$). Les analyses ont révélé un effet de l'âge, $F(2,65) = 13.2$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .29$. Les comparaisons par paire effectuées ont mis en avant deux groupes distincts, les moyennes étant respectivement de 2.79 et 3.7 pour les groupes de 25 et 50 ans statistiquement indifférenciés, et de 5.11 pour les 75 ans. Aucun effet d'interaction n'a été mis en avant entre les facteurs Âge des participants et les Blocs, $F(8,260) = 1.59$, $p = .128$ (Figure 32).

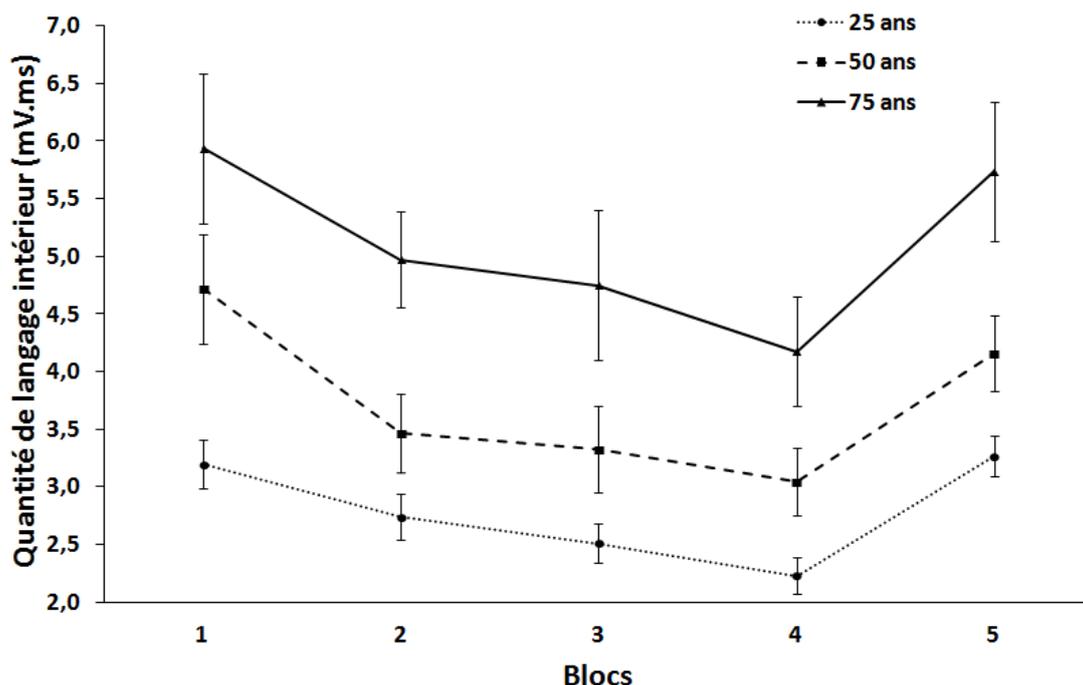


Figure 32 : Quantité moyenne de langage (mV.ms) en fonction des blocs de classification et des groupes d'âge. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Effets de la complexité des stimuli

Nous présentons successivement les analyses effectuées sur le temps passé sur les instructions, la quantité de langage intérieur durant les instructions, les temps de réponses, la quantité de langage intérieur durant les temps de réponses, et la proportion d'erreurs. Ces analyses sont limitées au Bloc 5 correspondant au bloc dans lequel les participants doivent alterner entre les deux règles vues dans les blocs précédents.

Temps passé sur les instructions :

Quand les trois groupes d'âges sont combinés, les valeurs moyennes du temps passé sur les consignes étaient 9409 ms ($ET = 8858$), 12547 ms ($ET = 10636$), et 11770 ms ($ET = 8942$) pour les stimuli simple, intermédiaire et complexe. L'ANOVA n'a pas révélé d'effet significatif du type de stimulus sur le temps passé sur les instructions, $F(2,140) = 2.9$, $p = .061$. L'âge des participants a un impact significatif sur le temps passé sur les instructions, $F(2,70) = 24.3$, $p < .001$, $\eta^2_p = .41$. Les comparaisons par paire ont montré que les 75 ans passaient significativement plus de temps sur les instructions ($M = 17719$ ms, $ET = 11904$) que ne l'ont fait les 50 ans ($M = 10267$ ms, $ET = 8093$) et les 25 ans ($M = 7423$ ms, $ET = 5688$) qui n'ont pu être différenciés. Les résultats ne montrent également aucune interaction entre les facteurs Age et Complexité des stimuli $F(4,140) = 0.26$, $p = .901$,

suggérant ainsi un pattern similaire du temps passé sur les instructions pour les trois groupes d'âge en fonction de la complexité des stimuli.

Quantité de langage intérieur produite pendant les instructions :

Tous âge confondu, les différences de quantité de langage intérieur produite pendant les phases d'instruction en fonction du type de stimuli n'étaient pas significatives $F_{\text{stim}}(2,130) = 1.2, p = .310$, avec des quantités moyennes de 70 mV.ms ($ET = 99$), 85 mV.ms ($ET = 105$), et 92 mV.ms ($ET = 133$) pour les stimuli simple, intermédiaire et complexe. Cette fois encore, un effet de l'âge a été observé, $F(2,65) = 10.8, p < .001, \eta^2_p = .25$. Les comparaisons par paire ont en effet montré une quantité de langage supérieure chez les 75 ans ($M = 152, ET = 178$) que chez les 50 ans ($M = 81, ET = 94$) et les 25 ans ($M = 46, ET = 45$). Aucune interaction n'a été observée entre les facteurs Âge et Complexité des stimuli $F(4,130) = 0.88, p = .480$.

Temps de réponse moyen :

Les résultats concernant le temps moyen de réponses correctes selon la complexité des stimuli n'ont une nouvelle fois montré aucune différence significative $F(2,140) = 2.1, p = .128$, avec des temps moyens de 819 ms ($ET = 452$), 966 ms ($ET = 478$) et 909 ms ($ET = 422$) pour les stimuli simple, intermédiaire et complexe. Un effet de l'âge a été mis en avant, $F(2,70) = 30.4, p < .001, \eta^2_p = .47$, avec des temps de réponses qui augmentent systématiquement avec l'âge des participants (702 ms, 878 ms et 1199 ms respectivement pour les 25, 50 et 75 ans). Nous n'avons observé aucune interaction entre ces deux facteurs, $F(4,140) = 1.0, p = .40$.

Electromyographie pendant les temps de réponses :

En ce qui concerne la quantité de langage intérieur produite pendant l'intervalle stimulus-réponse, nous n'avons observé aucun effet du type de stimulus $F(2,130) = .04, p = .97$, avec des données moyennes de 4.10 mV.ms ($ET = 3.49$), 4.39 mV.ms ($ET = 2.68$) et 4.49 mV.ms ($ET = 2.78$) respectivement pour les stimuli simple, intermédiaire et complexe. Le facteur Âge a un effet significatif sur la quantité de langage intérieur sollicité, $F(2,65) = 12.5, p < .001, \eta^2_p = .28$. Les comparaisons par paire ont montré une quantité de langage supérieure pour les 75 ans ($M = 6.02$ mV.ms) par rapport aux participants de 25 ans ($M = 3.36$ mV.ms). Les participants de 50 ans n'ont pu être distingués des deux autres groupes ($M = 4.40$

mV.ms). Nous n'avons observé aucune interaction entre ces deux facteurs, $F(4,130) = 1.9$, $p = .11$.

Proportion d'erreurs :

Enfin, l'analyse des proportions d'erreurs a conduit à un effet significatif du type de stimulus, $F(2,140) = 5.0$, $p = .008$, $\eta_p^2 = .07$, avec des comparaisons par paire permettant seulement de différencier les stimuli simples ($M = .05$, $ET = .12$) des stimuli complexes ($M = .14$, $ET = .20$). La proportion d'erreurs pour les stimuli intermédiaires ($M = .12$, $ET = .20$) n'était significativement pas différente des deux autres types de stimuli. Le facteur Âge a de nouveau conduit à des différences significatives $F(2,70) = 10.2$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .23$, avec des proportions d'erreurs beaucoup plus importantes pour le groupe des 75 ans ($M = .19$) par rapport aux 25 et 50 ans ($M = .07$). Nous n'avons observé aucune interaction entre ces deux facteurs, $F(4,140) = .27$, $p = .90$.

En résumé, les analyses n'ont pas permis de différencier systématiquement les trois groupes de stimuli utilisés dans cette étude. En effet, pour l'ensemble des variables étudiées (temps passé sur les consignes, quantité de langage sollicitée pendant les consignes, temps de réponses correctes et quantité de langage pendant l'intervalle stimulus-réponse) les stimuli simples, intermédiaires et complexes n'ont pu être distingués. Seules les analyses concernant la proportion d'erreurs ont mis en évidence une différence entre les stimuli simples et les stimuli complexes, ces derniers entraînant une diminution des performances des sujets.

Effet de la complexité des tâches

Afin de se concentrer sur les effets les plus importants, les analyses suivantes ont été effectuées sur le bloc 5 uniquement, lorsque les processus exécutifs ont été les plus sollicités en raison de l'alternance entre les règles.

Temps passé sur les instructions :

Les valeurs moyennes concernant le temps passé sur les instructions étaient 6619 ms ($ET = 4708$), 9784 ms ($ET = 6909$) et 17324 ms ($ET = 12072$) respectivement pour les tâches simple, intermédiaire et complexe. Les analyses ont révélé que la complexité des tâches a eu un effet significatif sur le temps passé sur les instructions, $F(2,140) = 60.8$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .47$. Les comparaisons par paire effectuées ont mis en avant que le temps passé sur les instructions

avait systématiquement augmenté avec la difficulté des tâches ($p_s < .001$). L'ANOVA a aussi révélé que l'âge avait un impact significatif sur le temps passé sur les instructions, $F(2,70) = 24.4$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .41$. Dans l'ensemble, les participants de 75 ans ont passé plus de temps sur les instructions ($M = 17719$ ms) que les 25 ($M = 7423$ ms) et 50 ans ($M = 10267$ ms). L'effet d'interaction entre l'âge et la complexité des tâches, $F(4,140) = 2.8$, $p = .029$, $\eta_p^2 = .07$, tend à montrer que le temps passé sur les instructions a davantage augmenté dans le groupe des 75 ans pour les tâches intermédiaire et complexe. Les effets simples n'ont pas permis de différencier les 25 et 50 ans dans les tâches intermédiaire et complexe, ni de différencier les tâches simple et intermédiaire pour les participants de 50 ans.

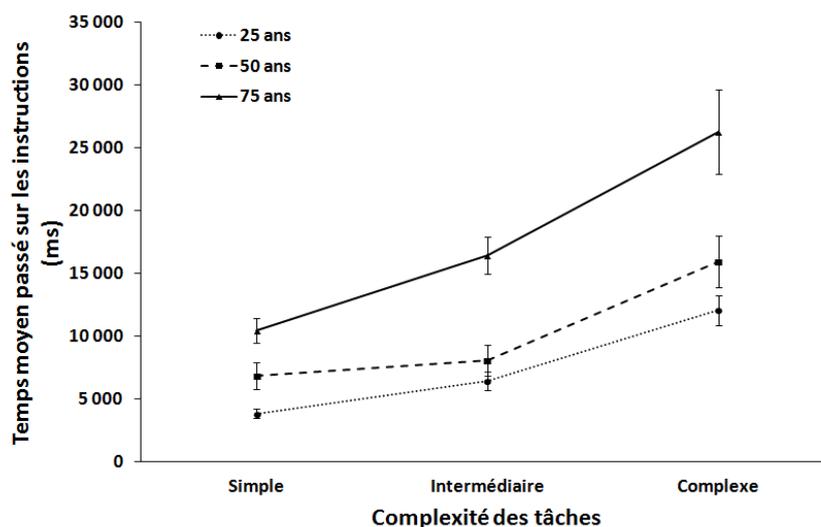


Figure 33 : Temps moyen passé sur les instructions par les participants de 25, 50 et 75 ans en fonction de la complexité des tâches. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

EMG pendant les instructions (Figure 34)

Les analyses statistiques de la quantité de langage intérieur sollicité au cours des instructions ont montré une augmentation de la quantité de parole avec la complexité des tâches, $F(2,130) = 20.3$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .24$. Les moyennes pour les tâches simple, intermédiaire et complexe sont respectivement de 42.6 mV.ms ($ET = 57.2$), 77.9 mV.ms ($ET = 125.4$) et 126.3 mV.ms ($ET = 127.2$). Un effet de l'âge a également été observé, $F(2,65) = 10.8$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .25$ avec comme valeur moyenne, 46.0 mV.ms, 81.1 mV.ms et 151.9 mV.ms. Les comparaisons par paire n'ont pas permis de différencier les 25 et 50 ans. Aucun effet d'interaction n'a été mis en avant, $F(4,130) = 2.2$, $p = .071$.

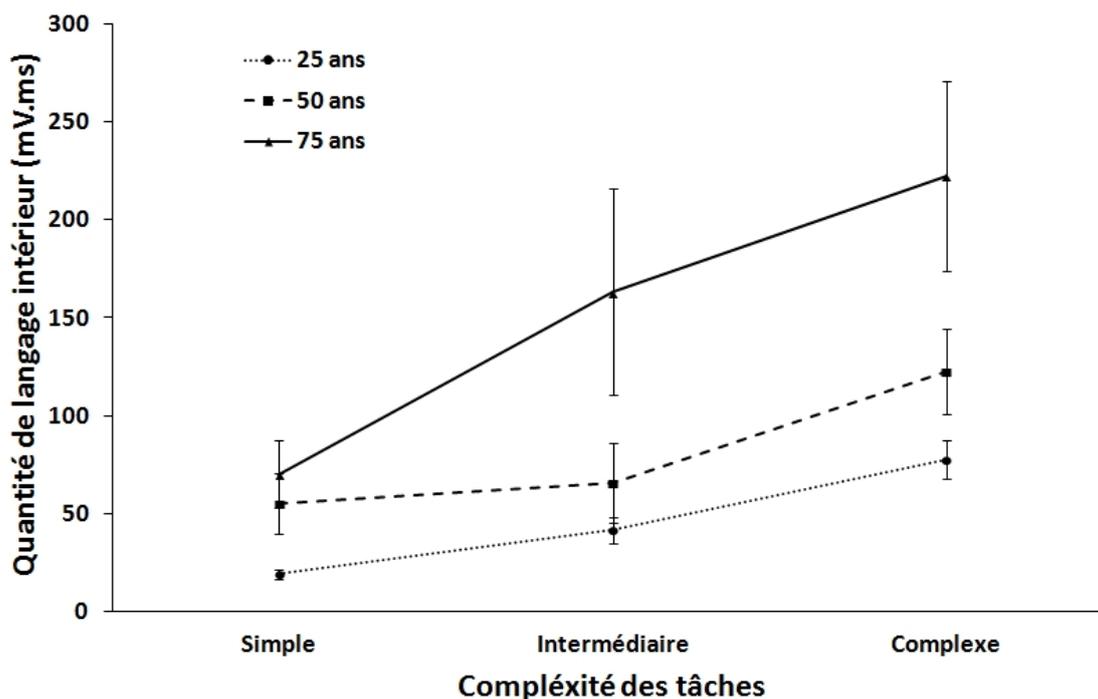


Figure 34 : Quantité moyenne de langage (mV.ms) pendant les phases d'instruction en fonction de la complexité des tâches pour les participants de 25, 50 et 75 ans. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard

Effet de la complexité de la tâche sur les temps de réponses, sur l'EMG pendant les temps de réponses et pendant l'intervalle réponse-stimulus, et sur la proportion d'erreurs :

Les temps de réponses correctes sont en moyenne de 699 ms ($ET = 285$), 734 ms ($ET = 357$) et 1261 ms ($ET = 461$) pour les tâches simple, intermédiaire et complexe. Les analyses réalisées ont montré un effet significatif de la complexité des tâches sur les temps de réponses, $F(2,140) = 99.2$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .59$ avec des comparaisons par paire permettant de différencier uniquement la tâche complexe des deux autres tâches ($p < .001$). Un effet de l'âge a également été mis en avant avec une augmentation systématique du temps de réponse avec l'âge, $F(2,70) = 30.4$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .47$. Les temps moyens sont de 702 ms pour les 25 ans, 878 ms pour les 50 ans et 1199 ms pour les 75 ans. Aucun effet d'interaction entre les facteurs Difficulté et Âge n'a été mis en évidence, $F(4,140) = 1.5$, $p = .22$.

Les mêmes analyses effectuées sur les données électromyographiques ont permis de montrer un pattern similaire avec un effet de la complexité des tâches sur la quantité de langage $F(2,130) = 74.9$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .54$. Les quantités moyennes de langage intérieur sont de 3.03 mV.ms ($ET = 1.55$), 3.36 mV.ms ($ET = 2.09$) et 6.58 mV.ms ($ET = 3.55$) respectivement pour les tâches simple, intermédiaire et complexe. Cette fois-ci encore, les comparaisons par paire n'ont pas permis de différencier la tâche simple de la tâche

intermédiaire. Les participants ont sollicité le langage à divers degrés selon la catégorie d'âge, $F(2,65) = 12.5$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .28$, avec des données moyennes de 3.4 mV.ms, 4.4 mV.ms et 6.0 mV.ms respectivement pour les 25, 50 et 75 ans. Le test de Bonferroni a uniquement offert la possibilité de différencier les participants les plus âgés des deux autres groupes. Les résultats n'ont montré aucun effet d'interaction entre les deux facteurs, $F(4,130) = 2.2$, $p = .072$. Lorsque l'on s'intéresse à la quantité de langage entre la réponse et le stimulus suivant, période pendant laquelle les participants peuvent mettre à jour en mémoire les règles de décision, les analyses montrent un effet de la difficulté des tâches, $F(2,130) = 10.0$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .13$. Les comparaisons par paire ont montré que les participants ont plus sollicité le langage entre leur réponse et le stimulus suivant lorsque la tâche était complexe par rapport aux deux autres tâches. Les données moyennes pour les tâches simple, intermédiaire et complexe étaient respectivement de 4.66 mV.ms ($ET = 1.58$), 4.92 mV.ms ($ET = 1.95$) et 5.60 mV.ms ($ET = 2.56$). Ce résultat est très intéressant puisque la durée du temps réponse-stimulus est de 1000 ms, et donc constante pour l'ensemble des tâches. Toutefois, les résultats n'ont montré aucune différence significative entre les trois groupes d'âge, $F(2,65) = .22$, $p = .80$, avec des données moyennes de 4.91 mV.ms, 5.12 mV.ms et 5.26 mV.ms respectivement pour les 25, 50 et 75 ans.

Un pattern similaire de résultats a été obtenu pour la proportion d'erreurs selon la complexité des tâches. Les analyses ont mis en avant un effet de la complexité, $F(2,140) = 19.0$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .21$, un effet de l'âge, $F(2,70) = 10.2$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .23$ et aucun effet d'interaction $F(2,140) = 1.2$, $p = .314$. Les comparaisons par paire ont montré une proportion d'erreurs supérieure chez les 75 ans ($M = .19$) par rapport aux 25 ans ($M = .07$) et 50 ans ($M = .07$) ainsi qu'une proportion d'erreurs supérieure dans la tâche complexe ($M = .19$) par rapport aux tâches simple ($M = .04$) et intermédiaire ($M = .08$). Une fois encore, aucune différence entre la tâche simple et intermédiaire n'a pu être mise en avant malgré une forte tendance ($p = .08$), et ce surtout chez les personnes âgées.

Résumé des précédentes analyses concernant l'effet de l'âge et la complexité des tâches

Les six mesures précédentes (temps passé sur les consignes, temps de réponse, quantité de langage sollicité pendant les consignes, pendant l'intervalle stimulus-réponse et pendant l'intervalle réponse-stimulus, et la proportion d'erreurs), qui visaient à établir l'effet de la complexité des tâches sur les performances d'alternance des trois groupes de participants, ont chacune conduit à un test omnibus significatif. Les analyses post-hoc du

temps de réponse ont permis de différencier les trois groupes d'âge, alors que les tests se sont contentés de différencier les participants les plus âgés des deux autres groupes. Les deux mesures les plus sensibles à l'âge étaient le temps passé sur les instructions ($\eta_p^2 = .41$) et le temps de réponse ($\eta_p^2 = .47$), ces deux variables correspondant au temps passé à coder et à décoder les stimuli.

	Variables			Comparaisons par paire	
	Complexité des tâches	Âge	Interaction	Complexité des tâches	Âge
Temps Consignes	Sig.	Sig.	Sig.	S < I < C	25 = 50 < 75
EMG Consignes	Sig.	Sig.	NS	S < I < C	25 = 50 < 75
RT	Sig.	Sig.	NS	S = I < C	25 < 50 < 75
EMG SR	Sig.	Sig.	NS	S = I < C	25 = 50 < 75
EMG RS	Sig.	NS	NS	S = I < C	25 = 50 = 75
Prop. d'erreurs	Sig.	Sig.	NS	S = I < C	25 = 50 < 75

Tableau 1 : Récapitulatif des effets observés liés à la complexité des tâches et à l'âge des participants, avec les comparaisons par paire correspondantes

Un autre résultat intéressant montrant la pertinence de l'électromyographie laryngée est obtenu lorsque l'on divise la quantité de langage sollicité pendant les temps de réponses par le temps de réponse. On observe alors un effet de la difficulté des tâches, $F(2,130) = 8.8$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .12$, avec des comparaisons par paire indiquant une quantité de langage supérieure pour la tâche complexe. Ce résultat, effectué sur des données de temps égales, montre que les participants ont eu plus recours au langage pour alterner entre les règles dans la tâche complexe que dans les deux autres tâches. Toutefois, les données n'ont pas mis en avant de différence entre les trois groupes de participants, $F(2,65) = .09$, $p = .91$, ce qui montre une amplitude moyenne similaire du langage intérieur pour les trois groupes de participants

Alternation costs, mixed-list cost et switching costs

Ces trois types de coûts ont été calculés pour chaque groupe de participants et chaque tâche. En ce qui concerne l'*alternation cost* (moyenne des temps de réponses des essais alternés du bloc 5 – moyenne des temps de réponses des blocs 3 et 4), nous avons observé une

augmentation significative de celui-ci en fonction de la complexité des tâches, $F(2,138) = 80.1$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .54$ (les analyses post-hoc ont systématiquement séparé les trois conditions, avec comme moyenne respective 18.2, 128.3, et 702.5 ms). Les analyses n'ont toutefois pas pu différencier les trois groupes de participants, $F(2,69) = .52$, $p = .60$ (respectivement 249, 309 et 303 ms). Un même effet global de la complexité des tâches a été trouvé pour la quantité de langage sollicitée pendant le langage ($F(2,128) = 44.6$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .41$), pour lequel les analyses post-hoc ont permis de discriminer la tâche complexe des deux autres tâches. Les données moyennes sont de .07, .73 et 3.78 mV.ms respectivement pour les tâches simple, intermédiaire et complexe. Cette fois encore, les analyses n'ont montré aucune différence significative entre les trois groupes de participants, $F(2,64) = 1.9$, $p = .16$ (respectivement .01, .88 et 3.9 mV.ms).

Le même schéma de significativité a été trouvé pour le *mixed-list cost* (moyenne des essais répétés du bloc mixé – moyenne des essais des blocs 3 et 4), avec des valeurs moyennes respectives égales à -8.9 ms, 17.6 ms et 413.9 ms ($F(2, 138) = 18.3$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .41$), la tâche complexe étant significativement différente des deux autres. Une nouvelle fois, les analyses n'ont pas permis de différencier les trois groupes de participants, $F(2,69) = .12$, $p = .88$ (respectivement 133, 156 et 136 ms). En ce qui concerne la quantité de langage, les analyses montrent un même pattern avec des données moyennes de -0.10 mV.ms, 0.08 mV.ms et 2.6 mV.ms ($F(2,130) = 36.1$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .36$). Les comparaisons par paire n'ont pas été en mesure de discriminer de façon significative les tâches simple et intermédiaire. Les résultats n'ont montré aucune différence significative entre les trois groupes de participants, $F(2,65) = .44$, $p = .65$ (respectivement .72, 1.01 et .96 mV.ms).

Le *switch cost* moyen pour une tâche donnée était (Changement de règle + Changement de règle et de touche)/2 - (Changement de touche + Aucun changement)/2, ce qui a donné des valeurs de 38 ms, 115 ms et 299 ms respectivement pour les tâches simple, intermédiaire et complexe. Cette fois encore, la complexité des tâches a induit un effet sur le coût d'alternance ($F(2,136) = 18.1$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .21$, avec une discrimination des trois tâches par le test de Bonferroni. Les résultats n'ont pas permis de différencier les trois groupes de participants, $F(2,68) = 1.5$, $p = .23$ avec des données moyennes de 117 ms, 153 ms et 197 ms. Le même pattern de résultat a été observé pour la quantité de langage avec des quantités moyennes de .18 mV.ms, .65 mV.ms et 1.14 mV.ms respectivement pour les tâches simple, intermédiaire et complexe, $F(2,128) = 7.1$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .10$). Seule la tâche simple a été différenciée des deux autres dans les analyses post-hoc. Les résultats n'ont toujours pas

permis de différencier les trois groupes de participants, $F(2,64) = 2.2$, $p = .12$ avec des données moyennes de .51 mV.ms, .52 mV.ms et 1.1 mV.ms pour les 25, 50 et 75 ans.

	Variables		Comparaisons par paire	
	Complexité des tâches	Âge	Complexité des tâches	Âge
Alternation Cost	Sig.	NS	S < I < C	25 = 50 = 75
EMG Alternation Cost	Sig.	NS	S = I < C	25 = 50 = 75
Mixed-list cost	Sig.	NS	S = I < C	25 = 50 = 75
EMG Mixed-list Cost	Sig.	NS	S = I < C	25 = 50 = 75
Switching Cost	Sig.	NS	S < I < C	25 = 50 = 75
EMG Switching Cost	Sig.	NS	S < I = C	25 = 50 = 75

Tableau 2 : Récapitulatif des coûts d'alternance observés liés à la complexité des tâches et à l'âge des participants, avec les comparaisons par paire correspondantes

Contrairement aux résultats trouvés par Cepeda, Kramer et Gonzalez de Sather (2001), ces résultats n'ont pas permis de différencier nos trois groupes de participants, ce qui semble signifier que l'augmentation du temps de réponse avec l'âge serait essentiellement due à un ralentissement de la vitesse d'exécution et non au déclin des fonctions exécutives.

Lorsque nous nous sommes intéressés plus en détail aux différents types de switch possibles dans le bloc mixé (aucun changement, changement de touche, changement de règle et changement de touche et de règle) toutes tâches confondues, nous avons observé un effet principal du type de switch sur le temps de réponse ($F(3,210) = 18.2$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .20$), les données moyennes étant respectivement de 735 ms ($ET = 297$), 843 ms ($ET = 308$), 907 ms ($ET = 338$) et 908 ms ($ET = 314$). Le test de Bonferroni a uniquement permis de différencier la condition sans aucun changement des trois autres. Pour cette variable, basée sur les temps de réponses, les résultats ont montré une différence significative entre les trois groupes de participants, $F(2,70) = 27.4$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .44$, avec des données moyennes respectives de 672 ms, 830 ms et 1118 ms. Le même pattern de résultats a été obtenu concernant la quantité de langage intérieur sollicité, avec un effet du type de switch, $F(3,195) = 11.2$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .15$, un effet de l'âge, $F(2,65) = 11.9$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .27$, et aucun effet d'interaction. Les comparaisons par paire ont permis de distinguer les participants les plus âgés des deux autres

groupes avec des données respectives de 3.2 mV.ms, 4.1 mV.ms, et 5.4 mV.ms pour les 25, 50 et 75 ans. Une nouvelle fois, seule la condition sans aucun changement a été différenciée des trois autres types de switch.

6.3. Discussion

Notre objectif principal était d'étudier le rôle du langage intérieur dans les processus de flexibilité cognitive, en utilisant l'électromyographie de surface. Les participants âgés de 25, 50, et 75 ans ont été invités à effectuer trois tâches de catégorisation de complexité variable, chacune assignée au hasard à un groupe de stimuli plus ou moins verbalisables. Nous avons supposé que la quantité de langage intérieur sollicité serait proportionnelle à la complexité des stimuli et à la complexité des tâches, et que cela pouvait varier selon l'âge des participants.

Instructions: Encodage des règles

Au cours de la phase d'apprentissage des règles, les participants ont systématiquement sollicité leur langage intérieur, et ce de façon proportionnelle avec le niveau de complexité des tâches. Ce résultat est corrélé avec une augmentation du temps passé sur les instructions, ce qui suggère que, plus les consignes étaient complexes plus les participants ont répété les règles. Ces résultats, en accord avec ceux obtenus dans l'expérience 3, complètent les études ultérieures utilisant la suppression articulatoire en démontrant le rôle du langage au cours de la phase d'encodage, et en montrant que l'augmentation de la complexité des tâches et des stimuli entraîne une augmentation de la sollicitation du langage intérieur.

Effet des blocs : encodage, application et alternance des règles

Chaque tâche a été divisée en cinq blocs d'apprentissage : apprentissage de la première règle, apprentissage de la deuxième règle, application de la première règle sans feedback, application de la seconde règle sans feedback, et alternance. Les résultats ont montré qu'une grande quantité de langage intérieur a été recrutée pendant l'encodage des règles dans les blocs 1 et 2, et une plus petite quantité a été sollicitée dans les blocs 3 et 4, ce qui peut ainsi être considéré comme une phase d'automatisation (les règles ayant été apprises correctement dans les deux premiers blocs). Une exception a été observée pour les participants de 75 ans lors de la tâche complexe, puisque ceux-ci ont produit plus de langage intérieur pour encoder la seconde règle dans le bloc 2 que la première règle, ceci en raison de la complexité inhérente

à cette règle. Il est donc probable que la plus grande quantité de langage intérieur produite pendant le cinquième bloc par rapport aux blocs 3 et 4 était due à l'alternance des règles. Si l'argument précédent est considéré comme correct, notre résultat indique que les mécanismes d'alternance sont pris en charge par un format verbal. L'augmentation observée dans le bloc 5 s'explique essentiellement par la difficulté que les participants ont eu à effectuer la tâche complexe. Ce résultat met en évidence le rôle particulièrement important du langage, qui permet de basculer entre des règles complexes et interférentes, en plus de son rôle dans le passage d'une tâche à l'autre, quelle que soit leur complexité. Nos résultats sont cohérents avec l'idée que l'interférence est une contrainte clé du contrôle cognitif dans les tâches d'alternance (Altmann & Gray, 2008 ; Baker, Friedman, & Leslie, 2010 ; Friedman & Miyake, 2004).

Effet de la verbalisation des stimuli

Les résultats que nous avons obtenus n'ont pas permis de différencier les trois ensembles de stimuli, excepté pour la proportion d'erreurs, variable pour laquelle les participants ont commis plus d'erreurs avec les stimuli complexes qu'avec les stimuli simples. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer l'absence de difficulté des stimuli complexes par rapport aux stimuli intermédiaires. Les stimuli complexes représentant des images abstraites, nous pouvons supposer que certains participants ont eu la possibilité de les assimiler à des objets de la vie courante, limitant ainsi la sollicitation du langage intérieur (e.g., « chaussure », « chaussette », « tube », « genouillère », etc.). Ceci est confirmé par le fait que 31 sujets (dont 23 pour lesquels les stimuli complexes étaient assignés à la tâche complexe) ont déclaré dans la phase de débriefing avoir donné de tels noms aux images complexes pour faciliter le tri des stimuli. Cette méthode permet ainsi de placer chaque groupe de stimuli à un même niveau de verbalisation. Une autre possibilité est que les participants, dans l'impossibilité de verbaliser les images, ont traité les stimuli de façon purement visuelle en faisant ainsi l'économie du langage. Cela rejoint l'idée que si le langage est utilisé dans l'apprentissage de catégories, il n'est pas non plus obligatoire pour la réussite d'une tâche. De nombreuses tâches de catégorisation complexes tendent en effet à solliciter un processus plus implicite de mémorisation d'exemplaires plutôt qu'un processus d'abstraction de règles explicites surtout sous-tendues par un format verbal (Ashby & Ell, 2001). Ce résultat pourrait s'expliquer par un traitement plutôt visuel des stimuli, minimisant ainsi le langage intérieur. Cette interprétation est difficile à vérifier, mais elle est en lien avec l'idée que même si le

langage est utilisé dans l'apprentissage catégoriel, il n'est pas indispensable pour effectuer une tâche avec succès (voir Brojde, Porter, & Colunga, 2011).

La solution de redescription des images abstraites en objets connus semble difficile à appliquer pour le traitement des images intermédiaires puisque ces images n'offrent pas la possibilité d'utiliser des moyens mnémotechniques. En effet, il est difficile d'associer à une étoile un quelconque objet autre qu'une étoile, de même pour les pentagones. Aussi, les mots « pentagone », « horizontal » et « vertical » (qui ont pu être utilisés par les sujets pour décrire les objets) comportant un nombre important de syllabes, ceci pourrait également expliquer le fait que les sujets ont présenté des quantités de langage intérieur supérieures pendant l'apprentissage des consignes.

Complexité des tâches

Comme dans nos précédentes études utilisant les tâches d'alternance catégorielle, nos résultats ont montré que les trois tâches impliquaient différents niveaux de difficulté, puisque le temps passé sur les instructions et la quantité de langage intérieur sollicité pendant les phases d'apprentissage ont augmenté systématiquement avec la difficulté des tâches. Les autres paramètres (temps de réponse, proportion d'erreurs, quantité de langage pendant l'intervalle stimulus-réponse et réponse-stimulus) ont montré une différence significative de la tâche complexe avec les deux autres. Dans l'ensemble, ces résultats sont cohérents avec l'idée que la difficulté d'une tâche de catégorisation dépend de la compressibilité de l'information qui peut être consultée pour encoder la tâche (Bradmetz & Mathy, 2008 ; Feldman, 2000 ; Mathy & Bradmetz, 2004). Il faut cependant noter que nos tâches diffèrent de celles utilisées par ces auteurs puisque les participants devaient eux-mêmes découvrir les règles dans leurs tâches. L'absence de différence de temps de réponse entre la tâche simple et la tâche intermédiaire peut être due au fait que les participants ne devaient trier que quatre images à droite dans la tâche intermédiaire, par opposition à huit dans la tâche simple. La probabilité de devoir changer les règles était plus grande dans la tâche simple que dans la tâche intermédiaire. Ainsi, la difficulté engendrée par l'étape de calcul supplémentaire aurait pu être masquée par le fait que les participants ont procédé à un plus petit nombre de switch. Une autre explication possible pouvant justifier l'absence de différences entre ces deux tâches est que les sujets ont peut-être compressé les règles de la tâche intermédiaire. Ils ont par exemple utilisé la règle "Si carré rouge, alors gauche ; sinon droit", de façon à obtenir une

règle simple, même si la longueur des branches de l'arbre de décisions reste plus longue que celle de la tâche simple.

Coût d'alternance et effet de l'âge

Nos résultats montrent que les participants âgés de 75 ans (et dans une moindre mesure, ceux de 50 ans) ont toujours utilisé le langage intérieur de façon plus importante que les participants de 25 ans, ce qui pourrait indiquer que le langage intérieur agit comme un substitut au déclin des fonctions exécutives ou à un raisonnement plus lent. Nos observations ont également montré que l'utilisation accrue du langage a été accompagnée par la nécessité d'un temps supplémentaire pour mémoriser les instructions et des temps de réponses plus longs. Une quantité d'erreurs plus importante chez les 75 ans semble toutefois indiquer que malgré une sollicitation plus élevée du langage, ce dernier ne permet pas compenser pleinement le déclin cognitif. Toutefois, on ne peut pas attester que cette baisse de performance dépende spécifiquement du déclin des fonctions exécutives lié à l'âge (Cepeda, Kramer, & Gonzalez de Sather, 2001 ; Ilkowska & Engle, 2010 ; Kray & Lindenberger, 2000 ; Salthouse, 1998 ; Salthouse, Fristoe, McGuthry, & Hambrick, 1998 ; Tombaugh, 2004 ; Zelazo, Craik, & Booth, 2004). En effet, l'analyse des différents coûts d'alternance n'a pas permis de différencier les trois groupes de participants comme nous pouvions l'attendre. Ce résultat semble donc signifier que la différence de temps de réponse entre les trois groupes s'expliquerait essentiellement par un ralentissement de la vitesse d'exécution et non par un déclin des fonctions cognitives.

6.4. Conclusion

L'objectif de cette expérience était d'étudier le rôle du langage dans des tâches de flexibilité en fonction de l'âge des participants. L'utilisation de l'électromyographie de surface nous a permis d'explorer le langage intérieur sans perturber l'exécution des tâches. Nos résultats n'ont pas permis de systématiquement différencier les trois groupes de participants, ce qui semble indiquer des performances similaires pour l'ensemble des participants malgré un ralentissement de la vitesse d'exécution avec l'âge. Un résultat vient pourtant modérer ces constatations puisque les participants les plus âgés ont présenté des performances plus faibles que les plus jeunes malgré un temps d'encodage et une quantité de langage intérieur supérieure pendant la phase d'apprentissage des règles.

7. Étude du rôle du langage intérieur dans une tâche classique de flexibilité : le test de classement des cartes du Wisconsin (WCST) - Expérience 6

Cette expérience a été mise en place dans le but de confirmer les résultats obtenus avec notre tâche d'alternance catégorielle en utilisant cette fois-ci une tâche classique d'alternance pour laquelle il existe déjà des données dans la littérature. Afin d'étudier la sollicitation du langage intérieur en fonction de la difficulté des tâches comme dans notre première recherche, nous avons repris une étude effectuée par Rubinstein, Meyer et Evans en 2001 utilisant une adaptation du WCST, de façon informatisée et en ajoutant l'électromyographie de surface. Dans cette tâche, les participants devaient trier des images en fonction de leurs dimensions Forme, Nombre, Taille et Couleur par rapport à quatre cartes cibles. L'utilisation de cette tâche semble adéquate pour généraliser nos résultats, d'autant plus qu'elle fait appel, à l'inverse de la tâche d'alternance catégorielle, à un véritable contrôle endogène de la flexibilité.

7.1. Matériel et méthode

Participants

Trente-et-un jeunes adultes (23 femmes et 8 hommes, $M = 22.8$ ans ; $ET = 3.3$) et vingt-trois adultes plus âgés (16 femmes et 23 hommes, $M = 56.0$ ans ; $ET = 7.1$) ont participé volontairement à cette étude. Les deux groupes ont été respectivement labélisés "Jeunes" et "Âgés" dans les analyses suivantes. Les jeunes participants ont été recrutés à l'Université de Franche Comté. Le groupe plus âgé était constitué de sujets dont tous (excepté trois) ont suivi des études supérieures et exercent toujours une activité professionnelle. Tous les participants ont donné leur consentement écrit. Afin d'évaluer l'intelligence fluide des deux groupes de participants, ces derniers ont effectué avant l'expérience le test des matrices de Raven (set 1).

Matériel

Dans cette étude, nous avons reproduit la même expérience que celle réalisée par Rubinstein, Meyer et Evans en 2001, une adaptation du test de tri des cartes du Wisconsin (WCST) dans laquelle les participants devaient trier des cartes selon leurs différentes dimensions (Forme, Taille, Couleur et Nombre). Nous avons cependant informatisé cette expérience à l'aide du logiciel E-Prime2® (Psychology Software Tools, Inc.) afin de la synchroniser avec l'enregistrement électromyographique mais également pour obtenir les temps de réponses de l'ensemble des participants.

Les images utilisées dans cette étude ont été créées à l'aide du logiciel Photofiltre 6.4.0 (Copyright © 2001- 2010 Antonio Da Cruz). Il y avait 24 cartes tests par paquets présentant chacune un pattern de formes géométriques, ainsi que 3 séries de 4 cartes cibles. Le pattern des cartes était défini par une combinaison de quatre dimensions : Forme, Nombre, Couleur et Taille. Chacune de ces dimensions était déclinée en quatre modalités. Les formes pouvaient être des triangles, des étoiles, des croix ou des ronds, être au nombre de 1, 2, 3 ou 4, mesurer 4.8, 3.3, 2.3, ou 1.5 cm de hauteur et avoir pour remplissage un fond gris, un pointillage important, un pointillage léger ou un fond blanc. Les dimensions Forme et Nombre sont facilement discriminables tandis que les dimensions Taille et Couleur sont plus difficiles à différencier (Rubinstein, Meyer, & Evans, 2001).

Procédure

Chaque participant a été informé qu'il allait devoir appairer plusieurs séries d'images à des cartes cibles en fonction de leurs différentes dimensions au cours de deux tâches de complexité simple et complexe. Les consignes apparaissaient à l'écran au début de chaque bloc, indiquant la ou les dimensions à prendre en compte pour classer correctement les cartes (e.g., « Triez les cartes en fonction de la dimension : TAILLE » ; « Triez les cartes en alternant entre les dimensions FORME et NOMBRE, en commençant le tri par la dimension FORME »). Les cartes cibles étaient situées dans la partie supérieure de l'écran d'ordinateur et les stimuli apparaissaient quant à eux dans la partie inférieure. Un exemple de tri pour chaque condition était effectué avec l'expérimentateur avant le début de l'expérience afin de vérifier la compréhension des consignes. Pour effectuer le tri des cartes, les participants devaient utiliser la souris d'ordinateur dont le pointeur se plaçait automatiquement au centre de l'écran à l'apparition de chaque stimulus, et cliquer sur la carte cible correspondante. En outre, une croix de fixation apparaissait pendant 1000 ms avant chaque stimulus au centre de l'écran. Il était important pour les participants de bien garder les règles en mémoire car aucun indice ne permettait de deviner quelle règle employer. Contrairement à nos tâches d'alternance catégorielle, les stimuli utilisés dans cette expérience étaient bivalents puisqu'ils pouvaient être associés à l'ensemble des cartes cibles selon la règle à appliquer.

Règles

L'ensemble des participants devait effectuer deux tâches du WCST, une tâche simple et une tâche complexe. La durée totale de l'expérience était d'environ 30 minutes, incluant les

instructions et les pauses. Deux niveaux de complexité ont été établis dans cette tâche du WCST, une condition avec des règles simples et une condition avec des règles complexes. Chacune de ces deux conditions était divisée en 6 blocs de 24 essais avec 4 blocs de règles répétées et 2 blocs de règles alternées.

Dans la tâche simple, les participants devaient se focaliser sur une seule dimension pour effectuer le tri des cartes. Au cours des quatre premiers blocs, les participants devaient trier les stimuli en fonction de leur forme, de leur nombre, de leur taille puis de leur couleur, ces blocs se réalisant dans un ordre aléatoire d'un sujet à l'autre. Les mêmes cartes tests ont été utilisées dans les quatre parties et elles ont été construites de façon à ne présenter qu'une seule dimension commune avec chacune des quatre cartes cibles (Figure 35). Dans chaque paquet, un nombre égal de 6 stimuli était attribué à chacune des quatre cartes cibles quelle que soit la règle à utiliser (e.g., 6 cartes étaient à trier avec la première carte cible, 6 avec la seconde, etc.). Dans les deux derniers blocs, les participants devaient alterner à chaque essai (alternance de type ABABAB) entre les dimensions Forme et Nombre (e.g., Triangle, 3, Étoile, 2, Croix, 2, etc.) et entre les dimensions Taille et Couleur (e.g., Grand, Gris, Très grand, Blanc, Très petit, Gris, etc.). Ces deux blocs se réalisaient également dans un ordre aléatoire d'un sujet à un autre. La première règle à employer dans chaque bloc mixé était contrebalancée entre les participants.

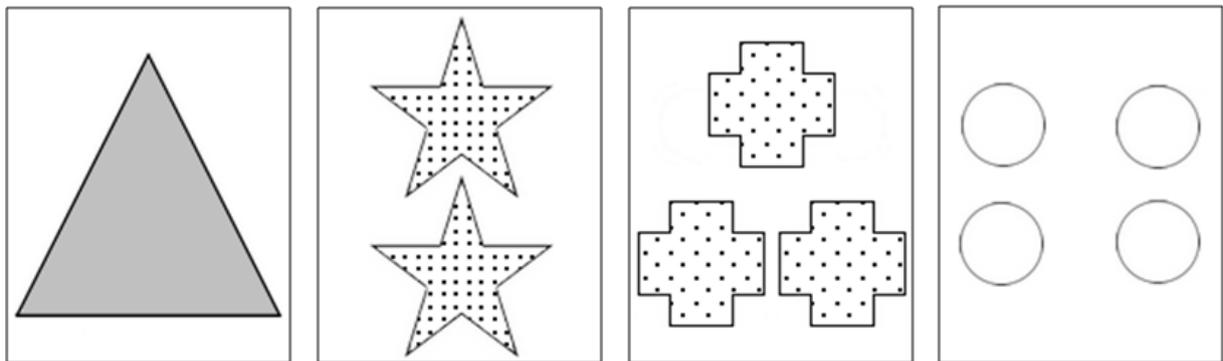


Figure 35 : Cartes cibles utilisées dans la condition de règles simples du WCST. De gauche à droite, les cartes représentent un triangle gris de 4.8 cm de hauteur, deux étoiles de 3.5 cm de hauteur avec un pointillage important, trois croix de 2.5 cm de hauteur avec un pointillage léger et quatre ronds blancs de 1.5 cm de hauteur.

En ce qui concerne la tâche complexe, les participants devaient trier les stimuli en fonction de deux dimensions simultanément, Forme et Nombre (e.g., 3 triangles, 4 étoiles, 1 croix, etc.) ou Taille et Couleur (e.g., Grand gris, Très petit blanc, Petit gris, etc.). Les deux dimensions les plus simples ont été regroupées ensemble et les deux dimensions les plus

complexes également. Pour garder un nombre de blocs identiques avec la tâche simple, deux sets de cartes ont été élaborés. Chaque carte test présentait deux dimensions communes avec chacune des cartes cibles. Dans les blocs répétés, les participants devaient trier les cartes selon les dimensions Forme et Nombre ou Taille et Couleur, et ceci pour chacun des deux sets de cartes. Une nouvelle fois, l'ordre de ces quatre blocs répétés était alterné entre les participants. Dans les blocs mixés, les sujets devaient alterner entre les deux ensembles de dimensions pour les deux sets de cartes. Les participants devaient par exemple trier le premier stimulus selon sa forme et son nombre, le second stimulus selon sa couleur et sa taille, le troisième à nouveau en fonction de sa forme et de son nombre, et ainsi de suite (alternance de type ABABAB).

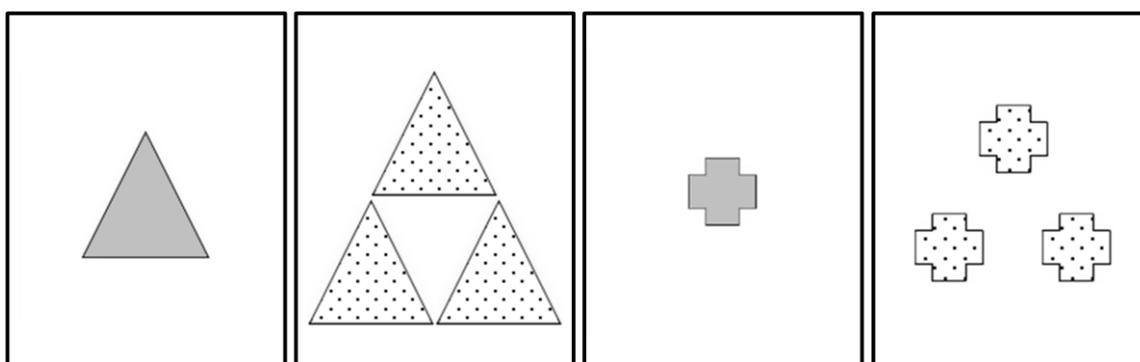


Figure 36 : Cartes cibles (set A) utilisées dans la condition de règles complexes du WCST.

Un récapitulatif des tâches et des différents blocs est visible dans le tableau ci-dessous.

	Blocs	Tâche Simple	Tâche Complexe
Blocs répétés	Bloc 1	Forme	Forme et Nombre 1
	Bloc 2	Couleur	Forme et Nombre 2
	Bloc 3	Taille	Taille et Couleur 1
	Bloc 4	Nombre	Taille et Couleur 2
Blocs alternés	Bloc 5	Forme / Nombre	Forme et Nombre / Taille et Couleur 1
	Bloc 6	Taille / Couleur	Forme et Nombre / Taille et Couleur 2

Tableau 3 : Déroulement de l'expérience du WCST. Les sujets réalisent les deux tâches dans un ordre aléatoire. L'ordre des blocs 1 à 4 se fait de façon aléatoire dans les deux tâches, tout comme l'ordre des blocs 5 et 6. La tâche complexe comporte deux jeux de cartes cibles 1 et 2.

Enregistrement électromyographique

Comme pour les études précédentes, deux tracés électromyographiques ont été obtenus pour chaque participant à l'aide du dispositif d'enregistrement électromyographique,

synchronisé avec E-Prime. Chaque tracé a été analysé comme expliqué dans la partie "Traitement des données électromyographiques". Dans cette étude, nous avons calculé l'intégrale moyenne de l'EMG pendant l'intervalle de temps stimulus-réponse.

7.2. Résultats

Matrices de Raven

Le score moyen (sur 12) aux matrices de Raven des groupes jeunes et âgés était respectivement de 10.48 et 10.26. L'analyse de variance univariée n'a montré aucune différence significative entre les deux groupes de sujets, $F(1,52) = .304, p = .584$.

Effet de la complexité des tâches

Les essais présentant des temps de réponses s'écartant de plus de trois écarts-types de la moyenne de l'ensemble de la distribution ou inférieurs à 200 ms ont exclu des analyses, ceci correspondant à 1,7% de l'ensemble des données (similaire à Goschke, 2000, p. 337). La même sélection a retiré 1,2% des données EMG. Pour réaliser les ANOVAs à mesures répétées, les données ont été agrégées afin d'obtenir une mesure unique moyenne par participant pour chaque variable dépendante. Des comparaisons par paire au moyen d'un ajustement de Bonferroni ont été calculées pour toutes les conditions de chaque facteur intra-sujet.

Temps de réponse

Les analyses à mesures répétées sur les temps de réponses correctes ont mis en évidence un effet du facteur Complexité des tâches (Simple ou Complexe) avec une augmentation du temps de réponse avec la complexité, $F(1,52) = 477.1, p < .001, \eta_p^2 = .90$. Un effet du facteur Alternance (Répétée ou Alternée) a également été montré, $F(1,52) = 424.2, p < .001, \eta_p^2 = .89$, avec un temps de réponse plus élevé dans les blocs alternés. Les données moyennes pour les conditions Tâche simple répétée, Tâche simple alternée, Tâche complexe répétée et Tâche complexe alternée étaient respectivement de 1631 ms ($ET = 380$), 2249 ms ($ET = 434$), 2359 ms ($ET = 562$) et 3955 ms ($ET = 908$). Plus intéressant, les analyses ont montré une interaction entre les variables Complexité et Alternance, $F(1,52) = 147.7, p < .001, \eta_p^2 = .74$, interaction s'expliquant par une augmentation du temps de réponse dans la condition Tâche Complexe alternée. Les analyses ont également montré un effet

significatif de l'âge, $F(1,52) = 19.0$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .27$ avec un temps de réponse supérieur pour les participants les plus âgés. De plus, une interaction a été mise en évidence entre les facteurs Âge et Complexité, $F(1,52) = 10.5$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .17$, avec une augmentation des temps réponses pour les personnes du groupe Âgés dans la Tâche complexe. Par ailleurs, aucune interaction n'a pu être observée entre les facteurs Âge et Alternance, $F(1,52) = 3.8$, $p = .058$, ainsi qu'entre les trois facteurs Complexité, Alternance et Âge, $F(1,52) = 2.8$, $p = .100$.

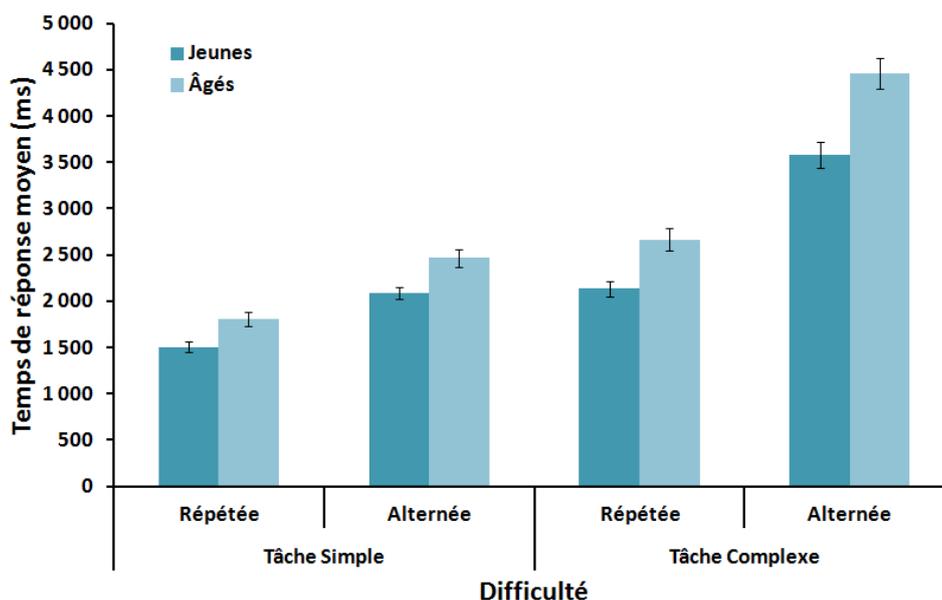


Figure 37 : Temps de réponse moyen en fonction de la difficulté des tâches : Tâche simple répétée, Tâche simple alternée, Tâche complexe répétée et Tâche complexe alternée. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Quantité de langage intérieur (Figure 38)

Tout comme pour les temps de réponses, les données EMG s'écartant de plus de trois écarts-types de la moyenne ont été retirées. Le même pattern de résultat est obtenu lorsque l'on s'intéresse à la quantité de langage sollicitée durant les temps de réponses. Les analyses ont montré un effet significatif du facteur Complexité et du facteur Alternance, avec une augmentation de la quantité de langage intérieur sollicité lorsque la complexité augmentait, $F(1,52) = 160.2$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .76$, et lorsque les participants devaient alterner entre les règles, $F(1,52) = 160.1$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .76$. Les quantités moyenne de langage étaient de 7.6 mV.ms ($ET = 3.3$), 11.8 mV.ms ($ET = 4.9$), 11.5 mV.ms ($ET = 4.8$) et 20.2 mV.ms ($ET = 8.9$) respectivement pour les conditions Tâche simple répétée, Tâche simple alternée, Tâche complexe répétée et Tâche complexe alternée. Une interaction entre les deux facteurs

Complexité et Alternance a été observé, $F(1,52) = 60.6$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .54$. Cette interaction semble s'expliquer une nouvelle fois par l'augmentation de la quantité de langage dans la condition Tâche complexe alternée. Les analyses ont également montré un effet significatif de l'âge, $F(1,52) = 5.1$, $p = .028$, $\eta_p^2 = .09$ avec une quantité de langage intérieur supérieure pour les participants les plus âgés. Cependant, aucune interaction n'a été observée entre les facteurs Âge et Complexité, $F(1,52) = 2.9$, $p = .093$, Âge et Alternance, $F(1,52) = 2.7$, $p = .107$, et Âge, Complexité et Alternance, $F(1,52) = 1.5$, $p = .227$.

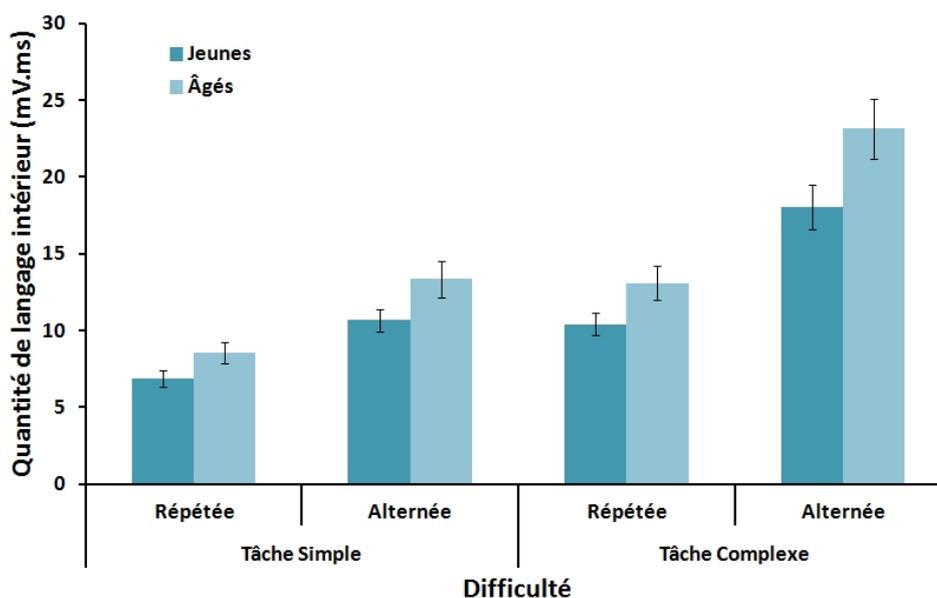


Figure 38 : Quantité moyenne de langage intérieur sollicité en fonction de la difficulté des tâches : Tâche simple répétée, Tâche simple alternée, Tâche complexe répétée et Tâche complexe alternée. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Quantité de langage intérieur divisée par les temps de réponses (Figure 39)

Comme l'analyse précédente, les données EMG s'écartant de plus de trois écarts-types de la moyenne ont été retirées. Nous avons également retiré des analyses les temps de réponses correctes s'écartant de plus de trois écarts-types de la moyenne et inférieurs à 200 ms puisque nous avons divisé la quantité de langage intérieur par les temps de réponses. Cette fois-ci, les analyses n'ont pas montré d'effet du facteur Complexité sur la sollicitation du langage intérieur, $F(1,52) = .131$, $p = .718$, mais elles ont mis en évidence un effet du facteur Alternance, $F(1,52) = 18.5$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .26$, avec une amplitude du langage plus élevée lorsque les participants devaient alterner entre les règles. Les données moyennes de langage étaient respectivement de .0046 mV ($ET = .05$), .0052 mV ($ET = .06$), .0048 mV ($ET = .05$) et .0051 mV ($ET = .04$) pour les conditions Tâche simple répétée, Tâche simple

alternée, Tâche complexe répétée et Tâche complexe alternée. Toutefois, les analyses n'ont pas montré d'effet significatif de l'Âge, $F(1,52) = .14$, $p = .71$, ni aucune interaction entre les facteurs Âge et Complexité, $F(1,52) = .67$, $p = .417$, Âge et Alternance, $F(1,52) = .50$, $p = .484$, et Âge, Complexité et Alternance, $F(1,52) = .05$, $p = .819$.

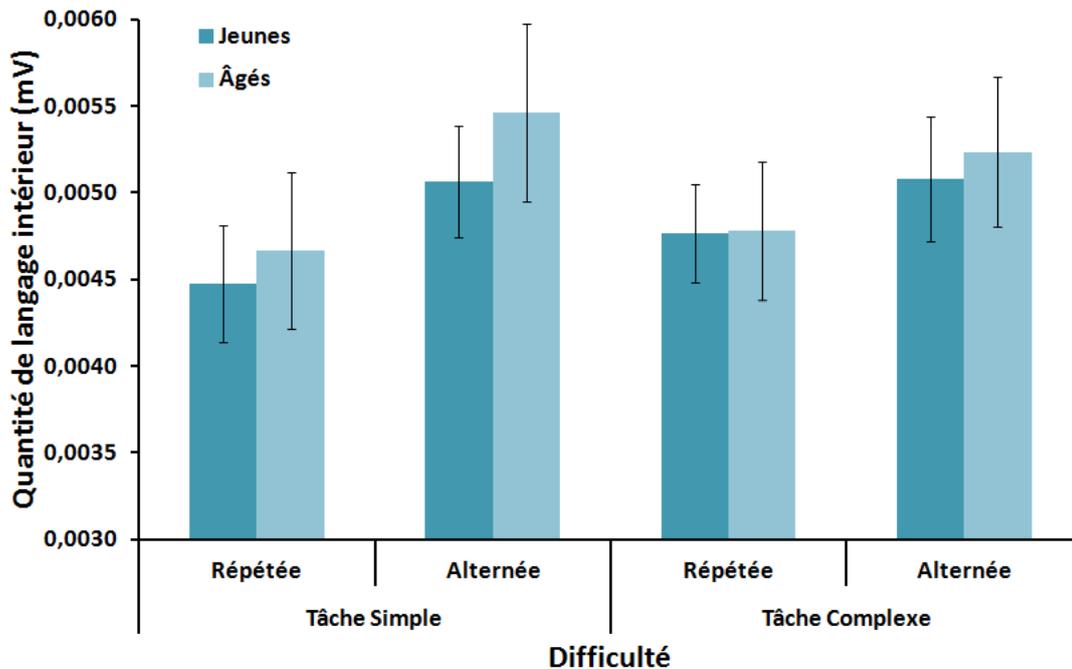


Figure 39 : Quantité moyenne de langage intérieur sollicité divisé par les temps de réponses en fonction de la difficulté des tâches : Tâche simple répétée, Tâche simple alternée, Tâche complexe répétée et Tâche complexe alternée. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Proportion d'erreurs (Figure 40)

Les essais présentant des temps de réponses s'écartant de plus de trois écarts-types de la moyenne ou inférieurs à 200 ms ont été exclus des analyses suivantes. Les proportions moyennes d'erreurs commises par les participants étaient respectivement de .05 ($ET = .07$), .07 ($ET = .09$), .04 ($ET = .06$) et .12 ($ET = .15$) respectivement pour les conditions Tâche simple répétée, Tâche simple alternée, Tâche complexe répétée et Tâche complexe alternée. Les analyses effectuées ont permis de montrer un effet du facteur Alternance, $F(1,52) = 18.1$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .26$, avec une proportion d'erreurs plus élevée lorsque les participants devaient alterner entre les règles. Contrairement aux temps de réponses, aucun effet du facteur Complexité n'a été observé, $F(1,52) = 2.4$, $p = .124$. Les analyses ont cependant mis en évidence un effet d'interaction entre les deux facteurs Alternance et Complexité, $F(1,52) = 9.7$, $p = .003$, $\eta_p^2 = .16$, effet pouvant s'expliquer par une proportion d'erreurs plus élevée dans la condition Tâche complexe alternée. Les analyses n'ont montré aucune

différence significative entre les deux groupes de sujets, $F(1,52) = .005$, $p = .946$. Aucune interaction n'a été observée entre les facteurs Âge et Complexité, $F(1,52) = .17$, $p = .683$, Âge et Alternance, $F(1,52) = .97$, $p = .331$, ainsi qu'entre les trois facteurs Âge, Complexité et Alternance, $F(1,52) = .61$, $p = .439$.

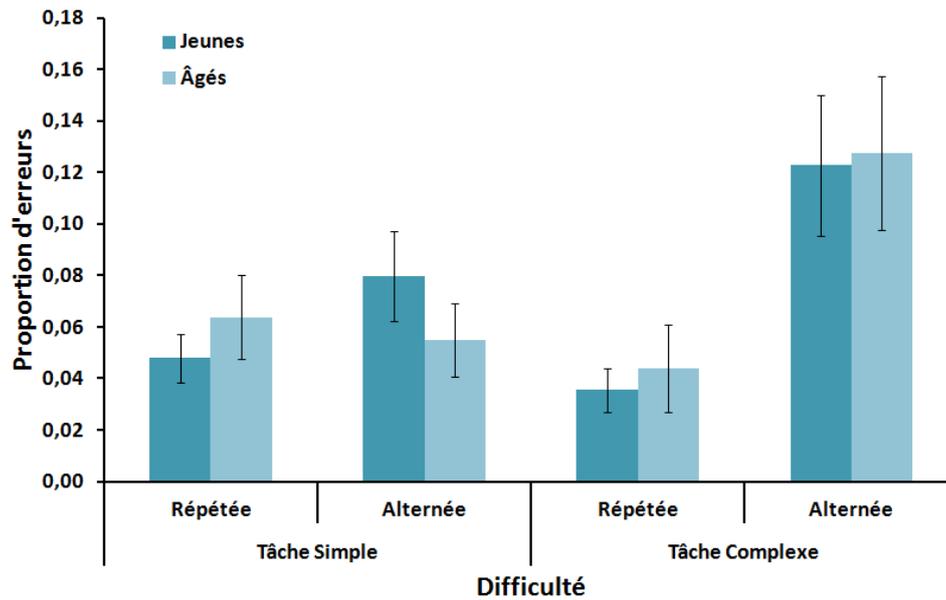


Figure 40 : Proportion d'erreurs en fonction de la difficulté des tâches. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Les données moyennes des temps de réponses, de la quantité de langage et des proportions d'erreurs selon les tâches et les règles sont visibles dans le tableau suivant :

Blocs	Complexité des tâches	Discriminabilité des stimuli	Dimensions pertinentes	RT moyen (ms)		EMG (mV.ms)		Erreurs (%)	
				Jeunes	Âgés	Jeunes	Âgés	Jeunes	Âgés
Répétés	Faible	Faible	Taille	2277	2690	10,8	13,2	15,4	16,8
	Faible	Faible	Couleur	1389	1824	6,0	8,9	2,2	8,9
	Faible	Elevée	Forme	1244	1450	5,8	6,6	0,8	0,2
	Faible	Elevée	Nombre	1227	1461	5,5	6,6	0,8	0,4
	Elevée	Faible	Taille et Couleur	2464	3065	11,6	15,2	2,9	5,6
	Elevée	Elevée	Forme et Nombre	1794	2279	9,1	11,2	4,2	3,2
Alternés	Faible	Faible	Taille ou Couleur	2315	2704	11,9	14,6	9,8	7,2
	Faible	Elevée	Forme ou Nombre	1892	2216	9,6	11,9	6,1	3,8
	Elevée	Faible et elevé	Taille/Couleur ou Forme/Nombre	3585	4422	18,1	23,0	12,1	12,8

Tableau 4 : Données moyennes des deux groupes de participants selon les tâches et les blocs.

Coût d'alternance

Pour calculer le coût d'alternance, nous avons soustrait le temps moyen nécessaire pour réaliser les tâches répétées au temps nécessaire pour alterner entre deux tâches (par

exemple, TSA – TSR). Les analyses montrent un coût d'alternance significativement plus élevé pour la tâche complexe que pour la tâche simple, $F(1,52) = 147.7, p < .001, \eta_p^2 = .74$. Toutefois, aucun effet d'âge ($F(1,52) = 3.8, p = .052$) ni d'interaction ($F(1,52) = 2.8, p = .100$) n'a été observé cette fois-ci. Lorsque les mêmes analyses sont effectuées pour la quantité de langage intérieur sollicité, le même pattern de résultat est observé avec une quantité de langage plus importante pour la tâche complexe, $F(1,52) = 60.6, p < .001, \eta_p^2 = .54$, et sans effet d'âge ($F(1,52) = 2.7, p = .107$), ni d'interaction ($F(1,52) = 1.5, p = .227$).

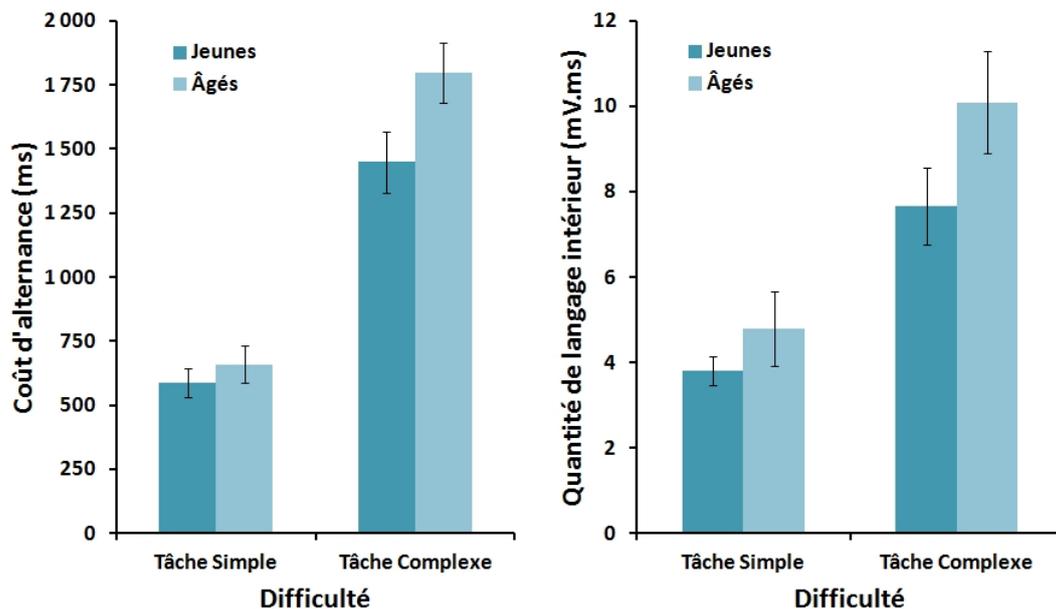


Figure 41 : Coût d'alternance (gauche) et quantité de langage (droite) lorsque l'on soustrait les performances moyennes des tâches répétées aux performances moyennes des tâches alternées. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

7.3. Discussion

L'objectif principal de cette étude était de confirmer les résultats observés avec la tâche d'alternance catégorielle en utilisant une tâche classique de flexibilité. Nous avons pour cela réalisé de façon informatisée l'adaptation du WCST utilisée par Rubinstein, Meyer et Evans (2001).

Nos résultats confirment nos premières conclusions puisque nous avons observé une augmentation du temps de réponse, de la quantité de langage et de la proportion d'erreurs lorsque les participants devaient alterner entre deux règles, et ce d'autant plus lorsque la tâche était complexe. L'amplitude électromyographique obtenue en divisant la quantité de langage par les temps de réponse a montré une plus forte amplitude pour les blocs alternés, ce qui est

également en accord avec nos précédents résultats. Les participants avaient besoin de s'auto-répéter les règles pour actualiser la règle pertinente en mémoire de travail. Il en a également résulté une augmentation du coût d'alternance lorsque la demande cognitive était plus élevée (tâche complexe). Nos résultats concordent ainsi avec ceux observés par Rubinstein en 2001¹⁰. Notre étude apporte toutefois des informations supplémentaires puisque nous avons réalisé cette tâche avec deux populations d'âges différents. Les résultats ont une nouvelle fois montré un temps de réponse plus élevé et une quantité de langage supérieure pour les plus âgés, notamment lorsqu'ils devaient alterner entre les règles dans la tâche complexe. Comme pour les résultats obtenus avec nos tâches d'alternance catégorielle, nous n'avons pas observé un effet de l'âge lors des analyses du coût d'alternance malgré une tendance dans ce sens ($p = .052$). Ces résultats auraient ainsi tendance à mettre en avant un ralentissement des fonctions exécutives. Il serait pertinent ici de reproduire l'expérience avec un groupe de personnes plus âgées, chez qui le déclin cognitif lié à l'âge serait plus avancé.

8. Conclusion des expériences 2, 3, 4, 5 et 6

L'objectif de ces différentes expériences était triple. Nous voulions en premier lieu étudier l'implication du langage intérieur dans des tâches de flexibilité. Les précédentes études utilisaient la méthode de suppression articulatoire, une méthode visant à empêcher la verbalisation des participants pendant les tâches d'alternance. Bien que ces études aient permis de montrer que la suppression du langage intérieur conduisait à une baisse des performances d'alternance (Baddeley, Chincotta, & Adlam, 2001 ; Cinan & Tanor, 2002 ; Dunbar & Sussman, 1995 ; Emerson & Miyake, 2003 ; Goschke, 2000 ; Jersild 1927 ; Kray, Eber, & Lindenberger, 2004 ; Miyake, Emerson, Padilla, & Ahn, 2004 ; Saeki, Saito, & Kawaguchi, 2006), elles ne permettaient pas de montrer dans quelle mesure, dans quelles situations, le langage intérieur était sollicité par les participants. L'ensemble de nos résultats a montré la pertinence et l'efficacité de l'utilisation de l'électromyographie de surface. En effet, nous avons montré que les participants sollicitaient le langage dès l'encodage des règles et que cette quantité de langage était plus importante lorsque la complexité augmentait. L'ensemble de ces résultats tend à montrer l'importance du langage dans des tâches de flexibilité endogène, tâches pour lesquelles aucun indice ne permet de prédire quelle règle est à appliquer. Nous avons également observé une sollicitation supérieure du langage intérieur dans la tâche complexe pendant l'intervalle réponse-stimulus (intervalle d'une durée de 1000

¹⁰ Malgré l'utilisation d'une méthode informatisée, la moyenne des temps de réponse s'avère plus élevée dans notre étude que dans la leur même si on observe un pattern similaire dans les deux études.

ms pour l'ensemble des tâches), résultat qui semble indiquer une autorépétition plus importante des règles lorsque celles-ci sont conflictuelles. Cette information n'aurait pu être obtenue avec la méthode de suppression articulatoire.

Le second objectif de ces différentes études était également de mettre au point une nouvelle tâche de flexibilité, de complexité croissante, offrant la possibilité d'obtenir des structures de décisions multiples, et donc de montrer une évolution dans l'acquisition des capacités de flexibilité. Nos expériences n'ont pas toujours permis de différencier nettement les trois tâches d'alternance, notamment chez les adultes, ceci pouvant peut-être s'expliquer par la relative simplicité de nos tâches. Toutefois, ces tâches présentent des avantages non négligeables dans l'étude de la flexibilité. L'utilisation de cibles différentes des stimuli évite tout effet de clash visuel, comme décrit par Perner et Lang (2002). De plus, l'emploi de stimuli univalents n'entraîne pas une redescription des images comme c'est le cas dans des tâches classiques de flexibilité telles que le DCCS ou le WCST.

Enfin, le dernier objectif de ces expériences était d'évaluer le rôle du langage dans la flexibilité en fonction de l'âge des participants. Plusieurs études ayant mis en avant que le coût d'alternance était plus important chez les personnes âgées (Cepeda, Kramer, & Gonzalez de Sather, 2001 ; Kray & Lindenberger, 2000 ; Kray, Eber, & Lindenberger, 2004 ; Reimers & Maylor, 2005 ; Salthouse, 1998 ; Salthouse, Fristoe, McGuthry, & Hambrick, 1998 ; Zelazo, Craik, & Booth, 2004), nous avons souhaité connaître l'implication du langage intérieur dans ces résultats. Nos observations ont montré un temps d'encodage des règles plus important avec l'âge ainsi qu'une sollicitation plus élevée du langage pendant le temps d'encodage (expériences 4 et 5). Toutefois, aucun effet d'âge n'a pu être observé lors de l'analyse des différents coûts d'alternance, résultat qui semblerait montrer uniquement un ralentissement d'exécution des tâches et non des performances exécutives (expériences 4, 5 et 6). Certaines données nuancent toutefois ces informations puisque les participants les plus âgés (moyenne d'âge de 75 ans dans la tâche d'alternance catégorielle) ont montré un taux d'erreurs supérieur aux plus jeunes.

Ces différentes expériences ont montré que la méthode d'électromyographie de surface semble être une solution appréciable pour étudier l'implication du langage intérieur dans la flexibilité mentale. Cette méthode nous a permis d'évaluer dans quelle mesure les participants sollicitent le langage intérieur et permet ainsi d'apporter des informations supplémentaires à celles obtenues à l'aide de la suppression articulatoire. Dans le but de développer cette technique à d'autres fonctions cérébrales, le chapitre suivant est consacré à

l'étude du langage intérieur dans la mémoire à court terme. L'objectif est d'étudier les effets de primauté et de récence mais aussi l'effet de similarité phonologique, en utilisant une nouvelle fois l'électromyographie laryngée.

CHAPITRE 3 : LA MEMOIRE A COURT TERME

1. Boucle phonologique et effet de similarité

En 1974, Baddeley et Hitch ont développé le concept fondamental de la mémoire de travail en psychologie et neurosciences cognitives. Cette mémoire permet de stocker temporairement et de manipuler des informations qui sont nécessaires à la réalisation d'activités cognitives complexes. Ce système peut être divisé en trois sous-systèmes. Une première composante, la boucle phonologique, est spécialisée dans le stockage temporaire de l'information verbale présentée auditivement ou visuellement. Un second sous-système, le calepin visuo-spatial, est spécialisé dans le stockage temporaire de l'information visuo-spatiale et dans la manipulation des images mentales. Le troisième sous-système, l'administrateur central, supervise les informations fournies par les deux autres composantes. Il va en plus se charger de gérer le passage des informations en mémoire à long terme. Plus récemment, un quatrième sous-système a été proposé, le tampon épisodique, qui est un système de stockage temporaire d'informations multimodales (Baddeley, 2000). Il joue un rôle important dans l'encodage et la récupération d'informations en mémoire épisodique (Figure 42).

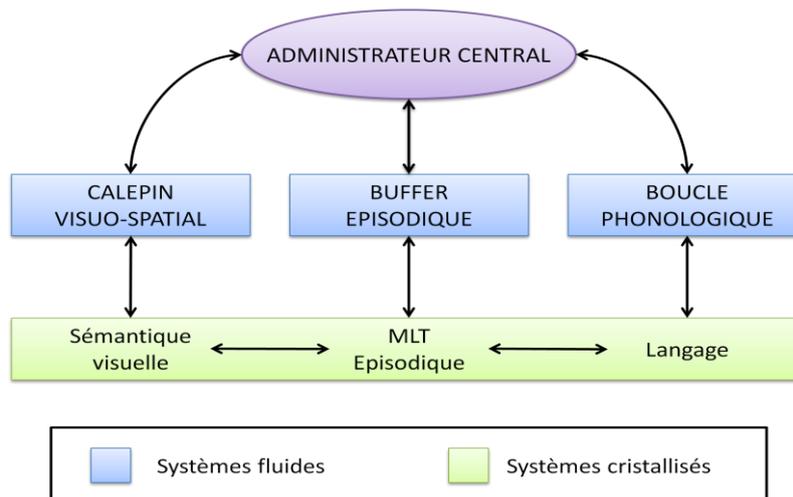


Figure 42 : Modèle de la mémoire de travail (Baddeley, 2000, 2003)

La boucle phonologique est constituée de deux éléments, le stock phonologique qui est un composant passif et la récapitulation articulatoire qui est un composant actif (Baddeley, 2003). Comme son nom l'indique, le stock phonologique permet de stocker de façon

temporaire (quelques secondes) l'information phonologique perçue. Si l'on ne souhaite pas perdre cette information, il est possible de la réactiver par l'intermédiaire de la récapitulation articulatoire. La boucle de récapitulation articulatoire permet un maintien actif de l'information mais ce processus permet également de convertir une information d'origine visuelle en un code verbal et de l'enregistrer ainsi dans le stock phonologique. Sur un plan neuro-anatomique, le stock phonologique semble être localisé dans la région temporo-pariétale gauche correspondant à l'aire 40 de Brodmann. La boucle de récapitulation articulatoire est quant à elle située dans l'aire de Broca (aire 44 de Brodmann), zone cérébrale impliquée dans la production des mots.

L'évaluation de la boucle phonologique est possible par des tests d'empan mnésique. On présente aux participants des listes de mots, de lettres ou de chiffres et on leur demande ensuite de les rappeler dans le bon ordre. Différents phénomènes peuvent être observés dans ce type de tâche, notamment l'effet de position sérielle (dont les effets de primauté et de récence qui indiquent que les premiers et derniers items sont mieux rappelés que ceux centraux ; Atkinson & Shiffrin, 1968, 1971) et l'effet défavorable de la similarité phonologique sur le rappel que nous décrivons plus loin. L'effet de primauté peut s'expliquer par un passage en mémoire à long terme des items qui ont le plus bénéficié de l'autorépétition mentale et l'effet de récence peut s'expliquer par une récupération passive des items en mémoire de travail sans nécessité d'autorépétition¹¹. Le second phénomène fondamental observé dans les performances de rappel est l'effet de similarité phonologique. Il correspond au fait qu'il est plus difficile de rappeler des mots ou des lettres phonologiquement similaires (ex. sac, bac, lac, etc.) qu'une liste de mots dissimilaires (ex. bras, chaise, route, etc.). Plus la similarité entre les représentations phonologiques est élevée, plus il est difficile de pouvoir les différencier lors de l'encodage et de la restitution. La notion d'interférence est à nouveau centrale dans l'explication de cet effet. Cette difficulté repose sur le fait que les informations reçues sont stockées à l'aide d'un code phonologique et par conséquent, plus la similarité entre les représentations phonologiques est élevée, plus il est difficile de pouvoir les différencier et les restituer. Le mode d'entrée de l'information va également avoir un effet sur son rappel. Il semblerait en effet que le rappel soit meilleur lorsque les mots sont présentés de façon

¹¹ Ces explications classiques que l'on trouve dans les manuels de psychologie ne rejoignent pas nécessairement certains modèles actuels qui font l'économie complète des notions de répétition mentale pour expliquer ces effets. Par exemple, Brown, Neath, et Chater (2007) ont élaboré un modèle simple de discrimination des items prédisant que les items les plus isolés sont ceux échappant le plus à l'interférence, la cause principale de l'oubli. Ce modèle prédit la courbe de position sérielle tout autant que les effets d'isolation d'un item (l'isolation est manipulée expérimentalement par des temps de pause plus longs avant et après l'item).

auditive plutôt que visuelle puisque les informations auditives n'ont pas besoin d'être recodées pour être stockées dans la boucle phonologique.

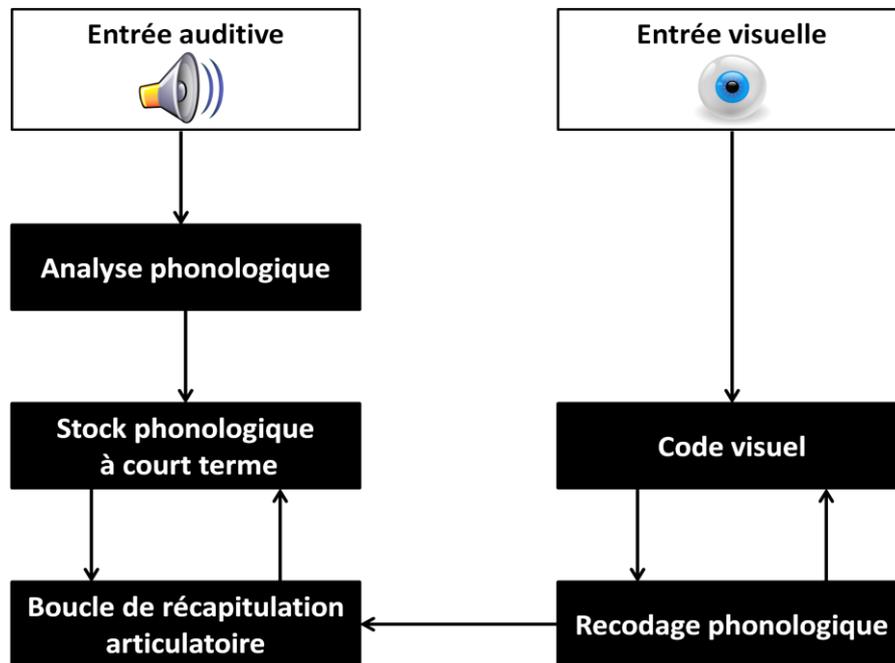


Figure 43 : Schéma fonctionnel de la boucle phonologique

Il a été montré que la prononciation de mots sans rapport avec la tâche (ex. ba, ba, ba, etc.) diminue nettement les performances des participants pendant les tâches d'empan. Ceci s'explique par le fait que l'emploi de la suppression articulaire empêche l'utilisation de la boucle de récapitulation nécessaire au stockage temporaire de l'information. En outre, il est intéressant de noter que l'effet de similarité phonologique est réduit, voire supprimé par la suppression articulaire lorsque les informations à mémoriser sont présentées de façon visuelle (Baddeley & Larsen, 2007). La suppression articulaire empêche le recodage phonologique et donne ainsi un accès direct au stock phonologique. Cet effet n'est, par ailleurs, pas observé lorsque la présentation des stimuli est auditive, confirmant le fait que les informations auditives accèdent directement au stock phonologique. D'autres paramètres permettent également d'atténuer cet effet tel que le fait de taper en rythme avec la main (Saito, 1994) ou encore de laisser un temps plus important entre l'encodage et la rétention pendant lequel une tâche de distraction est réalisée (Baddeley & Ecob, 1970). Ce dernier résultat est toutefois contredit par d'autres études dans lesquelles l'effet de similarité est toujours présent malgré des intervalles de plusieurs secondes (Baddeley, 1968 ; Posner & Konick, 1966). Il semble donc que des conditions particulières soient requises pour que l'effet de similarité phonologique soit atténué.

L'étude suivante a été réalisée en collaboration avec John Marsh, *Research Fellow* en psychologie (University of Central Lancashire) et Rob Hugues, *Lecturer* en psychologie à la Royal Holloway (University of London) dont les travaux mutuels se sont notamment focalisés sur les effets de la distraction auditive lors de tâches d'empan mnésique¹². Pour ce travail collaboratif, nous avons principalement choisi d'étudier deux effets classiques en mémoire à court terme, les effets de position sérielle et de similarité phonologique. Dans cette perspective, nous avons mis au point une simple tâche d'empan mnésique dans laquelle les participants devaient mémoriser des séries de lettres similaires ou dissimilaires, tâche que nous avons couplée à l'électromyographie. A l'aide de cette étude préliminaire, nous souhaitons déterminer l'implication du langage intérieur dans ces deux effets afin de préciser les données actuelles concernant le lien entre boucle phonologique, mémoire et langage.

2. Étude du langage intérieur et effet de similarité - Expérience 7

Afin d'étudier simultanément les effets de position sérielle et de similarité sous l'angle du langage intérieur, nous avons élaboré une tâche classique d'empan mnésique dans laquelle les participants devaient mémoriser plusieurs séries de sept lettres similaires (B, C, D, G, P, T et V) et de sept lettres dissimilaires (F, H, J, K, M, R et Q) présentées visuellement. Un enregistrement électromyographique a été effectué en parallèle de cette tâche.

2.1. Matériel et méthode

Participants

Pour cette étude, quarante-huit étudiants en licence de psychologie à l'Université de Franche-Comté ont été recrutés ($M = 20.23$; $ET = 1.5$; 10 hommes et 38 femmes) en échange

¹² Ils ont par exemple observé que le rappel de stimuli visuels était diminué lorsque des mots distracteurs étaient entendus durant la tâche, et ce d'autant plus lorsque ces mots étaient reliés sémantiquement aux stimuli visuels (Marsh, Hughes, & Jones, 2008). Ils se sont également intéressés aux effets liés à la variabilité des voix présentant les stimuli et ont par exemple mis en évidence une diminution du rappel lorsque la présentation de stimuli auditifs alternait entre une voix masculine et une voix féminine (e.g., FMFMFMFM), effet pouvant s'expliquer par un conflit entre l'organisation perceptuelle des stimuli par type de voix et l'ordre réel de présentation de ces derniers (Marsh, Hughes, & Jones, 2009). Cet effet est par ailleurs augmenté lorsque les tâches exigent un rappel ordonné des stimuli (on demande par exemple aux participants quelle lettre est apparue après la lettre x) par rapport à une tâche ne nécessitant pas de rappel sériel (les participants doivent indiquer quel item est manquant parmi ceux présentés). Ces résultats renforcent l'idée d'une indépendance entre l'ordre réel des stimuli et leur organisation perceptuelle en mémoire (Hughes, Marsh, & Jones, 2011). Toutefois, l'effet de distraction auditive (e.g., lettres lues en alternance par une voix masculine et une voix féminine) peut être supprimé lorsque les stimuli visuels sont relativement difficiles à encoder, c'est-à-dire lorsque la demande attentionnelle est élevée (les chiffres à mémoriser sont dégradés par la présence de bruits sur l'image et par une augmentation de la transparence). Cet effet peut également disparaître lorsqu'un message prévient les participants d'une alternance entre les voix (Hughes, Hurlstone, Marsh, Vachon, & Jones, 2013).

d'un certificat de passation d'expérience. Chaque étudiant a rempli un formulaire de consentement avant de réaliser l'expérience.

Design

Cette étude comportait deux conditions correspondant aux deux types de séries de lettres à mémoriser, similaire versus dissimilaire. L'ordre de ces conditions était permuté entre chaque sujet. Dans la condition Similaires, les lettres étaient phonologiquement similaires les unes avec les autres : B, C, D, G, P, T et V. A l'inverse, dans la condition Dissimilaires, les lettres étaient phonologiquement différentes les unes des autres : F, H, J, K, M, R et Q.

Chaque condition comportait 24 séries composées d'une phase de mémorisation et d'une phase de rappel. Avant le début de chaque série, un bouton "commencer" apparaissait au centre de l'écran. Lorsque le participant était prêt, il lui suffisait de cliquer sur ce bouton à l'aide de la souris pour lancer la série. Après la présentation d'une croix de fixation durant 1500 ms, les sept lettres de la série apparaissaient les unes après les autres avant de toutes réapparaître à l'écran lors de la phase de rappel. Le participant devait alors cliquer sur les lettres dans leur ordre d'apparition. Celles-ci s'inscrivaient au fur et à mesure au bas de l'écran dans des cases prévues à cet effet.

Lors de la phase de présentation, chaque lettre apparaissait pendant 250 ms avec une pause de 750 ms entre chaque. Une pause de 1750 ms est allouée entre la présentation de la septième et dernière lettre et la phase de rappel. Concernant la phase de rappel, les participants avaient l'obligation de cliquer sur sept lettres pour pouvoir passer à la série suivante. Dans chaque série, les lettres n'étaient présentées qu'une seule et unique fois mais il était possible de cliquer plusieurs fois sur une même lettre lors de la phase de réponse. Une fois une lettre sélectionnée, il n'était pas possible de revenir en arrière mais les participants avaient la possibilité de re cliquer sur une lettre déjà sélectionnée. De cette manière, il était possible d'obtenir une seule faute dans une série.

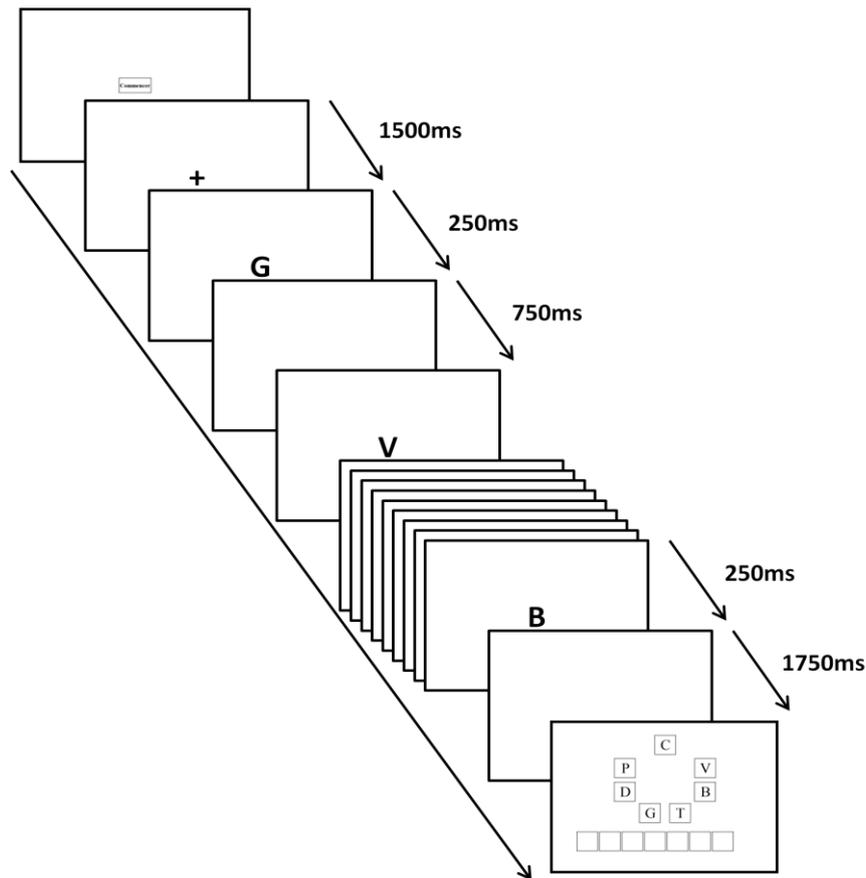


Figure 44 : Déroulement de la tâche de mémoire à court terme

Avant le début de l'expérience, les consignes ont été expliquées une première fois à chaque participant par l'expérimentateur. Il leur était demandé d'essayer autant que possible de ne pas parler à haute voix afin d'obtenir des conditions similaires pour chaque participant. Une fois l'expérience commencée, les consignes ont été rappelées visuellement avant chaque condition.

Paramètres étudiés

Dans cette étude, l'exactitude des réponses (proportion de réussite) a été prise en compte ainsi que la quantité de langage sollicité entre l'apparition de chaque lettre.

2.2. Résultats

Pour cette étude, des ANOVAs à mesures répétées ont été effectuées. Dans cet objectif, les données ont été agrégées afin d'obtenir une mesure unique moyenne par participant pour chaque variable dépendante. La même méthode d'agrégation a été utilisée pour les ANOVAs à mesures répétées effectuées pour le facteur Similarité. Des comparaisons

par paire au moyen d'un ajustement de Bonferroni ont été calculées pour toutes les conditions de chaque facteur intra-sujet.

Justesse des réponses en fonction du type de lettres, de la position des lettres et de l'ordre de passation de l'expérience

Analyse effectuée sur les scores d'empan strict : une seule erreur parmi le rappel des sept lettres entraîne un score de 0.

L'analyse à mesures répétées réalisée sur la proportion de rappel correct pour les lettres similaires ($M = .33$; $ET = .19$) et dissimilaires ($M = .45$; $ET = .23$), a indiqué une différence significative entre les deux conditions, $F(1,46) = 19.6$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .30$. Ces résultats ont en effet montré un meilleur rappel lorsque les lettres étaient dissimilaires que lorsqu'elles étaient similaires. Il n'existe pas d'effet principal de l'ordre de passation de l'expérience sur le rappel, $F(1,46) = 3.1$, $p = .09$. Toutefois, il existe une interaction significative entre l'ordre de passation et le type de lettres, $F(1,46) = 6.3$, $p = .016$, $\eta_p^2 = .12$, due à l'augmentation du taux de rappel des lettres dissimilaires lorsque les participants ont effectué le rappel dans l'ordre similaire-dissimilaire. On observe en effet un effet simple de l'ordre de passation pour la condition Dissimilaires, $F(1,46) = 6.64$, $p = .013$, $\eta_p^2 = .13$.

Analyse effectuée sur les scores de rappel partiel, scores allant de 0 à 7 selon le nombre de lettres correctement rappelées (Figure 45) :

L'analyse à mesures répétées réalisée sur la proportion de rappel correct pour les lettres similaires et dissimilaires, respectivement 4.73 ($ET = .82$) et 5.26 ($ET = .99$), a indiqué une différence significative entre les deux conditions, $F(1,46) = 19.9$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .30$. Les résultats ont effectivement montré un meilleur rappel lorsque les lettres étaient dissimilaires que lorsqu'elles étaient similaires. Il existe cette fois-ci un effet principal de l'ordre de passation de l'expérience sur le rappel, $F(1,46) = 4.3$, $p = .044$, $\eta_p^2 = .09$, avec un meilleur rappel des lettres lorsque les participants ont commencé l'expérience par le rappel des lettres similaires ($M = 5.2$) que lorsqu'ils ont débuté la tâche avec les lettres dissimilaires ($M = 4.8$). Il existe néanmoins une interaction significative entre l'ordre de passation et le type de lettres, $F(1,46) = 7.5$, $p = .009$, $\eta_p^2 = .14$, due à l'augmentation du taux de rappel des lettres dissimilaires lorsque les participants ont effectué le rappel dans l'ordre similaire-dissimilaire. On observe effectivement un effet simple de l'ordre de passation pour la condition Dissimilaires, $F(1,46) = 8.74$, $p = .005$, $\eta_p^2 = .16$.

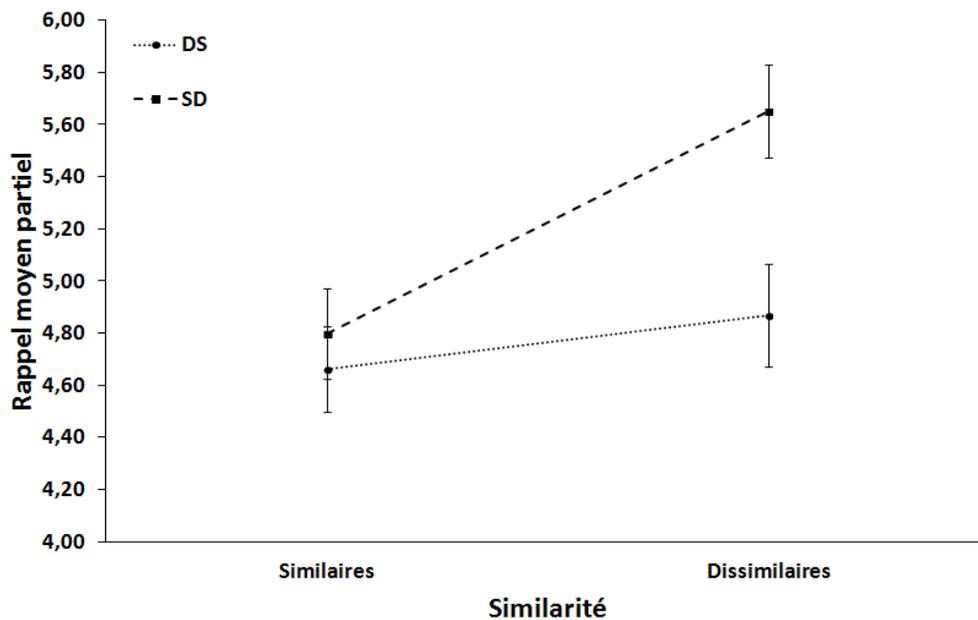


Figure 45 : Proportion de rappel partiel correct en fonction du type de lettres, similaires ou dissimilaires, et en fonction de l'ordre de passation de l'expérience. SD : Similaires puis Dissimilaires ; DS : Dissimilaires puis Similaires. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Taux de rappel en fonction de la position et du type de lettres (Figure 46)

L'analyse à mesures répétées réalisée sur la proportion de rappel correct selon la position des lettres a mis en évidence une différence significative, $F(6,282) = 155.4, p < .001, \eta_p^2 = .77$). Les comparaisons par paire effectuées ont montré une différence significative entre chaque lettre, excepté entre la cinquième et la septième lettre ($p = 1$). Le taux de rappel diminue de la première à la sixième lettre avant d'augmenter pour la dernière lettre. On observe également un effet principal du type de lettres ($F(1,47) = 17.5, p < .001, \eta_p^2 = .27$) sur le rappel qui est meilleur pour les lettres dissimilaires ($M = .75$ v $M = .68$). Toutefois, il existe une interaction significative entre la position des lettres et le type de lettres, $F(6,282) = 6.4, p < .001, \eta_p^2 = .12$, semblant s'expliquer par l'augmentation de l'écart entre le rappel des lettres similaires et dissimilaires avec le nombre de lettres à mémoriser.

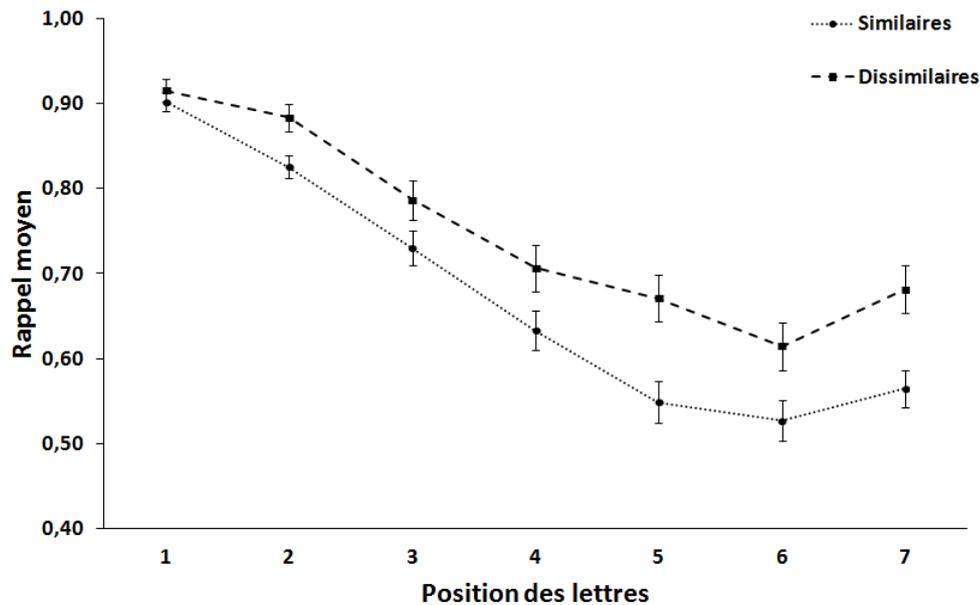


Figure 46 : Proportion moyenne de rappel en fonction de la position des lettres. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard

Quantité de langage en fonction de la position et du type de lettres.

Pour les analyses suivantes, les données de deux participants ont été retirées suite à des enregistrements électromyographiques de mauvaise qualité.

Les analyses à mesures répétées effectuées ont mis en évidence un effet significatif de la position des lettres sur la quantité de langage sollicitée par les participants, $F(6,270) = 46.4$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .51$ (Figure 47). Les comparaisons par paire ont notamment révélé une augmentation systématique de la quantité de langage pour la quatrième lettre par rapport aux six autres ($p_s < .001$) et entre la cinquième et septième lettre ($p = .004$). Les résultats ont également montré un effet de la similarité des lettres à encoder sur la quantité de langage, $F(1,45) = 5.0$, $p = .03$, $\eta_p^2 = .51$, avec une quantité de langage supérieure pour les lettres dissimilaires ($M = 4.8$ mV.ms) par rapport aux lettres similaires ($M = 4.6$ mV.ms). Il n'existe toutefois aucune interaction entre les facteurs Position et Similarité des lettres, $F(6,570) = 1.4$, $p = .235$.

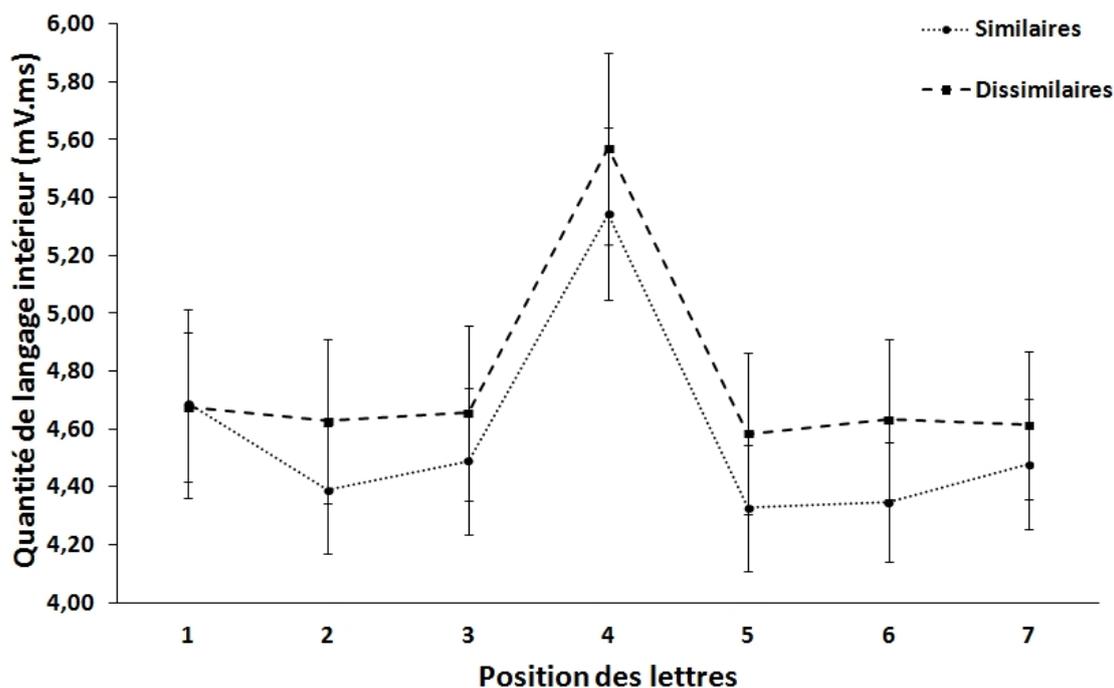


Figure 47 : Quantité de langage sollicitée en fonction de la position des lettres et du type de lettres (similaires ou dissimilaires). Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

L'augmentation de la quantité de langage entre la quatrième lettre et la cinquième lettre étant un résultat inattendu, nous avons vérifié et constaté un défaut dans le programme E-Prime à l'origine de ce problème. Le programme originel contenait, en plus des lettres, des sons visant à créer une interférence avec la tâche. Ces sons pouvaient être présentés avant, au même moment ou après l'apparition de chaque lettre. De ce fait, le programme contenait plusieurs événements autres que ceux consacrés à l'affichage des lettres. Pour cette expérience, les sons ont été enlevés du programme mais pas les événements leur étant consacrés. En examinant attentivement le programme, il s'est avéré qu'un événement supplémentaire était présent entre l'apparition de la quatrième lettre et de la cinquième lettre par rapport aux autres. Cet événement a donc été responsable d'une augmentation du temps entre la quatrième et la cinquième lettre et donc à l'origine d'un temps de verbalisation supplémentaire expliquant le pic observé pour la quatrième lettre. En mettant à jour ce problème, une autre complication a été décelée. La présence du code de synchronisation entre l'électromyographie et E-Prime augmentait également le temps entre chaque lettre. Au final, au lieu d'avoir l'apparition d'une lettre toutes les 1000 millisecondes, le temps était augmenté de 164 ms environ pour toutes les lettres, excepté pour la quatrième qui voyait son temps augmenté de 400 ms. Les analyses effectuées sur ces données ne sont donc pas satisfaisantes, mais nous avons souhaité les conserver puisqu'elles permettent néanmoins de montrer que les

participants sollicitaient plus le langage pour les lettres dissimilaires que pour les lettres similaires (l'erreur du programme n'influence pas ce résultat). Toutefois, nous avons tenté de corriger artificiellement ces données erronées afin d'obtenir un temps équivalent entre la présentation de chaque lettre. Nous avons pour cela réalisé un simple produit en croix pour le temps entre les quatrième et cinquième lettres. Les analyses suivantes porteront sur ces données.

Les analyses à mesures répétées effectuées ont mis en évidence un effet significatif de la position des lettres sur la quantité de langage sollicitée par les participants, $F(6,270) = 2.4$, $p = .029$, $\eta_p^2 = .05$ (Figure 48). Les comparaisons par paire n'ont toutefois révélé aucune différence significative entre les différentes positions. La similarité des lettres a également montré un effet significatif sur la quantité de langage intérieur, $F(1,45) = 5.1$, $p = .029$, $\eta_p^2 = .10$, avec une quantité de langage supérieure pour les lettres dissimilaires ($M = 3.95$ mV.ms) par rapport aux lettres similaires ($M = 3.80$ mV.ms). Il n'existe aucune interaction entre les deux variables, $F(6,270) = 1.3$, $p = .24$.

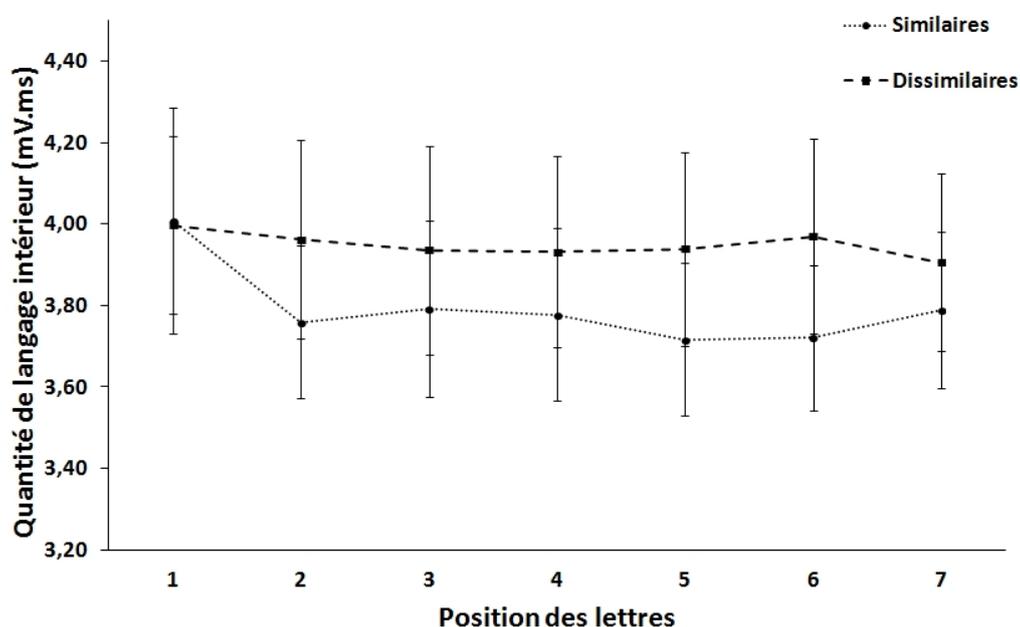


Figure 48 : Quantité de langage sollicitée en fonction de la position des lettres et du type de lettres (similaires ou dissimilaires) avec les données corrigées. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Afin d'observer si nous obtenons des différences de rappel en fonction du degré de verbalisation des participants et du type de lettres, nous avons choisi de diviser ceux-ci en

deux groupes, ceux qui ont faiblement sollicité le langage et ceux qui l'ont sollicité de façon plus conséquente. Pour cela, nous avons séparé les participants par la médiane obtenue avec les données moyennes de langage total.

Les analyses effectuées montrent une fois encore un effet de la similarité sur le rappel partiel, $F(1,44) = 18.4$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .30$ avec un meilleur rappel lorsque les lettres sont dissimilaires. Nous n'observons cependant aucun effet de la quantité de verbalisation sur le rappel, $F(1,44) = .33$, $p = .57$ (Figure 49).

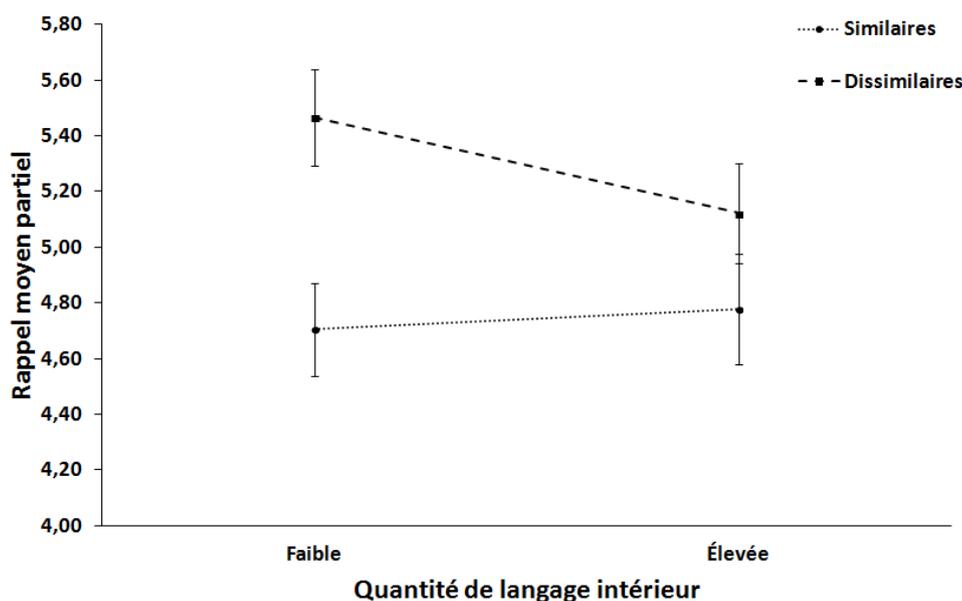


Figure 49 : Rappel partiel selon le niveau de verbalisation des participants et selon le type de lettres (similaires ou dissimilaires).

Nous obtenons des résultats similaires lorsque les analyses sont effectuées sur le taux de rappel strict. Le rappel est meilleur lorsque les lettres sont dissimilaires, $F(1,44) = 20.5$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .32$, et il n'y a pas de différences entre les participants qui verbalisent faiblement et ceux qui verbalisent beaucoup, $F(1,44) = .59$, $p = .45$, et ce, même pour les lettres dissimilaires uniquement.

2.3. Discussion

Les résultats de cette expérience ont montré un meilleur rappel des lettres dissimilaires ainsi qu'une quantité de langage supérieure pour celles-ci par rapport aux lettres similaires. Malgré un effet significatif de la position des lettres, nous n'avons pas observé de différences dans les comparaisons par paire concernant la quantité de langage intérieur. Nos données

reposant toutefois sur des données corrigées et non exactes, il est difficile de tirer toute conclusion de ces résultats. Il est effectivement possible que la quantité de langage varie au cours de la présentation des lettres et ne soit donc pas linéaire au cours de l'intervalle inter-stimuli. Nous pouvons par exemple imaginer que certains participants répètent les lettres une fois dès leur apparition alors que d'autres préfèrent les répéter le plus de fois possible pendant chaque intervalle. De ce fait, nous avons choisi de reproduire l'expérience en corrigeant le programme E-Prime afin de préciser ces résultats.

3. Étude du langage intérieur et effet de similarité version 2 - Expérience 8

Afin d'effectuer nos analyses sur des données exactes, nous avons reproduit l'expérience en supprimant l'événement supplémentaire à l'origine du pic observé pour la quatrième lettre et en déplaçant le code de synchronisation entre l'électromyographie et E-Prime, obtenant ainsi un temps strictement égal à 1000 ms entre chaque lettre. Le matériel et la méthode sont en tous points similaires à l'expérience précédente.

Pour cette étude, trente-neuf étudiants en licence de psychologie à l'Université de Franche-Comté ont été recrutés ($M = 19.1$; $ET = 1.74$; 8 hommes et 31 femmes) en échange d'un certificat de passation d'expérience. Chaque étudiant a rempli un formulaire de consentement avant de réaliser l'expérience. Les données d'un participant ont été retirées suite à un taux de rappel moyen inférieur à deux lettres par essai.

3.1. Résultats

Comme pour l'expérience précédente, des ANOVAs à mesures répétées ont été effectuées. Dans cet objectif, les données ont été agrégées afin d'obtenir une mesure unique moyenne par participant pour chaque variable dépendante. La même méthode d'agrégation a été utilisée pour les ANOVAs à mesures répétées effectuées pour le facteur Similarité. Des comparaisons par paire au moyen d'un ajustement de Bonferroni ont été calculées pour toutes les conditions de chaque facteur intra-sujet.

Taux de rappel strict en fonction du type de lettres et de l'ordre de passation de l'expérience

L'analyse suivante a été effectuée sur le score d'empan strict. Pour rappel, la réalisation d'une seule erreur parmi le rappel des sept lettres d'un essai entraîne un score de 0. L'analyse à mesures répétées réalisée sur la proportion de rappel correct pour les lettres

similaires et dissimilaires, respectivement $.24$ ($ET = .19$) et $.35$ ($ET = .25$), a indiqué une différence significative entre les deux conditions, $F(1,36) = 23.2$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .39$). Les analyses ont ainsi mis en avant un meilleur rappel des participants lorsque les lettres étaient dissimilaires que lorsqu'elles étaient similaires. Il n'existe pas d'effet principal de l'ordre de passation de l'expérience ($F(1,36) = 0.18$, $p = .67$) sur le rappel. Toutefois, il existe une interaction significative entre l'ordre de passation et le type de lettres, $F(1,36) = 6.9$, $p = .013$, $\eta_p^2 = .16$, montrant qu'il a été plus difficile pour les participants de commencer l'expérience avec le rappel des lettres similaires.

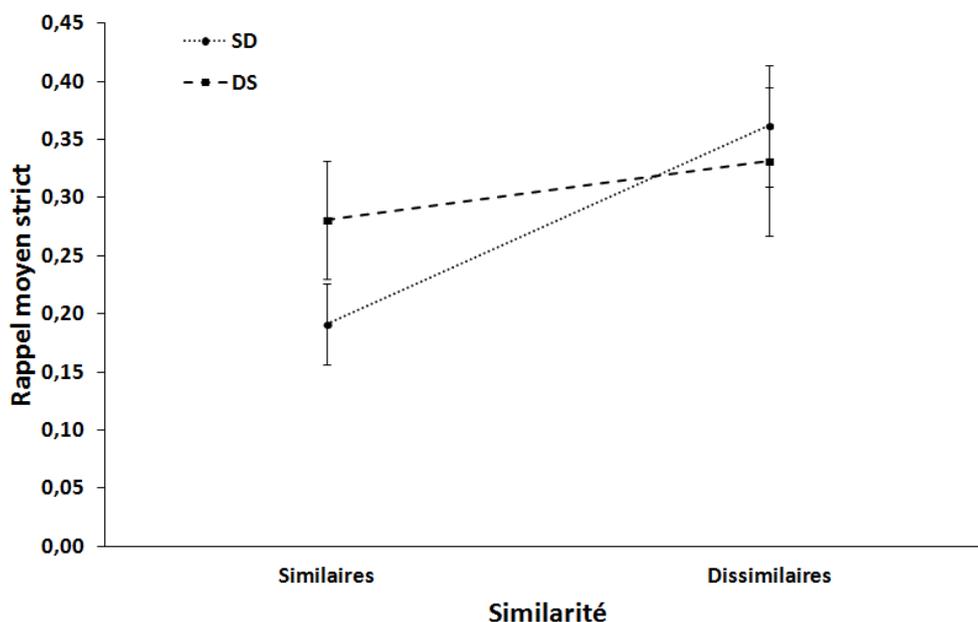


Figure 50 : Proportion de rappel correct en fonction du type de lettres, similaires ou dissimilaires, et en fonction de l'ordre de passation de l'expérience ; SD : Similaires puis Dissimilaires ou DS : Dissimilaires puis Similaires. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Taux de rappel partiel en fonction du type de lettres et de l'ordre de passation de l'expérience

Les analyses suivantes ont été effectuées sur les scores de rappel partiel, scores allant de 0 à 7 selon le nombre de lettres correctement rappelées dans un essai. L'analyse à mesures répétées réalisée sur la proportion de rappel correct pour les lettres similaires et dissimilaires, respectivement 4.08 ($ET = 1.1$) et 4.59 ($ET = 1.3$), a indiqué une différence significative entre les deux conditions, $F(1,36) = 18.2$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .34$, montrant encore un meilleur rappel des lettres dissimilaires par rapport aux lettres similaires (Figure 51). Une nouvelle fois, il n'existe pas d'effet principal de l'ordre de passation de l'expérience sur le rappel, $F(1,36) =$

0.6, $p = .8$. Il existe néanmoins une interaction significative entre l'ordre de passation et le type de lettres, $F(1,36) = 7.4$, $p = .01$, $\eta_p^2 = .17$, pouvant s'expliquer par un effet inverse de l'ordre de passation sur le rappel en fonction du type de lettres.

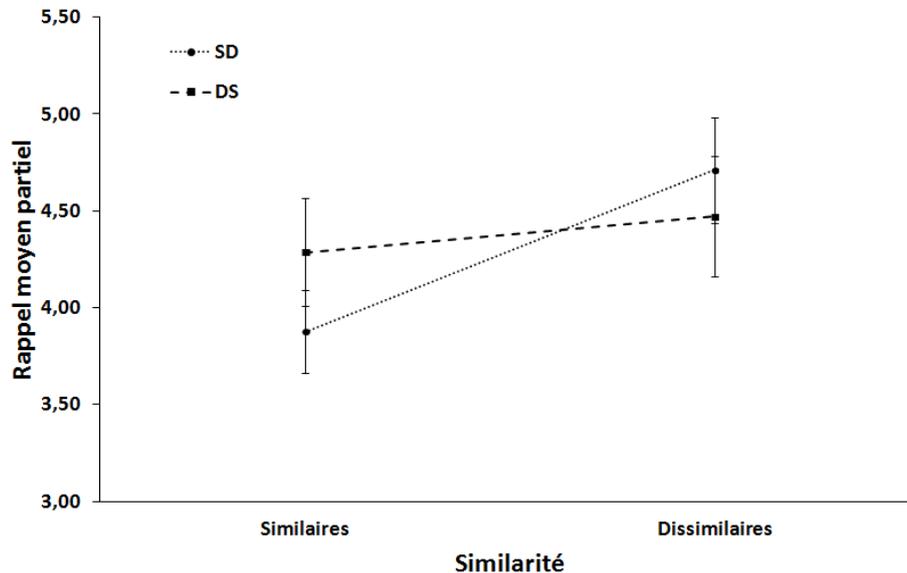


Figure 51 : Proportion de rappel partiel en fonction du type de lettres, similaires ou dissimilaires, et en fonction de l'ordre de passation de l'expérience ; SD : Similaires puis Dissimilaires ou DS : Dissimilaires puis Similaires. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Taux de rappel en fonction de la position et du type de lettres

L'analyse à mesures répétées réalisée sur la proportion de rappel correct selon la position des lettres a mis en évidence une différence significative, $F(6,222) = 144.9$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .80$). Les données moyennes sont visibles dans l'annexe 5. Les comparaisons par paire effectuées ont montré une différence significative entre chaque lettre ($p_s < .02$) excepté entre la quatrième et la septième lettre ($p = 1$), entre la cinquième et la sixième lettres ($p = 1$) et entre la cinquième et septième lettres ($p = .06$). Le taux de rappel diminue de la première à la sixième lettre avant d'augmenter pour la dernière lettre. On observe également un effet principal du type de lettres ($F(1,37) = 15.5$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .30$) sur le rappel qui est meilleur pour les lettres dissimilaires. Toutefois, il existe une interaction significative entre la position des lettres et le type de lettres, $F(6,222) = 4.0$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .10$, semblant s'expliquer par l'augmentation de l'écart entre le rappel des lettres similaires et dissimilaires pour les dernières lettres (Figure 52).

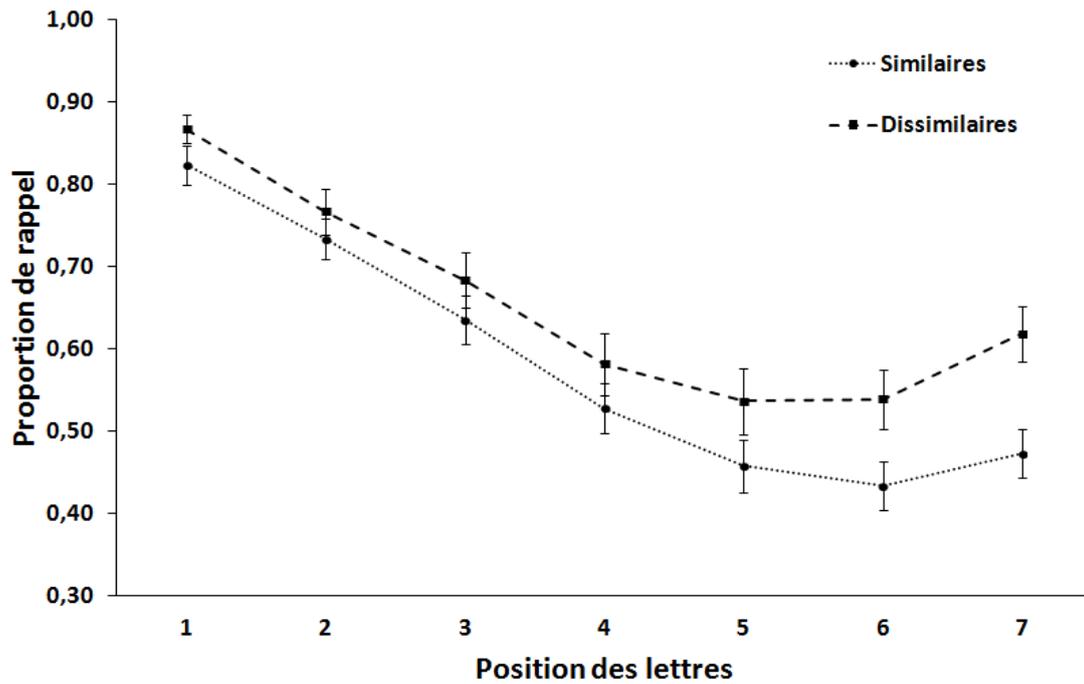


Figure 52 : Proportion moyenne de rappel en fonction de la position des lettres et de leur similarité. Les barres d'erreurs représentent +/- une erreur standard.

Quantité de langage en fonction de la position et du type de lettres

Pour les analyses suivantes, les données de quatre participants ont été retirées suite à des enregistrements électromyographiques de mauvaise qualité (décollement des électrodes). Les données moyennes sont visibles dans l'annexe 5. Les analyses à mesures répétées effectuées ont mis en évidence un effet significatif de la position des lettres sur la quantité de langage sollicitée par les participants, $F(6,198) = 4.8$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .13$ (Figure 53). Les comparaisons par paire ont révélé une quantité de langage inférieure ($p = .007$) pour la troisième lettre ($M = 3.6$ mV.ms) par rapport à la première ($M = 3.9$ mV.ms). À l'inverse, le type de lettres à encoder ne montre pas d'effet sur la quantité de langage, $F(1,33) = .029$, $p = .87$. Aucun effet d'interaction entre les facteurs Position et Similarité n'a été mis en avant, $F(6,198) = 1.6$, $p = .142$.

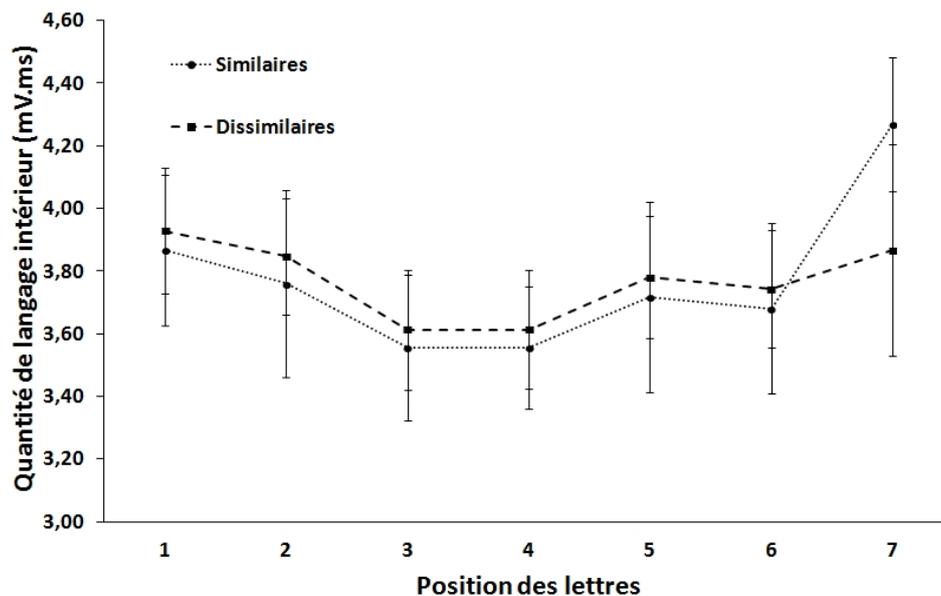


Figure 53 : Quantité de langage sollicitée en fonction de la position des lettres et du type de lettres (similaires ou dissimilaires). Les barres d'erreurs sont à +/- une erreur standard.

Taux de rappel en fonction du niveau de verbalisation des participants

Afin d'observer si nous obtenons des différences de rappel en fonction du degré de verbalisation des participants et du type de lettres, nous avons choisi de diviser ceux-ci en deux groupes, ceux qui ont peu parlé et ceux qui ont sollicité le langage de façon plus conséquente. Pour cela, nous avons séparé les participants de par la médiane obtenue avec les données moyennes de langage total. Les données moyennes sont visibles dans le tableau ci-dessous :

		Quantité de langage	
		Faible	Élevée
Rappel partiel	Similaire	4.55 (1.07)	3.70 (0.99)
	Dissimilaire	5.08 (1.19)	4.22 (1.25)
Rappel strict	Similaire	0.32 (0.20)	0.16 (0.15)
	Dissimilaire	0.44 (0.26)	0.27 (0.23)

Tableau 5 : Rappel moyen des lettres en fonction de leur similarité et de la quantité de langage des participants. Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.

Les analyses effectuées ont une nouvelle fois montré un effet du type de lettres sur le rappel partiel, $F(1,32) = 14.5$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .31$ avec un meilleur rappel lorsque les lettres sont dissimilaires (Figure 54). Fait intéressant, nous avons également observé un effet de la quantité de langage sur le rappel, $F(1,32) = 5.6$, $p = .025$, $\eta_p^2 = .15$, avec de meilleurs résultats pour les participants sollicitant de façon moindre le langage intérieur ($M = 4.8$ vs $M = 4.0$). Les analyses n'ont pas mis en évidence d'effet d'interaction, $F(1,32) = .001$, $p = .98$.

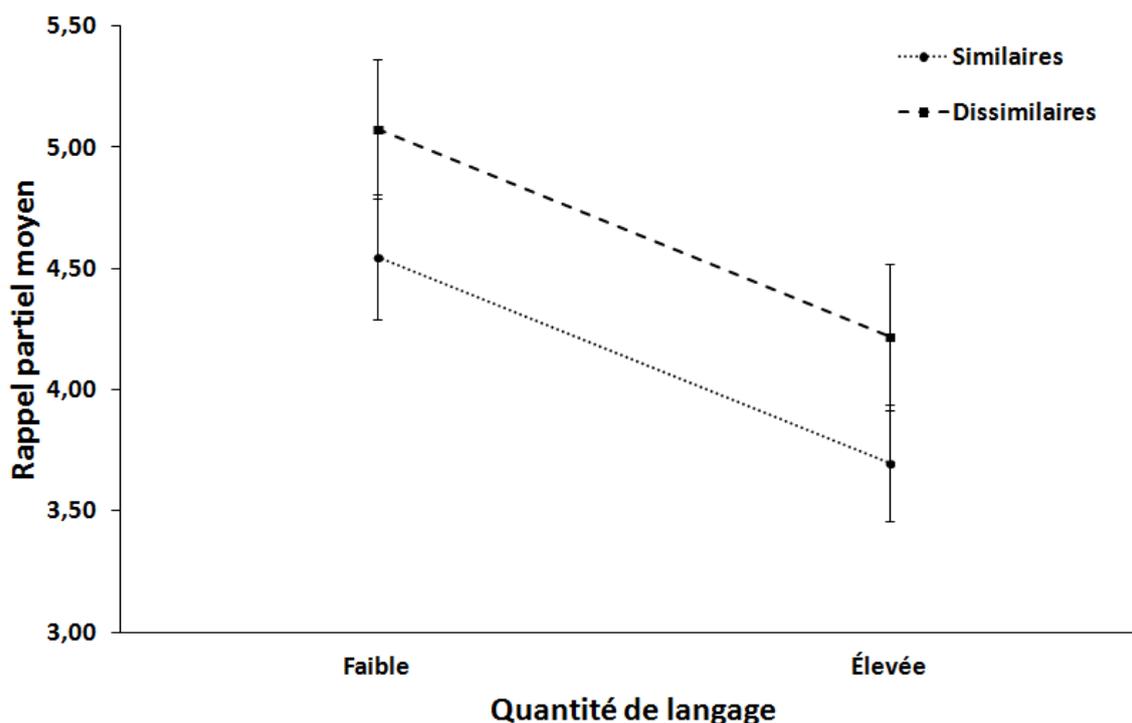


Figure 54 : Rappel partiel selon le niveau de verbalisation des participants et selon le type de lettres (similaires ou dissimilaires).

Nous avons obtenu des résultats similaires lorsque les analyses ont été effectuées avec le taux de rappel strict. Le rappel était meilleur lorsque les lettres étaient dissimilaires, $F(1,32) = 18.2$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .36$, et les participants sollicitant de façon plus faible le langage ont de meilleures performances, $F(1,32) = 6.2$, $p = .018$, $\eta_p^2 = .16$. Une nouvelle fois, aucun effet d'interaction entre les facteurs Similarité et Verbalisation n'a été mis en avant, $F(1,32) = .03$, $p = .85$.

3.2. Discussion

L'objectif de cette expérience était d'étudier l'implication du langage dans les effets de position sérielle et de similarité phonologique à l'aide de l'électromyographie de surface. Les participants devaient mémoriser puis rappeler dans l'ordre plusieurs séries de sept lettres similaires et de sept lettres dissimilaires. Ces résultats, obtenus sur un échantillon restreint de participants, sont encourageants car ils ont permis de montrer que la quantité de langage sollicitée pendant l'apprentissage de lettres similaires ou dissimilaires interfère sur le taux de rappel de celles-ci. La proportion de rappel des lettres similaires et dissimilaires montre un effet de position sérielle avec de meilleures performances pour les premières lettres et les dernières. Malgré un effet plus faible, un pattern similaire est observé concernant la quantité de langage avec une sollicitation plus faible du langage pour les lettres centrales. Comme l'ont montré de nombreuses études (Baddeley, 1966 ; Conrad, 1964 ; Conrad & Hull, 1964 ; Farrell & Lewandowsky, 2003), nous avons observé un meilleur rappel des lettres dissimilaires par rapport aux lettres similaires. Ce rappel plus élevé des lettres dissimilaires s'est également accompagné d'une autorépétition mentale plus importante que celle observée pour les lettres similaires. Pour ces dernières, les participants ont recouru de façon plus modérée au langage. Ces observations semblent indiquer qu'une autorépétition plus importante des lettres améliore le rappel mais un autre résultat vient cependant contredire cette conclusion hâtive. En effet, les résultats ont montré que les participants sollicitant plus modérément le langage intérieur obtiennent de meilleurs scores de rappel que ceux sollicitant le langage de façon plus importante. L'utilisation du langage intérieur semble ainsi être un frein à l'encodage en mémoire et au rappel des lettres. Nous savons que plus la similarité entre les représentations phonologiques est élevée, plus il est difficile de pouvoir les différencier et les restituer. Utiliser le langage de façon plus tempérée semble ainsi être une meilleure stratégie pour éviter toute confusion entre les lettres dans la boucle de récapitulation articulaire. Cependant, ce résultat ne confirme pas les études utilisant la suppression articulaire qui ont montré que l'effet de similarité phonologique est réduit, voire supprimé, lorsque les informations à mémoriser sont présentées de façon visuelle (Baddeley & Larsen, 2007 ; Coltheart, 1993 ; Murray, 1968). Effectivement, en obligeant les participants à répéter une série de lettres ou de mots pendant la tâche, la suppression articulaire empêche le recodage phonologique des stimuli présentés visuellement qui accèdent ainsi directement au stock phonologique. Dans notre étude, malgré de meilleures performances chez les participants sollicitant plus faiblement le langage, l'effet de similarité phonologique était toujours présent puisque le rappel des lettres similaires a été plus faible que celui des lettres

dissimilaires. Notons cependant que le rappel des lettres similaires des participants ayant peu verbalisé était supérieur au rappel des lettres dissimilaires des participants ayant sollicité le langage de façon plus importante. Au vu de la littérature, nous pouvions nous attendre à observer une absence de différence de rappel entre les lettres similaires et dissimilaires lorsque la verbalisation était faible, ce qui ne fut pas le cas. Rappelons que, dans notre étude, les participants étaient libres de verbaliser leur raisonnement contrairement aux études utilisant la suppression articulaire. Nous pouvons alors supposer que ceux-ci ont donc naturellement recouru au langage pour mémoriser les lettres, pouvant ainsi expliquer la présence de l'effet de similarité phonologique dans nos résultats. Ces différentes observations seraient en accord avec l'idée que l'effet de similarité phonologique trouverait son origine à un niveau plus central et s'expliquerait par une interférence au niveau de la programmation de la parole (Baddeley, 1990). L'effet de similarité ne dépendrait donc pas des muscles du langage entrant en action avec la boucle de récapitulation. Nos résultats ont en effet montré un effet de similarité identique chez les participants sollicitant faiblement ou de façon plus importante le langage, et donc les muscles du langage. Cela rejoindrait les observations mises en évidence à l'aide d'études réalisées chez des patients dysarthriques, c'est-à-dire chez des personnes ayant des troubles de la production de la parole (troubles du système nerveux central). Lors de tâches classiques d'empan mnésique, un effet de similarité phonologique a été observé chez ces patients, ce qui montre bien que l'effet ne dépend pas de la boucle de récapitulation (Baddeley & Wilson, 1985). De plus, Saito a montré que la perturbation des programmes moteurs à l'aide d'une tâche de tapping (taper un rythme particulier avec le doigt pendant une tâche) entraînait la disparition de l'effet de similarité (Saito, 1994). Pour entrer dans le stock phonologique (dont dépend l'effet de similarité phonologique), une information visuelle doit tout d'abord transiter par la boucle de récapitulation articulaire, impliquant ainsi le fonctionnement des programmes moteurs de la parole. Taper un rythme particulier avec les doigts perturbe ces programmes moteurs et empêche ainsi l'assimilation des stimuli visuels dans le stock phonologique, expliquant ainsi la disparition de l'effet de similarité phonologique.

3.3. Conclusion

Les résultats de cette étude préliminaire montrent que l'utilisation du langage intérieur a un effet délétère sur les performances de rappel, et ce d'autant plus que le matériel à mémoriser présente des similarités phonologiques. L'utilisation du langage étant possible

dans nos tâches, nous n'avons pas observé de diminution de l'effet de similarité phonologique. En effet, lorsque la présentation des stimuli est visuelle, l'information doit d'abord passer par la boucle de récapitulation articulatoire afin d'être codée phonologiquement avant d'avoir accès au stock phonologique, ce qui n'est pas le cas avec des stimuli auditifs (Saito, 1997). De ce fait, même avec une sollicitation plus faible du langage, une confusion se produit entre les lettres phonologiquement similaires stockées dans la boucle phonologique lors du rappel. Ce résultat est en accord avec l'idée d'une interférence motrice et l'implication de programmes moteurs centraux dans l'effet de similarité phonologique (Baddeley, 1990, Saito, 1994).

CHAPITRE 4 : CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif premier de ce travail était de mettre au point une méthode efficace pour étudier l'implication du langage intérieur dans différentes fonctions cérébrales et plus précisément dans la flexibilité mentale et la mémoire. Actuellement, la méthode la plus utilisée pour étudier le langage intérieur est la suppression articulatoire (Baddeley, Chincotta, & Adlam, 2001 ; Baddeley & Larsen, 2007 ; Coltheart, 1993 ; Emerson & Miyake, 2003 ; Saeki, Saito, & Kawaguchi, 2006) dont l'objectif est d'empêcher la verbalisation des participants en leur faisant répéter tout au long de l'expérience une même syllabe ou un même mot. Dans le but d'avoir une mesure précise et plus naturelle, nous avons choisi d'utiliser l'électromyographie de surface, méthode qui était déjà utilisée dans les années 70, notamment pour étudier la mémoire à court terme notamment (Garrity 1975 ; Garrity & Donoghue, 1977 ; Sokolov, 1972), mais qui a été délaissée ces dernières années. L'électromyographie présente l'avantage de pouvoir étudier le langage naturellement, c'est-à-dire sans interférer avec les tâches, mais également d'offrir une mesure précise et fine du langage. Les différentes expérimentations effectuées dans le cadre de cette thèse ont permis de montrer l'efficacité de cette méthode pour détecter le langage intérieur mais également d'obtenir de nouvelles informations qu'il n'était pas possible de recueillir avec la technique de suppression articulatoire.

1. Électromyographie de surface

Malgré les résultats encourageants montrant qu'il est possible de détecter le langage même quand celui-ci est intériorisé, plusieurs difficultés méthodologiques ont été rencontrées avec la technique de l'électromyographie de surface. Les principales difficultés ont concerné le traitement du signal mais également le placement des électrodes au niveau des muscles laryngés.

1.1. Traitement du signal électromyographique

La première difficulté fut principalement liée au traitement du signal qui pouvait s'effectuer de multiples façons. Il était important de traiter le signal le plus finement possible afin de supprimer les bruits parasites mais sans modifier les données réelles du langage. Il était également nécessaire de savoir quelle mesure nous voulions obtenir et étudier. Ayant

observé des patterns souvent similaires entre les temps de réponses et la quantité de langage dans nos tâches de flexibilité, la question était de s'assurer que le signal obtenu n'était pas qu'une forme de bruit de fond de l'enregistrement bioélectrique. Différentes mesures ont permis de répondre à cette interrogation puisque nous avons obtenu des quantités de langage différentes sur des périodes de temps égales dans plusieurs de nos expériences mais également lorsque nous divisons les quantités de langage par les temps de réponses. Le choix de prendre en compte la quantité de langage en fonction du temps semble être pertinent même si cette méthode pose une difficulté lorsque les temps de réponses ou d'encodages des règles varient d'un participant à un autre. Il est en effet possible d'obtenir des quantités de langage similaires pour deux participants dont l'un aurait sollicité le langage pendant un temps bref mais à forte amplitude (à la limite du murmure) et dont l'autre aurait parlé de façon plus intériorisée (amplitude plus faible) mais pendant un laps de temps plus long. Autre exemple, si un participant prononce deux mots au cours de deux secondes, la quantité de langage sera quatre fois plus élevée que pour celle obtenue pour la prononciation d'un mot en une seconde si l'intensité du langage est la même. Pour cette raison, nous avons également fait le choix de diviser la quantité de langage par le temps de réponse dans le but de connaître l'amplitude moyenne du langage. Pour l'exemple considéré, cette quantité moyenne est équivalente, ce qui permet de connaître la sollicitation moyenne du langage intérieur par les participants. Les différentes analyses ont permis de montrer des résultats similaires pour les deux méthodes.

1.2. Positionnement des électrodes au niveau laryngé

La seconde difficulté méthodologique de ces travaux fut liée au placement des électrodes, notamment concernant celui de la seconde paire qui était proche de l'artère carotide. Plusieurs enregistrements ont de ce fait présenté des artefacts liés au rythme cardiaque que nous avons dû supprimer à l'aide d'un filtre high pass (Willigenburg, Daffertshofer, Kingma, & van Dieën, 2012). Nous aurions pu faire le choix de placer les électrodes au niveau du menton ou de la bouche comme cela a déjà été fait auparavant dans différentes études (Cole & Young, 1975 ; Garrity, 1975a, 1975b ; Garrity & Donoghue, 1977 ; Hardyck & Petrinovich, 1970) mais d'autres problèmes plus importants auraient été rencontrés, avec par exemple des mouvements buccaux indépendants du langage. Il est en effet difficile de rester plus de quelques minutes sans bouger ses lèvres, sans les humidifier ou les pincer, et ce d'autant plus lorsque l'on n'y prête pas attention. Avec un tel placement, les

artefacts observés auraient été beaucoup plus nombreux, rendant ainsi le traitement du signal plus complexe.

2. Langage intérieur et flexibilité mentale

2.1. Enregistrement électromyographique

Malgré les difficultés évoquées dans le paragraphe précédent, l'électromyographie de surface s'est révélée être une technique adéquate pour étudier le langage intérieur. Les précédentes recherches utilisant la suppression articuloire pour étudier la flexibilité mentale avaient montré l'importance du langage intérieur dans les tâches d'alternance suite à une augmentation du coût d'alternance lorsque les participants ne pouvaient pas verbaliser leur raisonnement. En employant l'électromyographie de surface dans les expériences 3 à 6, nous avons observé que le langage intérieur était d'autant plus nécessaire que la tâche était complexe. En effet, la quantité de langage sollicitée par les participants ainsi que le temps de réponse ont augmenté avec la complexité des tâches par un besoin d'autorépétition plus élevé des règles. Plus intéressant encore, la méthode électromyographique a permis de montrer dans les tâches d'alternance catégorielle des différences de quantité de langage selon la complexité de la tâche pendant l'intervalle réponse-stimulus, résultat qui n'aurait pu être observé avec une autre technique. Cet intervalle se révèle fondamental dans les tâches de flexibilité puisqu'il permet aux participants de se répéter les règles avant d'effectuer le tri suivant. Le langage intérieur joue ainsi un rôle important dans la flexibilité, et ce dès l'encodage en mémoire des règles puisque nous avons observé que plus une tâche était complexe, plus les participants avaient besoin de s'auto-répéter les règles pour les apprendre.

2.2. Tâches d'alternance catégorielle

L'utilisation de l'électromyographie pour étudier la flexibilité mentale a également été l'occasion de développer de nouvelles tâches d'alternance. Nous voulions en effet mettre au point des tâches permettant de mieux discriminer le développement de la flexibilité à l'aide de structures de décisions plus variées. Actuellement, le DCCS est la tâche la plus employée chez les enfants préscolaires mais ce test permet uniquement de montrer si la flexibilité mentale est acquise ou non. Les tâches d'alternance catégorielle permettent non seulement d'observer une acquisition continue de la flexibilité mais elles offrent l'avantage de ne présenter aucun clash visuel entre les cartes cibles et les cartes tests (Perner & Lang, 2002). Malgré l'utilisation de stimuli univalents, notre tâche complexe se révèle être de difficulté

similaire au DCCS sans les inconvénients que cette dernière tâche présente. La sixième étude de cette thèse avait pour objectif de confirmer les résultats obtenus avec la tâche d'alternance catégorielle en utilisant une autre tâche plus classique de flexibilité. Nous avons pour cela fait le choix de reproduire une expérience de Rubinstein, Meyer et Evans (2001) utilisant une adaptation du test de classement des cartes du Wisconsin. Les résultats ont montré des conclusions similaires à celles que nous avons déjà observées et mettent une nouvelle fois en avant un coût d'alternance plus élevé ainsi qu'une quantité de langage plus importante pour la tâche la plus complexe.

2.3. Flexibilité mentale et développement

Nous avons souhaité introduire dans les expériences 4 à 6 un aspect développemental en étudiant le rôle du langage intérieur dans la flexibilité mentale selon l'âge des participants. Plusieurs études ont montré un coût d'alternance plus important chez les enfants et chez les personnes âgées (Cepeda, Kramer, & Gonzalez de Sather, 2001 ; Kray & Lindenberger, 2000 ; Kray, Eber, & Lindenberger, 2004 ; Salthouse, 1998 ; Salthouse, Fristoe, McGuthry, & Hambrick, 1998 ; Zelazo, Craik, & Booth, 2004). Chez les personnes âgées, cette baisse de performance s'explique principalement par un déclin des fonctions exécutives. Malgré une proportion d'erreurs plus importante chez les âgés, nous n'avons pas pu mettre en avant un coût d'alternance plus élevé dans cette catégorie d'âge. Ce résultat semble plus révélateur d'un ralentissement moteur que d'un réel déclin des capacités de flexibilité. Cependant, même si le ralentissement moteur observé chez les plus âgés peut être à l'origine des temps de réponses plus élevés, il ne permet pas d'expliquer complètement la quantité de langage plus importante observée chez ces derniers. En effet, nous avons observé une sollicitation plus élevée du langage pour les plus âgés pendant les phases d'encodage et les phases de classement et ce, même lorsque nous avons divisé la quantité de langage par les temps de réponses. Le langage semble ainsi jouer un rôle essentiel chez les plus âgés pour encoder et mettre à jour en mémoire les règles à appliquer. Afin d'explorer de façon plus précise l'implication du langage chez les personnes âgées dans la flexibilité mentale, il serait intéressant de reproduire une étude pour laquelle des différences de coûts d'alternance ont été observées entre les groupes d'âges (Cepeda, Kramer, & Gonzalez de Sather, 2001 ; Salthouse, Fristoe, McGuthry, & Hambrick, 1998).

3. Langage intérieur et effet de similarité phonologique

L'ensemble des résultats observés lors de nos différentes études sur la flexibilité mentale nous a encouragés à développer l'électromyographie de surface à d'autres fonctions cérébrales. Notre choix s'est orienté vers la mémoire à court terme puisque nous avons eu l'opportunité de collaborer avec deux chercheurs spécialisés dans ce domaine, John Marsh et Rob Hugues. L'étude préliminaire réalisée s'est principalement intéressée à l'implication du langage dans l'effet de similarité phonologique, effet entraînant un meilleur rappel des lettres dissimilaires par rapport aux lettres similaires. L'électromyographie de surface a permis de mettre en évidence 1) un meilleur rappel des lettres similaires et dissimilaires pour les participants utilisant de façon plus modérée le langage, 2) un effet de similarité phonologique pour l'ensemble des participants, quelle que soit la quantité de langage intérieur sollicité. Ces résultats renforcent l'idée d'une interférence motrice à l'origine de l'effet de similarité et non une origine liée à la boucle de récapitulation articulatoire (Baddeley & Wilson, 1985 ; Saito, 1994). Cette première étude offre des perspectives d'études futures. Il serait effectivement intéressant de reconduire cette expérimentation en utilisant une présentation auditive des stimuli afin de limiter la phase d'encodage verbale et estimer plus purement l'autorépétition. Une hypothèse centrale du modèle de la boucle phonologique est que les informations auditives accèdent directement au stockage phonologique tandis que les items visuels accèdent au stockage via la boucle d'autorépétition articulatoire. La répétition mentale des stimuli auditifs n'est donc pas nécessaire, tout au moins pour ce qui transite en mémoire de travail dans une fenêtre temporelle de deux secondes environ. Ceci signifie que le modèle de la boucle phonologique, avec une présentation en modalité auditive, ne prédirait aucune relation entre la quantité de répétition et l'ampleur de l'effet de similarité pour les premiers items, ce qui tendrait à confirmer l'hypothèse qu'une interférence auditive opère en dehors des aspects articulatoires. En revanche, le point de vue que l'effet de similarité phonologique est provoqué par des erreurs de perception de la parole serait prédictif d'une relation entre l'activité de répétition articulatoire et l'ampleur de l'effet. L'électromyographie de surface apporterait ici une véritable réponse à ces hypothèses. La liste des lettres interférentes en français étant limitée, des trigrammes de lettres (mic, tij, etc.) pourraient être utilisés afin de varier avec plus de liberté la longueur des listes d'items. Le fait que nous ayons utilisé constamment des séries de sept lettres tend à induire des stratégies de mémorisation spécifiques qui limitent la portée des résultats. L'utilisation de sons interférents à l'origine d'un autre effet notoire (*irrelevant-speech effect*) pourrait mieux délimiter le rôle de la boucle phonologique dans la résistance à l'interférence auditive. Un autre terrain d'expérimentation

concerne l'hypothèse que l'articulation facilitée par la fréquence des mots explique la plus grande facilité à mémoriser des mots fréquents (*frequency effect*), qui s'oppose à une seconde hypothèse que seule la récupération facilitée en mémoire à long terme des mots fréquents soit à l'origine de cet effet. Si nos mesures par l'électromyographie montrent une corrélation inverse entre quantité de langage produite et fréquence des mots, l'hypothèse d'une facilitation articulatoire pourrait être démontrée et cela confirmerait le rôle prépondérant des mécanismes articulatoires dans les capacités de rétention de matériel verbal fréquent.

4. Conclusion

En conclusion, ce travail de doctorat a permis de montrer que l'électromyographie de surface se révèle être une méthode efficace pour étudier le langage intérieur en apportant des informations complémentaires à celles obtenues à l'aide de la suppression articulatoire. Cette méthode offre la possibilité d'étudier le langage intérieur sans créer d'interférence avec les tâches demandées. En donnant la possibilité d'obtenir une mesure précise de l'activité électrique des muscles laryngés, cette méthode propose ainsi des perspectives nouvelles dans l'étude du langage intérieur, que ce soit pour la flexibilité mentale ou la mémoire à court terme, mais aussi pour d'autres fonctions cérébrales.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aboitiz F., & Garcia R. V. (1997). The evolutionary origin of the language areas in the human brain. A neuroanatomical perspective. *Brain Research Reviews*, 25(3), 381-396.
- Ader, J. L., & Carré, F. (2006). *Physiologie générale*. Paris : Elsevier Masson.
- Allport, D. A., Styles, E. A., & Hsieh, S. (1994). Shifting intentional set: Exploring the dynamic control of tasks. In *Attention and performance 15: Conscious and nonconscious information processing*. (pp. 421-452). Cambridge, MA US: The MIT Press.
- Allport, A., & Wylie, G. (2000). Task-switching: Stimulus-Response Bindings, and Negative Priming. In S. Monsell & J. Driver (Eds.), *Attention and performance XVIII: Control of Cognitive Processes* (pp. 35-70). Cambridge, MA: MIT Press.
- Altmann, E. M., & Gray, W. D. (2008). An integrated model of cognitive control in task switching. *Psychological Review*, 115(3), 602-639.
- Arbuthnott, K., & Frank, J. (2000). Executive control in set switching: Residual switch cost and task-set inhibition. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 54(1), 33-41.
- Arrington, C. M., & Logan, G. D. (2004). The cost of a voluntary task switch. *Psychological Science*, 15(9), 610-615.
- Ashby, F., & Ell, S. W. (2001). The neurobiology of human category learning. *Trends In Cognitive Sciences*, 5(5), 204-210.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In , *The psychology of learning and motivation: II* Oxford England: Academic Press.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1971). The control of short-term memory. *Scientific American*, 225(2), 82-90.
- Baddeley, A. D. (1966). Short-term memory for word sequences as a function of acoustic, semantic, and formal similarity. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 18(4), 362-365.
- Baddeley, A. D. (1968). How does acoustic similarity influence short term memory? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 20, 249-264.
- Baddeley, A. D. (1990). *Human memory: Theory and practice*. Needham Heights, MA US: Allyn & Bacon.

- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417-423.
- Baddeley, A. D. (2003). Working memory and language: An overview. *Journal of Communication Disorders*, 36(3), 189-208.
- Baddeley, A. D., Chincotta, D., & Adlam, A. (2001). Working memory and the control of action: Evidence from task switching. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(4), 641-657.
- Baddeley, A. D., & Ecob, J. R. (1970). Simultaneous acoustic and semantic coding in short-term memory. *Nature*, 227, 288-289.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working Memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 8). London: Academic Press.
- Baddeley, A. D., & Larsen, J. D. (2007). The phonological loop unmasked? A comment on the evidence for a 'perceptual-gestural' alternative. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60(4), 497-504.
- Baddeley, A., & Wilson, B. (1985). Phonological coding and short-term memory in patients without speech. *Journal of Memory and Language*, 24(4), 490-502.
- Baker, S. T., Friedman, O., & Leslie, A. M. (2010). The opposites task: Using general rules to test cognitive flexibility in preschoolers. *Journal of Cognition and Development*, 11(2), 240-254.
- Barlow, M. C. (1928). The role of articulation in memorizing. *Journal of Experimental Psychology*, 11(4), 306-312.
- Betts, B. J., Binsted, K., & Jorgensen, C. (2006). Small-vocabulary speech recognition using surface electromyography. *Interacting with Computers*, 18(6), 1242-1259.
- Bialystok, E., & Martin, M. M. (2004). Attention and inhibition in bilingual children: Evidence from the Dimensional Change Card Sort task. *Developmental Science*, 7, 325-339.
- Binsted, K., & Jorgensen C., (2006). Sub-auditory speech recognition. The Skilled Human-Intelligent Agent Performance: Measurement, Application, and Symbiosis Symposium at the Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Kauai, Hawaii.
- Blaye, A., & Chevalier, N. (2011). The role of goal representation in preschoolers' flexibility and inhibition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 469-483.
- Bradmetz, J. L., & Mathy, F. (2008). Response times seen as decompression times in Boolean concept use. *Psychological Research/Psychologische Forschung*, 72(2), 211-234.

- Brojde, C. L., Porter, C., & Colunga, E. (2011). Words can slow down category learning. *Psychonomic Bulletin & Review, 18*(4), 798-804.
- Brown, G. A., Neath, I., & Chater, N. (2007). A temporal ratio model of memory. *Psychological Review, 114*(3), 539-576.
- Bryck, R. L., & Mayr, U. (2005). On the role of verbalization during task set selection: Switching or serial order control? *Memory & Cognition, 33*, 611-623.
- Carlson, S. M. (2005). Developmentally Sensitive Measures of Executive Function in Preschool Children. *Developmental Neuropsychology, 28*(2), 595-616.
- Case, R. (1992). The role of the frontal lobes in the regulation of cognitive development. *Brain and Cognition, 20*(1), 51-73.
- Cepeda, N. J., Kramer, A. F., & Gonzalez de Sather, J. C. M. (2001). Changes in executive control across the life span: Examination of task-switching performance. *Developmental Psychology, 37*(5), 715-730.
- Cepeda, N. J., & Munakata, Y. (2007). Why do children perseverate when they seem to know better: Graded working memory, or directed inhibition? *Psychonomic Bulletin and Review, 14*, 1058-1065.
- Chevalier, N. (2010). Les fonctions exécutives chez l'enfant: Concepts et développement. *Canadian Psychology/Psychologie canadienne, 51*(3), 149-163.
- Chevalier, N., & Blaye, A. (2006). Le développement de la flexibilité cognitive chez l'enfant préscolaire: Enjeux théoriques. *L'Année Psychologique, 106*(4), 569-608.
- Chevalier, N., & Blaye, A. (2008). Cognitive flexibility in preschoolers: The role of representation activation and maintenance. *Developmental Science, 11*. 339-353.
- Chevalier, N., & Blaye, A. (2009). Setting goals to switch between tasks: Effect of cue transparency on children's cognitive flexibility. *Developmental Psychology, 45*(3), 782-797.
- Cinan, S., & Tanor, O. O. (2002). An attempt to discriminate different types of executive functions in the Wisconsin Card Sorting Test. *Memory, 10*(4), 277-289.
- Cole, R. A., & Young, M. (1975). Effect of subvocalization on memory for speech sounds. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory, 1*(6), 772-779.
- Coltheart, V. (1993). Effects of phonological similarity and concurrent irrelevant articulation on short-term-memory recall of repeated and novel word lists. *Memory & Cognition, 21*(4), 539-545.
- Colvin, S. S., & Myers, E. J. (1909). The development of imagination in school children and the relation between ideational types and the retentivity of material appealing to

- various sense departments. *The Psychological Review: Monograph Supplements*, *11*(1), 85-126.
- Conrad, R. R. (1964). Acoustic confusion in immediate memory. *British Journal of Psychology*, *55*, 75–84.
- Conrad, R. R., & Hull, A. J. (1964). Information, acoustic confusion and memory span. *British Journal of Psychology*, *55*(4), 429-432.
- Costa, R. E. & Friedrich, F. J. (2012). Inhibition, interference, and conflict in task switching. *Psychonomic Bulletin & Review* *19*, 1193-201.
- Crone, E. A., Bunge, S. A., van der Molen, M. W., Ridderinkhof, K. R. (2006). Switching between tasks and responses: a developmental study. *Developmental Science*, *9*, 278-287.
- Crone, E. A., & Van Der Molen, M. W. (2008). Neurocognitive development of performance monitoring and decision making. In C. A. Nelson & M. Luciana (Eds.), *Handbook of Developmental Cognitive Neuroscience (2nd ed.)*. (pp. 883-895). Cambridge, MA US: MIT Press.
- Deák, G. O. (2003). The Development of Cognitive Flexibility and Language Abilities. In R. V. Kail (Ed.), *Advances in child development and behavior*, *Vol. 31* (pp. 271-327). San Diego, CA US: Academic Press.
- Deák, G. O., Ray, S. D., & Pick, A. D. (2004). Effects of age, reminders, and task difficulty on young children's rule-switching flexibility. *Cognitive Development*, *19*(3), 385-400.
- Diamond, A. (2006). The Early Development of Executive Functions. In E. Bialystok & F. Craik (Eds.), *Lifespan cognition: Mechanisms of change*. (pp. 70-95). NY: Oxford University Press.
- Diamond, A., & Kirkham, N. (2005). Not Quite as Grown-Up as We Like to Think: Parallels Between Cognition in Childhood and Adulthood. *Psychological Science*, *16*(4), 291-297.
- Dias, R., Robbins, T. W., & Roberts, A. C. (1996). Primate analogue of the Wisconsin Card Sorting Test: Effects of excitotoxic lesions of the prefrontal cortex in the marmoset. *Behavioral Neuroscience*, *110*(5), 872-886.
- Dreisbach, G. (2012). Mechanisms of Cognitive Control: The Functional Role of Task Rules. *Current Directions in Psychological Science*, *21*(4), 227-231.
- Dunbar, K., & Sussman, D. (1995). Toward a cognitive account of frontal lobe function: Simulating frontal lobe deficits in normal subjects. In J. Grafman, K. J. Holyoak & F.

- Boller (Eds.), *Structure and functions of the human prefrontal cortex*. (pp. 289-304). New York, NY US.
- Edfeldt, A. W. (1960). Silent Speech and Silent Reading. In (pp. 163). Chicago: University of Chicago Press.
- Egger, V. (1881). *La parole intérieure : essai de psychologie descriptive*. Thèse de Doctorat, Faculté des lettres de Paris.
- Emerson, M. J., & Miyake, A. (2003). The role of inner speech in task switching: A dual-task investigation. *Journal of Memory and Language*, 48(1), 148-168.
- Engle, R. W. (2002). Working memory capacity as executive attention. *Current Directions in Psychological Science*, 11(1), 19-23.
- Erickson, M. A. (2008). Executive attention and task switching in category learning: Evidence for stimulus-dependent representation. *Memory & Cognition*, 36(4), 749-761.
- Espy, K. A., & Cwik, M. (2004). The Development of a Trial Making Test in Young Children: The TRAILS-P. *Clinical Neuropsychologist*, 18(3), 411-422.
- Espy, K. A., Kaufmann, P. M., Glisky, M. L., & McDiarmid, M. (2001). New procedures to assess executive functions in preschool children. *The Clinical Neuropsychologist*, 15(1), 46-58.
- Faaborg-Andersen, K., & Edfeldt, A. W. (1958). Electromyography of intrinsic and extrinsic laryngeal muscles during silent speech: correlation with reading activity. *Acta Otolaryngol*, 49(6), 478-482.
- Fagot, C. (1994). *Chronometric investigations of task switching*. Ph.D. thesis, University of California, San-Diego.
- Farrell, S., & Lewandowsky, S. (2003). Dissimilar items benefit from phonological similarity in serial recall. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 29(5), 838-849.
- Feldman, J. (2000). Minimization of Boolean complexity in human concept learning. *Nature*, 407(6804), 630-632.
- Feldman, J. (2003a). The Simplicity Principle in Human Concept Learning. *Current Directions in Psychological Science*, 12, 227-232.
- Feldman, J. (2003b). A catalog of Boolean concepts. *Journal of Mathematical Psychology*, 47, 75-89.
- Fific, M., Little, D. R., & Nosofsky, R. M. (2010). Logical-rule models of classification response times: a synthesis of mental-architecture, random-walk, and decision-bound approaches. *Psychological Review*, 117, 309-348.

- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The Relations Among Inhibition and Interference Control Functions: A Latent-Variable Analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(1), 101-135.
- Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., DeFries, J. C., Corley, R. P., & Hewitt, J. K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(2), 201-225.
- Friedrich, F. J., Nelson, J. N., & Costa, R. E. (2012). Exploring task differences in backward inhibition. *Proceedings of the 53rd Annual meeting of the Psychonomic Society*, Nov 15-18, Minneapolis, MN, p. 206.
- Frye, D., Zelazo, P. D., & Palfai, T. (1995). Theory of mind and rule-based reasoning. *Cognitive Development*, 10(4), 483-527.
- Garrity, L. I. (1975a). An electromyographical study of subvocal speech and recall in preschool children. *Developmental Psychology*, 11(3), 274-281.
- Garrity, L. I. (1975b). Measurement of subvocal speech: Correlations between two muscle leads and between two recording methods. *Perceptual and Motor Skills*, 40(1), 327-330.
- Garrity, L. I. (1977). A review of short-term memory studies of covert speech in young children. *Journal of Psychology: Interdisciplinary and Applied*, 95(2), 249-261.
- Garrity, L. I., & Donoghue, J. T. (1977). A follow-up electromyographical study of subvocal speech and recall in preschool children. *Journal of Psychology: Interdisciplinary and Applied*, 95(2), 275-283.
- Gilbert, S. J., & Shallice, T. (2002). Task switching: A PDP model. *Cognitive Psychology*, 44(3), 297-337.
- Goodwin, G. P. & Johson-Laird, P. N. (2013). The acquisition of Boolean concepts. *Trends in Cognitive Science*, 17, 1-6.
- Gopher, D., Armony, L., & Greenshpan, Y. (2000). Switching tasks and attention policies. *Journal of Experimental Psychology: General*, 129(3), 308-339.
- Goschke, T. (2000). Intentional reconfiguration and involuntary persistence in task set switching. In S. Monsell & J. Driver (Eds.), *Control of cognitive processes: Attention and performance*. (Vol. XVIII, pp. 331-355). Cambridge, MA: MIT Press.
- Grant, D. A., & Berg, E. (1948). A behavioral analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card-sorting problem. *Journal of Experimental Psychology*, 38(4), 404-411.

- Gumenik, W. E. (1969). Effects of articulatory activity and auditory, visual, and semantic similarity on the short-term memory of visually presented paired associates. *Journal of Experimental Psychology*, 82(1, Pt.1), 70-74.
- Halford, G. S., Baker, R., McCredde, J. E., & Bain, J. D. (2005). How Many Variables Can Humans Process? *Psychological Science*, 16, 70-76.
- Halford, G. S., Wilson, W. H., & Phillips, S. (1998). Processing capacity defined by relational complexity: implications for comparative, developmental, and cognitive psychology. *Behavioral and Brain Sciences*, 21, 803-864.
- Hanania, R. (2010). Two types of perseveration in the Dimension Change Card Sort task. *Journal of Experimental Child Psychology*, 107, 325-336.
- Hardyck, C. D., & Petrinovich, L. F. (1970). Subvocal speech and comprehension level as a function of the difficulty level of reading material. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, 9(6), 647-652.
- Heaton, R., Chelune, G., Talley, J., Kay, G., & Curtiss, G. (1993). Wisconsin card sorting test manual : Revised and expanded. Odessa, FL: Psychological Assessment Resources.
- Hughes, R. W., Hurlstone, M. J., Marsh, J. E., Vachon, F., & Jones, D. M. (2013). Cognitive control of auditory distraction: Impact of task difficulty, foreknowledge, and working memory capacity supports duplex-mechanism account. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39(2), 539-553.
- Hughes, R. W., Marsh, J. E., & Jones, D. M. (2011). Role of serial order in the impact of talker variability on short-term memory: Testing a perceptual organization-based account. *Memory & Cognition*, 39(8), 1435-1447.
- Huttenlocher, P. R., & Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *The Journal of Comparative Neurology*, 387(2), 167-178.
- Ilkowska, M., & Engle, R. W. (2010). Trait and state differences in working memory capacity. In A. Gruszka, G. Matthews & B. Szymura (Eds.), *Handbook of individual differences in cognition: Attention, memory, and executive control*. (pp. 295-320). New York: Springer Science + Business Media.
- Jacobson, E. (1932). Electrophysiology of mental activities. *The American Journal of Psychology*, 44, 677-694.
- Jersild, A. T. (1927). Mental set and shift. *Archives of Psychology*, 89.
- Jorgensen, C., Lee, D. D., & Agabon, S. (2003). Sub auditory speech recognition based on EMG signals. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, IEEE, Portland, Oregon, 3128-3133.

- Jou, S.-C., Schultz, T., Walliczek, M., Kraft, F., & Waibel, A. (2006). Towards Continuous Speech Recognition using Surface Electromyography. *Interspeech*, 573-576.
- Kane, M. J., Hambrick, D. Z., Tuholski, S. W., Wilhelm, O., Payne, T. W., & Engle, R. W. (2004). The Generality of Working Memory Capacity: A Latent-Variable Approach to Verbal and Visuospatial Memory Span and Reasoning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(2), 189-217.
- Keller S. S., Crow T., Foundas A., Amunts K., & Roberts N. (2009). Broca's area: Nomenclature, anatomy, typology and asymmetry. *Brain and Language*, 109(1), 29-48.
- Kemp, C. (2012). Exploring the conceptual universe. *Psychological Review*, 119, 685-722.
- Kimberg, D. Y., Aguirre, G. K., & D'Esposito, M. (2000). Modulation of task-related neural activity in task-switching: an fMRI study. *Cognitive Brain Research*, 10(1-2), 189-196.
- Kirkham, N. Z., Cruess, L., & Diamond, A. (2003). Helping children apply their knowledge to their behavior on a dimension-switching task. *Developmental Science*, 6(5), 449-476.
- Kloo, D., & Perner, J. (2003). Training transfer between card sorting and false belief understanding: Helping children apply conflicting descriptions. *Child Development*, 74, 1823-1839.
- Kloo, D., & Perner, J. (2005). Disentangling dimensions in the dimensional change card-sorting task. *Developmental Science*, 8, 44-56.
- Kloo, D., Perner, J., Aichhorn, M., & Schmidhuber, N. (2010). Perspective taking and cognitive flexibility in the Dimensional Change Card Sorting (DCCS) task. *Cognitive Development*, 25, 208-217.
- Kohlberg, L., Yaeger, J., & Hjertholm, E. (1968). Private speech: Four studies and a review of theories. *Child Development*, 39(3), 691-736.
- Kray, J. (2006). Task-set switching under cue-based versus memory-based switching conditions in younger and older adults. *Brain Research*, 1105(1), 83-92.
- Kray, J., Eber, J., & Lindenberger, U. (2004). Age differences in executive functioning across the lifespan: The role of verbalization in task preparation. *Acta Psychologica*, 115(2-3), 143-165.
- Kray, J., & Lindenberger, U. (2000). Adult age differences in task switching. *Psychology and Aging*, 15(1), 126-147.

- Laurent, L., Millot, J.-L., Andrieu, P., Camos, V., Floccia, C., & Mathy, F. Inner speech and Task Switching in Adults. *Soumis*.
- Lewandowsky, S. (2011). Working memory capacity and categorization: Individual differences and modeling. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *37*, 720-738.
- Lidstone, J. S. M., Meins, E., & Fernyhough, C. (2010). The roles of private speech and inner speech in planning during middle childhood: Evidence from a dual task paradigm. *Journal of Experimental Child Psychology*, *107*(4), 438-451.
- Lidstone, J. S. M., Meins, E., & Fernyhough, C. (2011). Individual differences in children's private speech: Consistency across tasks, timepoints, and contexts. *Cognitive Development*, *26*(3), 203-213.
- Liefoghe, B., Vandierendonck, A., Muylaert, I., Verbruggen, F., & Vanneste, W. (2005). The phonological loop in task alternation and task repetition. *Memory*, *13*(5), 550-560.
- Lien, M. C., Ruthruff, E., & Kuhns, D. (2008). Age-related differences in switching between cognitive tasks: Does internal control ability decline with age? *Psychology and Aging*, *23*, 330-341.
- Little, D. R., Nosofsky, R. M., & Denton, S. E. (2011). Response-time tests of logical-rule models of categorization. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *37*, 1-27.
- Locke, J.-L. (1970). Subvocal speech and speech. *ASHA*, *12*, 7-14.
- Logan, G. D. (2004). Working memory, task switching, and executive control in the task span procedure. *Journal of Experimental Psychology: General*, *133*, 218–236.
- Lupyan, G. (2009). Extracommunicative functions of language: Verbal interference causes selective categorization impairments. *Psychonomic Bulletin & Review*, *16*(4), 711-718.
- Luria, A. R. (1966). *Higher cortical functions in man*. Oxford England: Basic Books.
- Luria, A. R. (1973). The frontal lobes and the regulation of behavior. In *Psychophysiology of the frontal lobes*. Oxford England: Academic Press.
- Maquestiaux, F., & Didierjean, A. (2011). Peut-on penser à deux choses à la fois ? *Cerveau & Psycho*, *45*, 46-50.
- Marsh, J. E., Hughes, R. W., & Jones, D. M. (2008). Auditory distraction in semantic memory: A process-based approach. *Journal of Memory and Language*, *58*(3), 682-700.

- Marsh, J. E., Hughes, R. W., & Jones, D. M. (2009). Interference by process, not content, determines semantic auditory distraction. *Cognition, 110*(1), 23-38.
- Mathy, F. (2012). La compression de l'information dans l'apprentissage de catégories artificielles. *L'Année Psychologique, 112*, 593-629.
- Mathy, F., & Bradmetz, J. L. (2004). A theory of the graceful complexification of concepts and their learnability. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition, 22*(1), 41-82.
- Mathy, F., Courenq, B., Laurent, L., & Millot, J.-L. Just as Grown-Up as We Like to Think: Categorical Switching Tasks in Preschool Children. *Soumis*.
- Mayr, U., & Kliegl, R. (2000). Task-set switching and long-term memory retrieval. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 26*(5), 1124-1140.
- McGuigan, F. J. (1970). Covert oral behavior during the silent performance of language tasks. *Psychological Bulletin, 74*(5), 309-326.
- Meiran, N. (1996). Reconfiguration of processing mode prior to task performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 22*(6), 1423-1442.
- Meiran, N. (2000). Modeling cognitive control in task-switching. *Psychological Research, 63*(3-4), 234-249.
- Miyake, A., Emerson, M. J., Padilla, F., & Ahn, J.-c. (2004). Inner speech as a retrieval aid for task goals: The effects of cue type and articulatory suppression in the random task cuing paradigm. *Acta Psychologica, 115*(2-3), 123-142.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., & Howerter, A. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex 'frontal lobe' tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology, 41*(1), 49-100.
- Miyake, A., & Shah, P. (1999). *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. (pp. 528) New York, NY US: Cambridge University Press.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences, 7*(3), 134-140.
- Moore, T. L., Schettler, S. P., Killiany, R. J., Rosene, D. L., & Moss, M. B. (2009). Effects on executive function following damage to the prefrontal cortex in the rhesus monkey (*Macaca mulatta*). *Behavioral Neuroscience, 123*(2), 231-241.
- Morton, J. B., & Munakata, Y. (2002). Are you listening? Exploring a developmental knowledge action dissociation in a speech interpretation task. *Developmental Science, 5*, 435-440.

- Mould, M., Treadwell, L., & Washburn, M. F. (1915). Minor studies from the psychological laboratory of Vassar College: The influence of suppressing articulation on the favorable effect of disturbing repetitions. *The American Journal of Psychology*, 26(2), 286-288.
- Müller, U., Zelazo, P. D., Hood, S., Leone, T., & Rohrer, L. (2004). Interference control in a new rule use task: Age-related changes, labeling, and attention. *Child Development*, 75(5), 1594-1609.
- Murray, D. J. (1968). Articulation and acoustic confusability in short-term memory. *Journal of Experimental Psychology*, 78(4), 679-684.
- Nichelli, F., Scala, G., Vago, C., Riva, D., & Bulgheroni, S. (2005). Age-related trends in Stroop and conflicting motor response task findings. *Child Neuropsychology*, 11(5), 431-443.
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to Action: Willed and Automatic Control of Behavior. In R. Davidson, R. G. Schwartz & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and self-regulation: Advances in research and theory* (pp. 1-18). New York: Plenum Press.
- Nyhus, E., & Barcelo, F. (2009). The Wisconsin Card Sorting Test and the cognitive assessment of prefrontal executive functions: A critical update. *Brain and Cognition*, 71(3), 437-451.
- Perner, J., & Lang, B. (2002). What causes 3-year-olds' difficulty on the dimensional change card sorting task? *Infant and Child Development*, 11(2), 93-105.
- Piaget, J. (1926). *The language and thought of the child*. Oxford England: Harcourt, Brace.
- Posner, M. I., & Konick, A. F. (1966). On the role of interference in short-term retention. *Journal of Experimental Psychology*, 72(2), 221-231.
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25-42.
- Ravizza, S. M., & Carter, C. S. (2008). Shifting set about task switching: Behavioral and neural evidence for distinct forms of cognitive flexibility. *Neuropsychologia*, 46(12), 2924-2935.
- Raz, N., Dahle, C. L., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., & Land, S. (2011). Effects of age, genes, and pulse pressure on executive functions in healthy adults. *Neurobiology of Aging*, 32(6), 1124-1137.
- Reimers, S., & Maylor, E. A. (2005). Task Switching Across the Life Span: Effects of Age on General and Specific Switch Costs. *Developmental Psychology*, 41(4), 661-671.

- Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, *124*(2), 207-231.
- Rubinstein, J. S., Meyer, D. E., & Evans, J. E. (2001). Executive control of cognitive processes in task switching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*(4), 763-797.
- Rubio-Fernández, P. & Geurts, B. (2012). How to pass the false-belief task before your fourth birthday. *Psychological Science*, *24*, 27-33.
- Ruthruff, E., Remington, R. W., & Johnston, J. C. (2001). Switching between simple cognitive tasks: The interaction between top-down and bottom-up factors. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*, 1404-1419.
- Saeki, E., Saito, S., & Kawaguchi, J. (2006). Effects of response-stimulus interval manipulation and articulatory suppression on task switching. *Memory*, *14*(8), 965-976.
- Saito, S. (1994). What effect can rhythmic finger tapping have on the phonological similarity effect? *Memory & Cognition*, *22*(2), 181-187.
- Saito, S. (1997). When articulatory suppression does not suppress the activity of the phonological loop. *British Journal of Psychology*, *88*(4), 565-578.
- Salthouse, T. A. (1998). Independence of age-related influences on cognitive abilities across the life span. *Developmental Psychology*, *34*(5), 851-864.
- Salthouse, T. A. (2005). Relations Between Cognitive Abilities and Measures of Executive Functioning. *Neuropsychology*, *19*(4), 532-545.
- Salthouse, T. A., Fristoe, N., McGuthry, K. E., & Hambrick, D. Z. (1998). Relation of task switching to speed, age, and fluid intelligence. *Psychology and Aging*, *13*(3), 445-461.
- Schultz, T., & Wand, M. (2010). Modeling coarticulation in EMG-based continuous speech recognition. *Speech Communication*, *52*(4), 341-353.
- Silver, H., Goodman, C., & Bilker, W. (2009). Age in high-functioning healthy men is associated with nonlinear decline in some 'executive' functions in late middle age. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, *27*(3), 292-300.
- Smith, A. A., Malmo, R. B., & Shagass, C. (1954). An electromyographic study of listening and talking. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, *8*(4), 219-227.
- Smith, A. B., Taylor, E., Brammer, M., Toone, B., & Rubia, K. (2006). Task-specific hypoactivation in prefrontal and temporoparietal brain regions during motor inhibition and task switching in medication-naïve children and adolescents with attention deficit hyperactivity disorder. *The American Journal of Psychiatry*, *163*(6), 1044-1051.

- Sohn, M.-H., Ursu, S., Anderson, J. R., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2000). The role of prefrontal cortex and posterior parietal cortex in task switching. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(24), 13448-13453.
- Sokolov, A. N. (1972). *Inner speech and thought* (G. T. Onischenko, Trans.). New York: A Plenum / Rosetta edition.
- Strobach, T., Liepelt, R., Schubert, T., & Kiesel, A. (2012) Task switching: Effects of practice on switch and mixing costs. *Psychological Research*, 76(1), 74-83.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643-662.
- Tassinary, L.G., Cacioppo, J.T., & Vanman, E.J. (2007). The skeletomotor system: Surface electromyography. In J.T. Cacioppo, L.G. Tassinary, & G.G. Berntson, (Eds.). *Handbook of Psychophysiology* (3rd edition; pp. 267-299). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Thompson-Schill, S. L., Ramscar, M., & Chrysikou, E. G. (2009). Cognition without control: When a little frontal lobe goes a long way. *Current Directions in Psychological Science*, 18(5), 259-263.
- Tombaugh, T. N. (2004). Trail Making Test A and B: Normative data stratified by age and education. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 19(2), 203-214.
- Underwood, B. J. (1964). Articulation in verbal learning. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, 3(2), 146-149.
- van Bers, B. M. C. W., Visser, I., van Schijndel, T. J. P., Mandell, D. J. and Raijmakers, M. E. J. (2011). The Dynamics of Development on the Dimensional Change Card Sorting task. *Developmental Science*, 14, 960-971.
- Watson, J. M., & Strayer, D. L. (2010). Supertaskers: Profiles in extraordinary multi-tasking ability. *Psychonomic Bulletin and Review*, 17, 479-485.
- Wendt, M., Kiesel, A., Mathew, H., Luna-Rodriguez, A., & Jacobsen, T. (2013). Irrelevant stimulus processing when switching between tasks. *Journal of Psychology*, 221, 41-50.
- West, R. L. (1996). An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological Bulletin*, 120(2), 272-292.
- Willigenburg, N. W., Daffertshofer A., Kingma I., & van Dieën J. H. (2012). Removing ECG contamination from EMG recordings: A comparison of ICA-based and other filtering procedures. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22(3), 485-493.

- Zelazo, P. D., Carlson, S. M., & Kesek, A. (2008). The Development of Executive Function in Childhood. In C. A. Nelson & M. Luciana (Eds.), *Handbook of developmental cognitive neuroscience (2nd ed.)*. (pp. 553-574). Cambridge, MA US: MIT Press.
- Zelazo, P. D., Craik, F. I. M., & Booth, L. (2004). Executive function across the life span. *Acta Psychologica, 115*(2-3), 167-183.
- Zelazo, P. D., & Frye, D. (1998). Cognitive complexity and control: II. The development of executive function in childhood. *Current Directions in Psychological Science, 7*(4), 121-126.
- Zelazo, P. D., Frye, D., & Rapus, T. (1996). An age-related dissociation between knowing rules and using them. *Cognitive Development, 11*(1), 37-63.
- Zelazo, P., Müller, U., Frye, D., & Marcovitch, S. (2003). The development of executive function in early childhood: III. Study 2: Rule complexity and stimulus characteristics in executive function. *Monographs of the Society for Research in Child Development, 68*(3), 48-64.

ANNEXES

Annexe 1 : Temps moyens de réponses correctes (ms) et proportion moyenne d'erreurs obtenus par les enfants dans l'expérience 2 aux tâches d'alternance catégorielle selon les blocs et la complexité des tâches. Les données entre parenthèses correspondent aux écarts-types.

		Blocs				
	Tâches	Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3	Bloc 4	Bloc 5
Temps de réponses correctes (ms)	Simple	2143 (738)	2157 (885)	1890 (840)	1748 (816)	1861 (620)
	Intermédiaire	2722 (1394)	1167 (491)	2022 (1076)	885 (386)	1883 (746)
	Complexe	2541 (1778)	2288 (917)	2165 (960)	1935 (691)	2553 (820)
Prop. Erreurs	Simple	0.08 (0.11)	0.08 (0.12)	0.09 (0.20)	0.09 (0.20)	0.05 (0.09)
	Intermédiaire	0.08 (0.10)	0.00 (0.02)	0.05 (0.11)	0.00 (0.00)	0.14 (0.17)
	Complexe	0.05 (0.08)	0.07 (0.11)	0.16 (0.32)	0.16 (0.29)	0.43 (0.22)

Annexe 2 : Temps moyens de réponses correctes (ms), proportion moyenne d'erreurs et quantité de langage pendant les temps de réponses (mV.ms) en fonction des tâches d'alternance catégorielle et des blocs obtenus par les participants dans l'expérience 3. Les données entre parenthèses correspondent aux écarts-types.

		Blocs				
Tâches		1	2	3	4	5
Temps de réponses correctes (ms)	Simple	539 (113)	503 (116)	464 (87)	447 (78)	451 (71)
	Intermédiaire	528 (105)	409 (106)	492 (125)	370 (146)	479 (100)
	Complexe	529 (117)	552 (146)	498 (113)	468 (93)	834 (133)
Prop. Erreurs	Simple	0.01 (0.03)	0.01 (0.02)	0.01 (0.03)	0.02 (0.03)	0.02 (0.02)
	Intermédiaire	0.02 (0.04)	0.00 (0.01)	0.04 (0.12)	0.02 (0.08)	0.01 (0.01)
	Complexe	0.01 (0.03)	0.03 (0.04)	0.02 (0.08)	0.05 (0.15)	0.10 (0.16)
EMG-RT (mV.ms)	Simple	1.83 (0.66)	1.62 (0.61)	1.48 (0.48)	1.41 (0.44)	1.43 (0.50)
	Intermédiaire	1.88 (0.78)	1.39 (0.63)	1.71 (0.91)	1.32 (0.89)	1.67 (0.72)
	Complexe	1.87 (0.78)	1.89 (0.98)	1.66 (0.75)	1.62 (0.72)	2.87 (0.98)

Annexe 3 : Scores moyens obtenus par les participants de 75 ans aux différents tests permettant d'évaluer les fonctions cognitives.

Tests Cognitifs	Scores moyens
MMSE	28,75 / 30
Matrice de Raven (Set A)	8,33 / 12
Stroop Victoria Indice IF	2,24
Trail Making Test (Temps B - Temps A)	56,59
Fluence verbale	24,32
Séquences lettre chiffre	10,89

Annexe 4 : Temps moyens de réponses correctes (ms), proportion moyenne d'erreurs et quantité de langage pendant les temps de réponses (mV.ms) en fonction des tâches d'alternance catégorielle et des blocs obtenus par les participants de 25, 50 et 75 ans dans les expériences 4 et 5. Les données entre parenthèses correspondent aux écarts-types.

		Blocs				
Âge		1	2	3	4	5
Temps de réponses correctes (ms)	25 ans	622 (129)	560 (117)	543 (111)	474 (90)	686 (125)
	50 ans	829 (192)	710 (147)	687 (145)	616 (132)	842 (202)
	75 ans	1248 (381)	1065 (300)	1061 (424)	920 (310)	1065 (315)
	25 ans	0.05 (0.05)	0.04 (0.05)	0.03 (0.04)	0.04 (0.08)	0.07 (0.07)
	50 ans	0.08 (0.07)	0.05 (0.05)	0.03 (0.07)	0.03 (0.05)	0.07 (0.05)
	75 ans	0.07 (0.09)	0.04 (0.05)	0.04 (0.08)	0.04 (0.07)	0.18 (0.16)
EMG-RT (mV.ms)	25 ans	3.20 (1.13)	2.74 (1.12)	2.51 (0.90)	2.23 (0.89)	3.27 (0.97)
	50 ans	4.72 (2.23)	3.47 (1.59)	3.33 (1.75)	3.05 (1.37)	4.16 (1.54)
	75 ans	5.94 (2.62)	4.97 (1.67)	4.75 (2.58)	4.17 (1.91)	5.74 (2.40)

Annexe 5 : Rappel moyen et quantité moyenne de langage (mV.ms) en fonction de la position des lettres et de la similarité des lettres dans l'expérience 8.

		Position des lettres						
Lettres		1	2	3	4	5	6	7
Rappel	Similaires	0.82 (0.15)	0.73 (0.15)	0.63 (0.18)	0.53 (0.19)	0.46 (0.20)	0.43 (0.18)	0.47 (0.18)
	Dissimilaires	0.87 (0.10)	0.77 (0.17)	0.68 (0.21)	0.58 (0.23)	0.54 (0.25)	0.54 (0.22)	0.62 (0.21)
	Similaires	3.87 (1.40)	3.76 (1.74)	3.56 (1.35)	3.56 (1.14)	3.72 (1.77)	3.68 (1.59)	4.27 (1.97)
	Dissimilaires	3.93 (1.17)	3.85 (1.08)	3.61 (1.12)	3.61 (1.11)	3.78 (1.13)	3.74 (1.08)	3.87 (1.24)