



HAL
open science

Le temps "agi" : rôle de l'action dans le développement des conduites temporelles

Florie Monier

► **To cite this version:**

Florie Monier. Le temps "agi" : rôle de l'action dans le développement des conduites temporelles. Psychologie. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2019. Français. NNT : 2019CLFAL031 . tel-03507581

HAL Id: tel-03507581

<https://theses.hal.science/tel-03507581>

Submitted on 3 Jan 2022

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.



Le temps « agi » : rôle de l'action dans le développement des conduites temporelles

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

Présentée par

Florie Monier

Soutenance le 23 Juillet 2019

Direction

Sylvie Droit-Volet (Professeure des universités) & Jennifer Coull (Chargée de recherche CNRS, HDR)

Membres du jury :

Jennifer Coull (Chargée de recherche CNRS, HDR, Aix-Marseille Université, CNRS UMR 7291)

Sylvie Droit-Volet (Professeure des universités, Université Clermont Auvergne, CNRS UMR 6024)

Sandrine Gil (Professeure des universités, Université de Poitiers, CNRS UMR 7295) (rapporteur)

Marie Izaute (Professeure, Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand)

Joëlle Provasi (Maître de conférence HDR, Ecole pratiques des Hautes Etudes, Paris) (rapporteur)

John Wearden (Professeur, Keele University, U.K)

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	p 3
RESUME	p 4
I PARTIE THEORIQUE	p 6
INTRODUCTION	p 6
CHAPITRE 1 : Caractéristiques de la perception des durées	
Introduction	p 9
1. La durée une perception précise, variable et flexible	p 9
2. Les sources de variation dans la perception des durées	p 15
2.1 Les variations causées par les tâches concurrentes	p 15
2.2 Les variations causées par les modifications du rythme de l'horloge	p 17
CHAPITRE 2 : Les modèles du traitement temporel	
Introduction	p 20
1. Les modèles d'horloge interne	p 20
1.1- Le modèle d'horloge interne de Treisman (1963)	p 20
1.2 La théorie de la propriété du temps scalaire (TPS)	p 22
1.3. Le modèle attentionnel d'horloge interne	p 25
2. Les modèles d'oscillateurs neuronaux	p 26
2.1 Les modèles d'oscillateurs multiples	p 27
2.2 Le modèle du « Striatal Beat Frequency » (SBF)	p 31
2.3 Les modèles issus des neurosciences	p 33
3. Pas de système dédié au traitement du temps, mais plusieurs structures qui exercent des rôles différents	p 39
3.1 Les structures corticales	p 40
3.2 Les noyaux de la base	p 45
3.3 Le cervelet	p 46
Conclusion	p 47
CHAPITRE 3 : Le développement du jugement des durées	p 48
1. Les compétences temporelles du bébé	p 48
2. Le développement des capacités de jugement du temps	p 50
2.1 L'évolution des capacités de jugement du temps	p 51
2.2 Les causes de la variabilité liées au développement cognitif général	p 55
2.3. Le développement avec l'âge du jugement temporel explicite des événements	p 63
CHAPITRE 4 : La synchronisation temporelle	p 71
1. Introduction et Définition	p 71
2. Méthodes d'étude comportementale de la synchronisation	

chez l'adulte et l'enfant	p 74
3. Développement des compétences rythmiques	p 76
3.1 La synchronisation chez le bébé	p 76
3.2 Le développement de la synchronisation chez l'enfant	p 80
4. Les modèles spécifiques de la synchronisation	p 86
4.1 Le modèle de la synchronisation sensorimotrice de Wing et Kristofferson	p 86
4.2 Le modèle du « dynamic attending »	p 88
4.3 Un modèle alternatif : l'intégration sensorimotrice du rythme	p 91
5. Rythme et tendance d'action : l'effet des émotions	p 93
CONCLUSION ET SYNTHÈSE DE LA PROBLÉMATIQUE DE THÈSE	p 95
II PARTIE EXPÉRIMENTALE	
CHAPITRE 5 : Etude expérimentale sur le développement de la synchronisation sensorimotrice: composant moteur et cognitif	p 102
CHAPITRE 6 : Etude sur l'effet bénéfique de l'action sur l'apprentissage temporel	p 123
CHAPITRE 7 : Etude sur l'effet bénéfique de l'action sur l'apprentissage des intervalles de temps : une représentation en mémoire plus robuste ?	p 156
CHAPITRE 8 : Effet d'un apprentissage moteur « dynamique » de la durée	p 167
CHAPITRE 9 : Etude sur l'effet des émotions sur la synchronisation sensorimotrice chez l'adulte et l'enfant	p 174
DISCUSSION	p 192
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	p 211

REMERCIEMENTS

En rédigeant ce travail, je pense bien sûr à ma famille sans laquelle rien n'aurait été possible et en particulier mon mari Yoann et mon fils Maxime que je remercie pour leur patience et leur soutien au quotidien. Je remercie chaleureusement mes beaux-parents pour leur support « logistique » pendant ces années d'étude et tout particulièrement ma belle-mère, Rolande, pour son aide infiniment précieuse à la relecture de ce travail. Enfin, je dédie ce travail à mes parents qui, chacun à leur manière, ont su me transmettre leur curiosité intellectuelle. Je les remercie pour leur indéfectible soutien.

Ma pensée va également à mes deux directrices de thèse, Sylvie Droit-Volet et Jennifer Coull, que je remercie d'avoir accepté de m'encadrer, me donnant ainsi la chance de bénéficier de leur expertise. Je les remercie d'avoir partagé avec moi leur merveilleuse passion pour la recherche et d'avoir dirigé ce travail avec toute l'attention, la disponibilité, et la bienveillance qui les caractérisent.

Je remercie également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail de thèse et le temps qu'ils ont consacré à sa lecture.

Je remercie les membres du laboratoire LAPSCO pour leur accueil durant ces quelques années, ainsi que mes collègues doctorants pour nos collaborations et les activités partagées ensemble. Un grand merci à Michael Dambrun, pour son enseignement et son enthousiasme pour la collaboration qui a permis à nombre de projets de voir le jour. Je remercie également les membres du Catech pour leur aide technique et leurs conseils précieux pour la programmation des procédures de recherche, ainsi que Sophie Monceau pour sa disponibilité et sa bonne humeur.

Je tiens également à exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont permis d'acquérir une expérience clinique des troubles du développement, expérience qui a été à la source de nombreux questionnements de recherche, dont la plupart ont donné lieu à des projets qui sont encore en cours de réalisation ou d'étude. Merci donc à l'équipe du service de génétique du CHU Estaing de Clermont-Ferrand et sa neuropsychologue Ania Miret, et merci à l'équipe du SESSAD Victor Duruy, particulièrement à Vanessa Pongerrad, neuropsychologue et Sandra Collot, directrice. Un grand merci également à Hélène Dallens, ophtalmo-pédiatre, pour m'avoir guidé vers les troubles du développement, il y a maintenant quelques années, et m'avoir soutenue dès le début de ces études de psychologie.

Je suis également reconnaissante envers les étudiants de master 1 en psychologie et de dernière année d'orthoptie qui ont travaillé avec moi, pour leur participation à la récolte des données mais surtout pour m'avoir permis de faire mes premiers pas dans le rôle d'encadrant.

Enfin, je remercie l'ensemble des personnes adultes et enfants qui ont participé à ces études et sans lesquels rien n'aurait été possible, ainsi que leurs parents et instituteurs.

Résumé

Certaines habiletés temporelles sont innées, telles que la capacité de produire des mouvements rythmiques, ou encore la possibilité d'apprendre une durée de façon implicite. Cependant, la conscience du temps ou le jugement explicite des durées s'acquiert lentement au cours du développement. Ainsi la question qui se pose est : Comment faisons-nous, pour acquérir ces capacités de jugement temporel ? L'une des hypothèses que l'on peut formuler à partir des travaux menés chez le jeune enfant, c'est que nous apprenons ce qu'est le temps en faisant l'expérience répétée de son écoulement à travers la durée de nos actions. Les récentes études en imagerie, qui ont montré de façon consistante une implication des aires motrices lors de la perception des durées chez l'adulte, plaident en faveur de l'hypothèse d'un rôle important de l'action dans la construction des jugements temporels. C'est pourquoi, dans notre travail de thèse, nous avons mené une série d'études permettant d'explorer de façon plus précise le rôle de l'action dans les activités temporelles et l'évolution de ce rôle au cours du développement. Nous avons examiné le rôle respectif du développement de la motricité et des fonctions cognitives dans les activités rythmiques, puis nous avons testé l'influence d'un apprentissage sensorimoteur par rapport à un apprentissage visuel des rythmes sur différentes tâches temporelles, motrices et perceptives. Pour finir, nous avons examiné l'influence de la tendance d'action, face à une menace, sur le traitement des intervalles temporels. Nos travaux ont confirmé la forte influence des capacités motrices sur les performances rythmiques, en particulier chez les enfants. De plus, nous avons montré que l'action bénéficie aux enfants dans des tâches temporelles motrices mais aussi perceptives, et cela d'autant plus qu'ils sont jeunes. De plus, l'action bénéficie aux adultes, mais seulement lorsque la tâche est difficile. Enfin, le besoin d'agir rapidement modifie le traitement des intervalles temporels. Ainsi il semble bien que l'action et le système moteur jouent un rôle tout particulier dans les traitements temporels et leur développement notamment en facilitant l'apprentissage des durées. Le temps est donc d'abord « agi » avant d'être « représenté », conceptualisé.

Mots clefs : Développement, enfant, temps, synchronisation, rythme, action

Abstract

Some temporal skills are innate, such as the ability to produce rhythmic movements, or the ability to learn a duration implicitly. However, the consciousness of time or explicit judgment of durations, acquires slowly during development. So the question that arises is: How do we do to acquire these abilities of temporal judgment? One of the hypotheses that can be formulated from the work carried out in the young child, is that we learn what time is by repeatedly experiencing its flow through the duration of our actions. Recent studies in imaging that have consistently shown an involvement of motor areas in the perception of durations, even in adults, argue in favor of the hypothesis of an important role of action in the construction of temporal judgments. This is why in our work we have conducted a series of studies to further explore the role of action in temporal activities and the evolution of this role across development. We examined the respective role of motor and cognitive function development

on rhythmic performance, then tested the influence of sensorimotor learning versus visual learning of rhythms on different temporal, motor and perceptual tasks. Finally, we examined the influence of the tendency of action in a threatening situation, on the treatment of time intervals. Our work has confirmed the strong influence of motor skills on rhythmic performance, especially in children. In addition, we have shown that the action benefits children in temporal motor tasks as in temporal perceptive tasks, especially in young children. However, the action also benefits adults, but only when the task is difficult. Finally, the need to act quickly changes the treatment of time intervals. Thus, it seems that the action and the motor system play a very special role in the temporal treatments, notably by facilitating the learning of durations.

Key words: Development, temporal judgments, action, synchronization rhythms

I. PARTIE THEORIQUE

Introduction

*« C'est en reconnaissant l'avant et l'après que l'on perçoit le temps. Ainsi, bien que le changement ne puisse pas se produire sans le temps, le temps ne pourrait pas être reconnu sans le changement. Ainsi le temps présuppose le changement ou le mouvement »
Aristote*

Le *temps* est présent à chaque instant de nos vies. Il est présent dans notre conscience, lorsque, par exemple, nous nous ennuyons, nous attendons avec anxiété, ou lorsque notre estomac nous rappelle l'approche de l'heure du déjeuner. Mais, le plus souvent, nous ne sommes pas conscients que nous traitons le temps. C'est le cas lorsque par exemple, nous programmons nos gestes pour attraper une balle, lorsque nous coordonnons nos mouvements pour écrire, ou lorsque nous sommes tout simplement occupés à réaliser une activité. Ces différents exemples laissent entrevoir la pluralité et la complexité des processus cognitifs du traitement du temps. Le temps est en effet un concept, une dimension à laquelle on pense, de laquelle on parle, mais il est aussi impliqué dans des traitements automatiques, dont des tâches motrices.

L'ensemble des auteurs qui ont étudié la perception du temps s'accordent sur le fait que notre cerveau est capable de traiter les durées des événements ou les intervalles temporels entre deux évènements un peu à la manière d'une horloge. Toutefois, après plusieurs décennies de recherche, la nature des mécanismes à l'origine de notre capacité de perception du temps soulève encore de nombreuses questions (Merchant & Yarrow, 2016). Alors que la plupart de ces mécanismes semblaient élucidés, des études en imagerie ont récemment soulevé la question du rôle du système moteur dans la perception des durées (Wiener, Turkeltaub, & Coslett, 2010 ; Coull, Nazarian, & Vidal, 2008). L'implication des aires motrices dans la perception visuelle

ou auditive des durées peut sembler incongrue, et soulève des questions fondamentales à l'origine de mon travail de thèse. Le temps est-il traité dans les aires motrices parce que les structures motrices jouent un rôle primaire dans l'intégration dynamique du flux des événements ? L'action en elle-même, ou sa simulation, joue-t-elle au contraire un rôle secondaire influençant le traitement temporel uniquement quand elle est présente, quand le sujet doit par exemple fournir une réponse motrice ?

L'idée d'une influence de l'action sur la perception du temps n'est pas nouvelle. Elle remonte à Aristote au V^{ème} siècle avant notre ère qui, dès son époque, conçoit le temps à travers l'expérience perceptive du changement, comme un changement induit, entre autre, par le mouvement. Le rôle de l'action dans le traitement du temps a depuis été repris par de nombreux philosophes dont le plus célèbre est certainement Bergson (1968) qui considère que la profonde nature du temps est ancrée dans notre sentiment de durer, dans « quelque chose de notre corps ». Comme là dit autrement Gibson (1975), « L'abstraction du temps est le fantôme des événements du monde ». De façon intéressante, les travaux du développementaliste Jean Piaget (1946) suggèrent que l'enfant commence à appréhender le temps à travers la durée de ses actions. Chez le jeune enfant, le temps n'est pas un objet de perception à part entière. Comme nous allons le voir, il semble que ce soit à partir de la durée de ses expériences, motrices et perceptives, qu'émerge chez l'enfant une idée de temps, une conscience de temps qui deviendra plus tard un concept de temps. Ainsi, étudier l'origine de la perception du temps et son développement au cours de l'enfance représente un moyen nous aidant à mieux comprendre le rôle de l'action, ou à mieux expliquer l'activation des aires motrices, dans la perception du temps chez l'adulte. Ainsi dans ce travail de thèse, nous avons adopté une approche développementale dans le but de clarifier le rôle de l'action dans les différentes composantes du traitement temporel et d'examiner si l'expérience motrice et le développement de la

motricité jouent, ou non, un rôle prépondérant dans le développement des compétences temporelles et dans les conduites d'estimation du temps chez l'adulte.

Chapitre 1

Caractéristiques de la perception des durées.

Introduction

Le temps s'écoule de façon linéaire et régulière ainsi qu'en témoignent les horloges et les montres qui peuplent notre quotidien. Nous sommes tous convaincus de cette réalité. Cependant, au niveau psychologique, il en va tout autrement en ce qui concerne notre perception de l'écoulement du temps. Pour l'humain, le temps perçu est relatif. Une heure passée à nous amuser ne semble pas de la même durée qu'une heure passée à s'ennuyer dans une salle d'attente. Cependant, nous sommes aussi capables de juger le temps avec une grande précision. Tout comme notre montre, notre cerveau disposerait de mécanismes très efficaces pour traiter du temps. Toutefois, contrairement à notre montre, qui fonctionne de façon rigide, notre cerveau fait partie d'un organisme vivant et parvient à changer d'horloge, de rythme, pour s'adapter à son environnement. C'est pourquoi notre système cérébral de traitement du temps est capable de tenir compte de diverses informations temporelles, issues du contexte dans lequel nous nous trouvons ainsi que de notre état interne, quelle que soit leur complexité, et de s'y adapter. C'est cette flexibilité de notre système interne de mesure du temps qui confère à notre perception du temps ses caractéristiques si particulières.

1. La durée, une perception précise, variable et flexible

Lorsque nous percevons un objet, celui-ci est accessible à nos sens suffisamment longtemps pour nous permettre d'en créer une représentation. Si nous regardons l'image d'une voiture, par exemple, nous voyons sa couleur, si elle est bleue ou rouge, sa forme, et nous

pouvons l'admirer, la décrire, tant que nous l'avons sous les yeux. En sa présence, on s'en fait une représentation précise. Les choses sont différentes pour la perception des durées. D'abord parce que nous n'avons pas de système sensoriel du temps. Les durées ne sont pas directement accessibles à un sens ce qui pose la question de la nature de la représentation du temps. De plus, il n'est possible d'avoir une représentation de la durée que lorsque celle-ci est écoulée. Cela implique que notre jugement des durées contrairement à d'autres informations sensorielles requiert une sorte de mémoire du temps. Pour traiter la durée, il faut encoder la durée au fur et à mesure de sa présentation, la maintenir et la récupérer en mémoire de travail pour la juger. Ainsi, contrairement à d'autres perceptions, la perception du temps, est particulière car elle implique aussi des processus mnésiques et exécutifs (Ogden et al., 2017 ; Brown, Collier & Night, 2013 ; Schweickert, et al., 2007 ; Droit-Volet & Zélanti, 2013a, Droit-Volet, 2013). Aussi la particularité du traitement de l'information temporelle est qu'elle est souvent variable en raison de plusieurs sources de bruit, au niveau de l'encodage, du maintien de l'information temporelle en mémoire, voire au niveau du jugement temporel lui-même. Les études menées sur la perception et la mémorisation des durées ont en effet mis en évidence que la principale caractéristique du jugement temporel est sa **variabilité**, autrement dit le bruit inhérent à sa représentation. Ce bruit, cette variabilité augmente avec l'intervalle à évaluer. Dès ses premiers travaux, Treisman (1963) a observé que les estimations des durées sont, en moyenne, précises. Comme on peut le voir sur la figure 1, la distribution des réponses pour une durée de 8 s est centrée sur 8 s. Cependant, la variabilité dans l'estimation des durées augmente proportionnellement avec l'intervalle temporel à estimer. La distribution des réponses est plus variable pour une durée de 21s que pour une durée de 8 s. Ce phénomène suit la loi de Weber décrite par Fechner (1887, traduit de l'allemand en 1987). Cependant, si l'on normalise les intervalles selon la règle : $(I-T)/T$ où I est la durée subjective perçue et T la moyenne de l'intervalle à évaluer, la variabilité demeure constante. Ainsi, si l'on calcule la distribution des

réponses ou en d'autres termes la variabilité, selon une loi normale centrée sur la valeur à évaluer, on obtient une variabilité constante pour des durées allant d'une seconde à plusieurs minutes, avec des réponses suivant une distribution normale centrée sur la moyenne (Allan & Gibbon, 1991). Sur la figure 1, ceci se traduit par une superposition des courbes d'estimation de différentes durées quand l'échelle des abscisses est commune, c'est-à-dire relative. C'est ce qu'on appelle la propriété du temps scalaire (Allan, 1979 ; Gibbon, 1977, 1991, 1992 ; Church, Meck & Gibbon, 1994 ; Gibbon, & Church, 1990 ; Gibbon, Church & Meck, 1984 ; Rakitin, Gibbon, Penney, Malapani, Hinton, & Meck, 1998 ; Wearden, 2005, 2016).

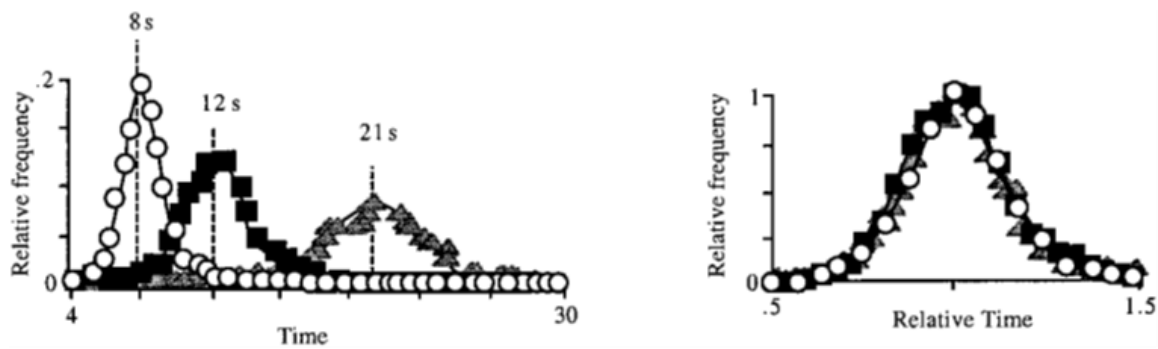


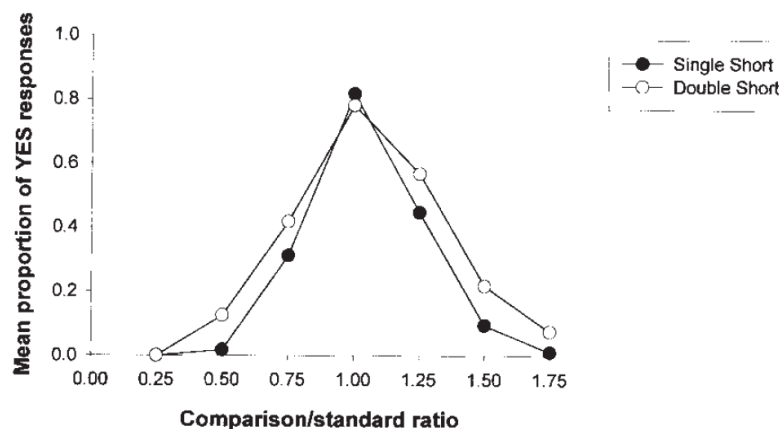
Figure 1 : Illustration de la propriété du temps scalaire. A gauche distribution des réponses des sujets (gradient de généralisation) à une tâche de perception des durées sur une échelle temporelle classique. A droite, la représentation de ces réponses sur une échelle relative illustre la propriété du temps scalaire. (extrait de Rakitin et al., 1998)

Cette propriété du temps scalaire est la caractéristique la plus robuste de la perception du temps (Wearden & Lejeune, 2008, mais voir Grondin, 2012). Elle a été mise en évidence chez l'animal, comme le rat (Buhusi & Meck 2006, Buhusi et al., 2009), chez l'humain adulte (Rakitin et al., 1998) et chez l'enfant de différents âges, de 3 à 8 ans (Droit-Volet et Wearden, 2001, 2002; Droit- Volet, 2002), mais aussi plus récemment chez le bébé (Brannon, Libertus,

Meck & Woldorff, 2008 ; Brannon, Suanda, & Libertus, 2007). Ainsi, la propriété du temps scalaire, ou autrement dit l'augmentation de la variabilité proportionnelle à l'intervalle, est une propriété intrinsèque du système d'horloge interne des organismes vivants. Tous les

modèles visant à expliquer les mécanismes de la perception du temps ont dû intégrer cette variabilité, comme nous le verrons.

Une autre caractéristique de notre perception du temps est la **flexibilité** de la représentation de la durée en mémoire, selon le contexte rencontré. Il a par exemple été montré qu'une durée courte de 2 s va être perçue plus longue (surestimée) qu'elle ne l'est en réalité, quand elle est présentée parmi des durées plus longues et qu'une durée longue de 12 s va être perçue plus courte, (sous-estimée) quand elle est présentée parmi des durées plus courtes. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet de Vierordt (1808) ou encore d'effet de tendance centrale (Hollingworth, 1910). Il révèle que la représentation en mémoire d'une durée est flexible (voir aussi Bausenhardt, 2016). Il y a peu, les études sur la mémoire du temps ont mis en évidence que la représentation d'une durée est affectée par la présentation d'une seconde durée produisant une forme d'interférence en mémoire (Jones & Wearden, 2003, 2004. Ogden, Wearden & Jones, 2008; Taatgen, & Van Rijn, 2011; Grondin, 2005). Dans une étude réalisée en 2004, Jones et Wearden, ont montré que si l'on demande à des participants de mémoriser deux durées différentes, la représentation de ces durées perd en précision. Les participants éprouvent plus de difficultés à les discriminer au milieu de durées de comparaisons que s'ils ont mémorisé une seule durée. En revanche, s'ils doivent mémoriser deux durées mais qu'ils savent qu'une seule d'entre elles est pertinente pour la suite des tâches, la précision de cette dernière n'est pas affectée (Figure. 2).



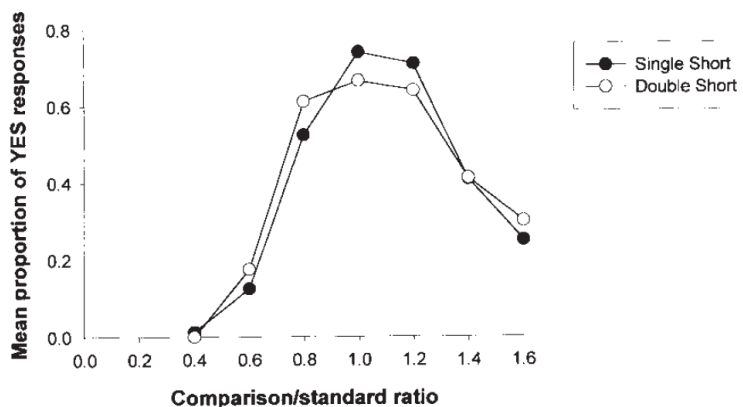


Figure 2 : Courbes de généralisation dans une tâche comportant deux durées de références. En haut, en condition « deux durées de référence pertinentes », en bas, en condition « une seule durée de référence pertinente » (d'après Jones & Wearden, 2004).

Whitaker, Lowe, & Wearden, (2004) ont également montré, chez le rat, que deux durées interfèrent entre elles dans l'apprentissage seulement si elles sont proches. Dans le cas contraire, les rats construisent deux représentations distinctes et précises. Aussi cette interférence dans la représentation des durées en mémoire ne serait pas uniquement due à un problème de charge en mémoire liée à un apprentissage multiple comme l'avaient suggéré dans un premier temps Wearden et Jones, (2004). Elle refléterait également la capacité de notre système temporel à former des représentations à la fois **flexibles** et **probabilistes** des durées (Jazayeri & Shadlen, 2010), autrement dit à s'adapter en permanence à notre l'environnement et ses variations. Aussi, de plus en plus de chercheurs essaient actuellement d'appliquer des modèles Bayésiens¹ aux conduites d'estimation du temps (ex : Hallez et al. 2019 ; Di Luca, & Rhodes, 2016 ; Dyjas, Bausenhart, Ulrich, 2012 ; Van Rijn, 2016).

¹ Les modèles bayésiens sont basés sur l'idée qu'à partir de l'observation des événements, on peut construire des probabilités à posteriori sur les conditions dans lesquelles ils se produisent et donc faire des inférences quant à leurs causes. Le postulat de base de ces chercheurs est que l'esprit humain utilise ce genre d'inférences basées sur une multitude d'expériences vécues pour formuler des hypothèses sur son environnement, hypothèses qui sont constamment affinées au cours des expériences suivantes. L'humain construirait ainsi progressivement une partie de ces connaissances sous la forme des réseaux de probabilistes conditionnelles. On applique donc de plus en plus ce genre de modèles basés sur le théorème de Bayes à la cognition humaine.

Si l'on considère l'aspect relatif de la perception du temps, un même intervalle peut nous paraître plus court ou plus long qu'il n'est en réalité. Aussi est-il peu probable que nous ayons un simple et seul système, comme une horloge interne qui émet des pulsations, pour la représentation des durées (voir Grondin, 2001). Avec un tel système, il n'y aurait jamais d'erreur. Le temps à quelques millisecondes près ne serait jamais sous ou surestimé. De plus, notre système de mesure du temps est flexible, la représentation de l'intervalle est probabiliste. L'ensemble des durées perçues est synthétisé sous la forme d'une distribution de type gaussienne, avec un pic qui correspond à la valeur qui a la plus grande probabilité d'être la valeur de l'intervalle perçu, et un écart type, qui tient compte de l'ensemble des variations perçues pour un même intervalle. La flexibilité dans la représentation du temps soulève une question : Y a-t-il un moment où la représentation de l'intervalle se fige ? En utilisant des modèles Bayésiens Taatgen et Van Rijn (2011) suggèrent qu'il existe une forte probabilité pour que notre représentation d'un intervalle fluctue en permanence étant sensible à toute nouvelle présentation. On n'aboutirait donc jamais à une représentation figée d'une durée associée à un événement. Cependant, en l'absence d'interférence, quand le sujet fait l'expérience de la durée à plusieurs reprises, le système aboutit à une représentation précise (de l'ordre des 200 millisecondes). Dans certains contextes il suffit de quelques présentations pour que cette représentation précise du temps s'établisse (Wearden & Ferrara, 1995, 1996 ; Balsam, Drew & Gallistel, 2010 ; Droit-Volet & Rattat, 2007). Quoiqu'il en soit, nous allons maintenant évoquer les principales sources de variabilité dans la perception des durées, celles liées à la présence de tâches interférentes et celles liées aux facteurs susceptibles d'accélérer le système de l'horloge interne.

2. Les sources de variation dans la perception des durées

2.1. Les variations causées par les tâches concurrentes

De nombreuses études ont montré l'influence de l'attention que nous portons au temps pour son évaluation. Comme durant l'écoulement d'un intervalle de temps nous sommes soumis à de nombreuses autres perceptions, nous manquons souvent de ressources cognitives pour traiter la durée correctement. Ainsi le traitement du temps demande des ressources attentionnelles comme cela a été mis en évidence en utilisant le paradigme de double tâche (ex : Brown, 1997, 2010 ; Brown et al, 2013 ; Schweickert et al. 2007 ; Fortin et al.1993 ; Casini & Macar, 1997 ; 1999 ; pour une méta-analyse, voir Block, Hancock & Zakay, 2010). Lorsque notre attention est partagée entre plusieurs tâches réalisées en parallèle, une tâche temporelle, et l'autre non temporelle, nous sous-estimons les durées. On peut citer en exemple l'étude réalisée par Burle et Casini, en 2001. Les auteurs ont comparé les durées en condition de simple tâche de reproduction de durées et de double tâche, c'est-à-dire en ajoutant une tâche de temps de réaction à la tâche de reproduction. Au cours d'une première phase, les participants devaient apprendre une durée, en appuyant avec la main droite sur un bouton réponse pendant la durée d'allumage d'une diode verte. Puis, ils devaient produire cette durée à l'allumage de la diode verte. Ensuite, dans une deuxième phase, ils devaient réagir le plus vite possible à l'allumage d'une autre diode, (rouge), en appuyant de l'autre main (gauche) sur un autre bouton. Enfin, dans la phase test, les participants réalisaient ces deux tâches en parallèle (double tâche). De plus pour dissocier les effets liés à la double tâche des effets qui seraient liés à l'accélération du rythme de l'horloge interne, les auteurs ont ajouté un clic rapide, de faible et de forte intensité.

Les résultats de cette étude sont présentés figure. 3. On s'aperçoit que les durées sont sous estimées en double tâche et ceci quelle que soit l'intensité des clics. L'attention accordée au

temps impacte donc son traitement. Cependant nous verrons que le rôle des ressources cognitives dans le traitement du temps dépend de la nature du traitement demandé.

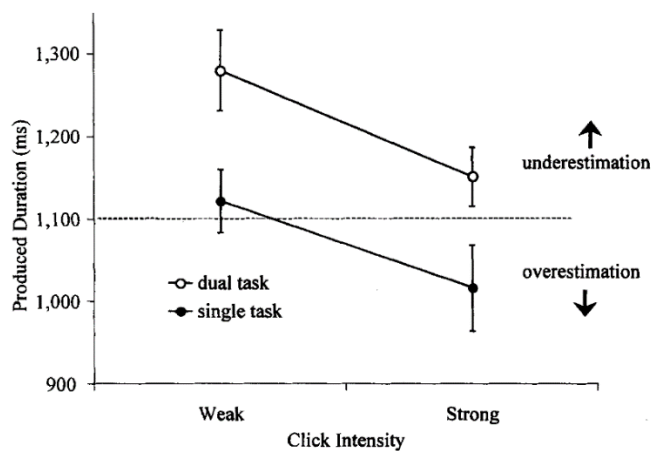


Figure 3 : Performances en reproduction des durées en condition de double tâche et de simple tâche en présence d'un clic de faible et de forte intensité (extrait de Casini et Burle, 2001).

Les tâches interférentes n'affectent pas seulement l'attention accordée au temps mais aussi son maintien en mémoire de travail. Tout dépend en fait de la tâche utilisée et du moment où intervient la tâche interférente pour le traitement du temps. Des études ont en effet montré que certaines tâches concurrentes, bien qu'elles captent l'attention, comme la recherche visuelle de cibles, ne perturbent pas le traitement du temps. En revanche, quand ce travail de double tâche intervient pendant le maintien et la recherche d'informations en mémoire de travail, la précision du jugement des durées est fortement impactée (Fortin, 1999 ; Fortin & Rousseau, 1998, Fortin & Massé, 1999 ; pour une revue Fortin & Breton, 1995 ; Fortin & Schweickert, 2016). D'ailleurs, les individus avec de meilleures capacités de mémoire de travail estiment plus précisément les durées dans la plupart des tâches temporelles (Zélanti & Droit-Volet, 2011 ; Droit-Volet, 2013). Cependant, il est difficile de dissocier les processus attentionnels des processus de mémoire de travail. Car, comme le suggère Baddeley (Baddeley 2000 ; Baddeley & Hitch, 1974) dans son modèle de mémoire de travail, ce type de mémoire fait aussi appel à des ressources attentionnelles. Quoi qu'il en soit, ceci suggère que l'attention est une source importante, mais pas unique, de variation dans les jugements du temps. Les processus de

maintien et de mise à jour de l'information en mémoire jouent aussi un rôle important. Enfin, une autre source de variation dans les jugements du temps se trouve dans le rythme de l'horloge interne, lui-même.

2.2. Les variations causées par les modifications du rythme de l'horloge

Notre perception du temps sophistiquée nous permet de nous adapter à notre environnement, elle est même un moyen d'assurer notre survie en cas de danger. Quand nous sommes menacés, nous devons rapidement nous enfuir, ou attaquer. Tout ceci implique une programmation rapide de gestes précis pour une réaction efficace à la menace. (Phelps & Ledoux, 2005). Droit-Volet (2016) et Droit-Volet et Meck (2007) ont montré que les personnes surestiment les durées en situation de menace tel qu'illustré sur la figure 4, quand ils reçoivent des chocs électriques par exemple, (Fayolle, Gil, & Droit-Volet, 2015), ou encore face à un visage en colère ou une image fortement activatrice comme celle d'un requin (pour des revues voir Effron et al., 2006; Droit-Volet, Fayolle, Lamotte, & Gil, 2013 ; Droit-Volet & Meck, 2007).

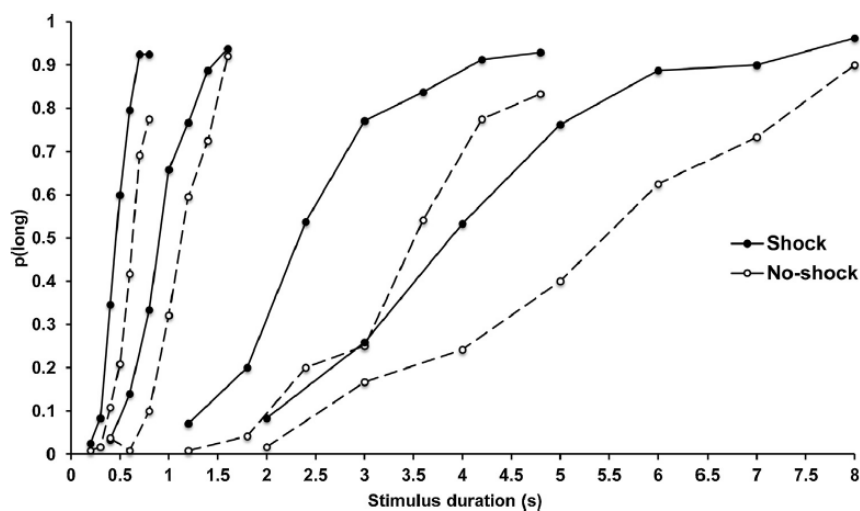


Figure 4 : Exemple de distorsion de la perception du temps en situation de menace (légers chocs électriques vs en situation neutre) lors de tâche de bissection temporelles avec des durées de références allant de 0,2 à 8 s (d'après Fayolle, Gil, & Droit-Volet, 2015).

Les résultats de ces études sur les émotions montrent que si notre mécanisme « d'horloge interne » accélère sous l'effet de la peur ou de la colère, cette accélération nous permet d'agir plus vite, induisant une forme de ralenti du temps externe. Comme nous le verrons lors des modèles « d'horloge interne », si « l'horloge » va plus vite, plus d'unités de temps sont décomptées et le temps est jugé plus long. Les autres émotions, faiblement activatrices ou positives, telles que la tristesse, la joie ou le dégoût, ne génèrent pas de distorsion temporelle. Gil et Droit-Volet (2012) en concluent que la préparation à l'action est la principale cause des distorsions temporelles sous l'effet des émotions. On retrouve ici le rôle déterminant de l'action dans le jugement des durées et ses variations. Cependant il est évident que l'on peut observer des phénomènes d'accélération de « l'horloge » tels que ceux observés dans les contextes émotionnels, en l'absence de préparation à l'action, en l'absence de réponse particulière demandée au sujet. Ceci a été mis en évidence dans les études utilisant des séquences rythmiques rapides de sons (« click ») ou de stimuli visuels (« flicker »). Comme on peut le voir sur la figure 5, la présence de clics induit une surestimation des durées.

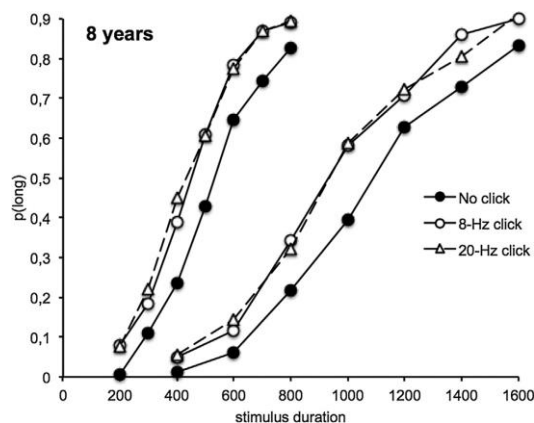


Figure 5 : Distorsion automatique du temps (décalage de la courbe de bissection temporelle vers la gauche) induite par la présence d'un click rapide (d'après Droit-Volet, 2017).

La plupart des chercheurs expliquent cette surestimation par l'accélération de « l'horloge » sous l'effet des clics (Jones, Allely & Wearden, 2011). Cependant, une récente étude suggère que les processus attentionnels soient également en cause (Droit-volet, 2017). En

effet, Droit-Volet (2017) a observé une corrélation entre l'ampleur de la distorsion sous l'effet de clicks (entre 8 et 20 ans) et les capacités en terme d'attention et de mémoire de travail. Plus les capacités sont élevées, plus les distorsions sont importantes. Une autre méthode plus convaincante, consiste à contrôler le niveau d'activation physiologique des individus au moyen de substances stimulantes, Maricq, Roberts et Church, (1991), et Maricq et Church (1983) ont par exemple mis en évidence des surestimations des durées en bissection en administrant chez le rat des méthamphetamine. Depuis ces résultats ont été répliqués chez l'animal, mais aussi chez l'homme, avec l'administration de substances modulant le taux de dopamine comparée à l'administration de placebo. (Rammsayer, 1989 ; Coull, Hwang, Leyton, & Dagher, 2012 ; Coull, Cheng & Meck, 2011) En effet, Coull et ses collègues (2012) montrent que l'administration de substances visant à faire baisser le taux de dopamine de la voie nigro-striatale perturbe la perception du temps en atténuant l'activité dans le putamen et l'aire motrice supplémentaire (SMA,) deux structures clés du système moteur. On retrouve ici l'implication de ce système moteur dans les processus physiologiques de distorsion du temps susceptibles d'impacter le fonctionnement de l'horloge interne en modifiant son rythme.

Ainsi notre perception du temps est précise, flexible et variable. Comme nous l'avons entrevu, plusieurs facteurs sont à l'origine de ces variations. Le contexte temporel, l'attention accordée au temps, les émotions ressenties. Depuis plusieurs décennies, les chercheurs se sont efforcés de produire des modèles intégrant l'ensemble de ces caractéristiques particulières du traitement temporel. Ces modèles qui ont connu de nombreuses évolutions sont essentiels à la compréhension des mécanismes à l'origine des conduites temporelles. C'est pourquoi je vais maintenant consacrer un chapitre à présenter ces modèles, ainsi qu'à détailler les résultats des récentes recherches en imagerie qui visent à faire le lien entre les conduites temporelles, les modèles de traitement du temps, et les structures cérébrales impliquées dans ces traitements.

Chapitre 2 : Les modèles du traitement temporel

Introduction

Il existe différents types de modèles psychologiques de traitement des durées (pour des revues, Droit-Volet & Wearden, 2003; Buhusi & Meck, 2005 ; Grondin, 2010; Matell & Meck, 2000; Matthew & Meck, 2016). Staddon et Higa (1999) ont par exemple proposé une théorie des temps multiples selon laquelle la durée est déterminée à partir de la force de la trace en mémoire. Cependant ces modèles sont relativement peu cités. En fait, seul les modèles envisageant un système propre au traitement du temps sont considérés avec enthousiasme par les chercheurs travaillant sur la perception du temps. En effet pour rendre compte de leurs résultats sur la perception du temps, en particulier la précision moyenne du jugement et la propriété du temps scalaire, les chercheurs semblent avoir besoin d'un système spécifique de décompte du temps semblable à une horloge. Parmi les modèles qui envisagent un tel système, que l'on appelle les modèles d'horloge interne, on trouve deux catégories de modèles : les modèles de type pacemaker-accumulateur et les modèles d'oscillateurs.

1. Les modèles d'horloge interne

1.1. Le modèle d'horloge interne de Treisman (1963)

L'idée d'un mécanisme spécifique au traitement de la durée n'est pas récente. Dès le début du 20^{ème} siècle, François (1927) et Hoagland, (1933) parlent d'une « horloge interne chimique ». Selon eux, les erreurs de jugements temporels seraient provoquées par les variations de cette horloge chimique sous l'effet, par exemple, de l'élévation de la température du corps. En l'occurrence, plus la température augmente, plus la durée est jugée courte (voir aussi Bell, 1965 ; Wearden, & Penton-Voak, 1995). Cependant c'est en 1963 que Michel Treisman de l'université d'Oxford propose un modèle élaboré d'horloge (Wearden, 2005) que

l'on peut voir sur la figure 6. Ce modèle repose sur l'idée qu'un mécanisme apparenté à un simple pacemaker donne la mesure du temps.

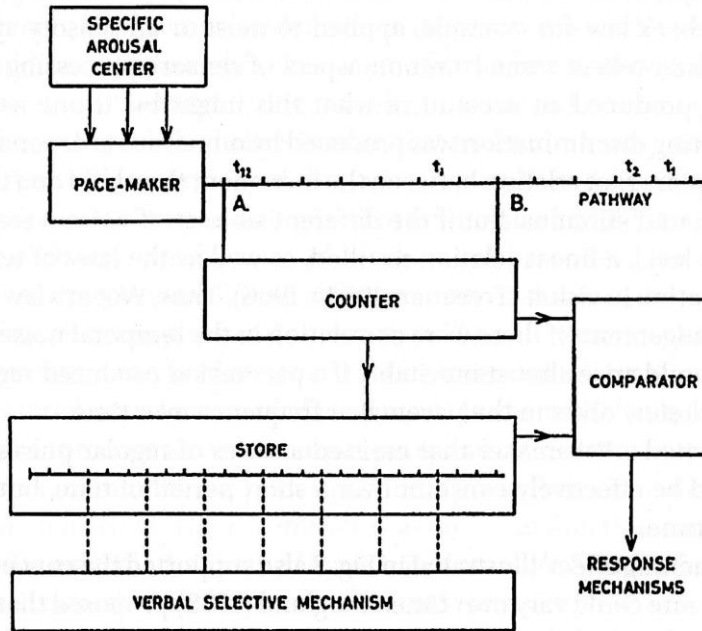


Figure 6 : Modèle « d'horloge interne » de Treisman et al. 1963.

Le modèle se compose donc d'un pacemaker qui émet des pulsations ou impulsions régulières. Ces impulsions constituent en quelque sorte la matière première du temps. Au pacemaker s'ajoute un compteur dont la fonction est de comptabiliser le nombre d'impulsions émises pendant un temps donné. Ainsi, plus il y a d'impulsions, et plus le temps est jugé long. L'existence de pacemakers cérébraux était déjà connue à l'époque de Treisman et rendait donc son idée plausible (Treisman, 2013). Son idée étant que la fréquence d'émission des impulsions du pacemaker peut varier avec l'état physiologique de l'individu comme le suggèrent les travaux de François (1927) et Haogland (1933). Treisman (1963) propose alors que le niveau d'arousal est responsable de la variation du rythme de l'horloge, et des distorsions dans nos jugements temporels. Avec ses collaborateurs il consacre un ensemble de travaux à cette question en mettant au point une méthode de variation du niveau d'éveil (1963) basée sur la

présentation d'un train de clicks à une fréquence élevée. Depuis, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, Droit-Volet (2017) a montré que les clicks, impliquant des processus attentionnels n'ont pas véritablement d'influence sur le niveau d'éveil. Cependant, les travaux sur les émotions (Droit-Volet, Fayolle, Lamotte & Gil, 2013; Gil & Droit-Volet, 2012 ; Droit-Volet & Meck, 2007) ou l'administration de substances stimulantes telle que la méthamphétamine chez l'animal (Maricq, Roberts & Church, 1981 ; Meck 1996 ; Buschi & Meck, 2002) confortent les résultats des travaux de Treisman sur les variations du rythme de « l'horloge interne » sous l'effet des variations de l'activation physiologique. En effet, ces travaux montrent que l'augmentation du niveau « d'arousal » se traduit effectivement par un allongement de la durée perçue. Ces résultats contribuent donc à valider l'idée selon laquelle une accélération du rythme de l'horloge induirait la production d'un plus grand nombre d'impulsions par unité de temps. Ainsi, comme le suggère Treisman (1963), des modifications physiologiques de l'activité cérébrale altèrent clairement notre évaluation subjective du temps, ce qui témoigne de l'existence d'un mécanisme interne de traitement du temps. Cependant, au milieu du siècle dernier, Treisman était déjà conscient que le traitement du temps ne se réduit pas à un simple décompte de pulsations. Il a alors ajouté à son système de pacemaker, des processus cognitifs, notamment de prise de décision. D'ailleurs, on qualifie ce modèle de modèle de traitement de l'information. Ce modèle a été repris et développé dans la théorie du temps scalaire.

1.2. La théorie de la propriété du temps scalaire (TPS).

La théorie du temps scalaire est actuellement la théorie la plus populaire, presque tous les articles sur la perception du temps y font référence. Treisman (1963) n'est cependant pas toujours cité, bien que ce soit lui qui ait eu l'idée d'un système de pacemaker à la base de la mesure du temps. Gibbon (1977) qui est plus cité a, en fait, repris son modèle et y a simplement

ajouté différentes sources de variabilité dans les jugements des durées. Selon Gibbon (1977), il n'y a pas un seul, mais une multitude de facteurs générant du bruit lors de l'évaluation de la durée. Plus précisément, il propose d'abord que les pulsations ne soient pas émises de manière régulière mais de manière aléatoire suivant une loi de Poisson. Ceci permet que le nombre total de pulsations émises demeure constant pour deux intervalles de même durée malgré quelques petites variations possibles. Autrement dit, il propose un taux de pulsation constant mais une distribution irrégulière des pulsations. Ainsi, plus l'intervalle est long, plus la part de bruit augmente. Cependant comme nous l'avons vu au chapitre précédent, si l'on normalise les intervalles, la variabilité demeure constante. C'est la propriété du temps scalaire (Gibbon, 1977, 1981, 1991, 1992 ; Gibbon, Church & Meck, 1984 ; Gibbon & Church, 1990). De plus, ce modèle est plus élaboré que celui de Treisman car Gibbon y ajoute un interrupteur. Cet interrupteur contrôle le début et la fin du traitement du temps et donc son stockage en mémoire. Il fonctionne comme un interrupteur électrique. Ainsi, la mesure du temps ne débute que lorsque l'interrupteur se ferme et se poursuit jusqu'à ce qu'il s'ouvre de nouveau. La fermeture de l'interrupteur ne surviendrait que lorsque le traitement du temps est pertinent dans une situation donnée. Le délai de fermeture et d'ouverture de l'interrupteur est considéré comme une autre source de variabilité. Dans la durée subjective, il faut donc tenir compte de la latence de fermeture (L_F) et d'ouverture (L_O). La durée estimée résulte donc de l'écart $D_o - L_F + L_O$.

Dès la fermeture de l'interrupteur, les pulsations émises sont envoyées vers un accumulateur. Dans ce modèle, l'accumulateur est différent d'un processus de mémoire de travail. Il s'agirait d'une forme d'accumulateur sensoriel qui perd rapidement l'information quand celle-ci n'est pas transmise à la mémoire de travail. Cependant, de plus en plus de chercheurs considèrent que cette fonction d'accumulation est assurée par la mémoire de travail (Taatgen & Van Rijn, 2011 ; Van Rijn, 2016). D'ailleurs, l'accumulation en elle-même sollicite des fonctions propres à la mémoire de travail (Baddeley & Hitch, 1974 ; Baddeley, 2000),

notamment le maintien des impulsions et leur mise à jour au fur et à mesure du passage du temps. Quoi qu'il en soit, pour Gibbon, lorsque le stockage est terminé, la durée codée par le nombre de pulsations, est stockée en mémoire. En effet, Gibbon, Church et Meck, (1984) intègrent « l'horloge interne » dans tout un système de traitement de l'information induisant aussi des processus de mémoire à court terme et à long terme et des processus décisionnels.

Enfin, dans leur modèle, Gibbon, Church et Meck (1984) reprennent l'idée d'une comparaison entre la durée stockée en mémoire de référence (mémoire à long terme) et la durée apprise, stockée en mémoire à court terme. Cette comparaison est à la base des processus de décision. Du fait de la variabilité d'un essai à l'autre dans le traitement du temps, on observe à ce niveau une part d'incertitude, et donc d'erreur, que le sujet prend en compte lors du jugement final du temps. Il adopte donc des règles de décision plus ou moins conservatrices selon le degré de confiance dans l'exactitude de la durée estimée (Lamotte, Droit-Volet & Izaute, 2017).

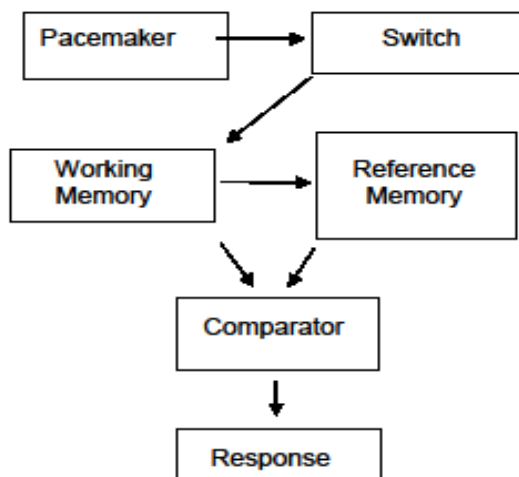


Figure 7 : Modèle de Gibbon, Church & Meck, 1989

1.3. Modèle attentionnel d'horloge interne

Zakay (1989), puis Zakay et Block (1996, 1998) reprennent ce modèle d'horloge en y ajoutant une composante attentionnelle qu'ils nomment « gate » ou porte attentionnelle. Ils proposent que l'ouverture de l'interrupteur soit déclenchée par le sentiment que la durée doit être évaluée. Mais, le jugement de la durée dépend de l'attention qu'on lui apporte. En l'absence d'attention, l'ouverture de cette porte attentionnelle n'est pas optimale et des pulsations sont perdues, ce qui génère un raccourcissement de la durée perçue. En effet, moins il y a d'impulsions accumulées et plus le temps est jugé court. Cette distorsion attentionnelle du temps, a été confirmée par de nombreuses études expérimentales, notamment grâce à l'utilisation du paradigme de double tâche que nous avons évoqué au chapitre précédent (Casini & Macar, 1997; Fortin, 1999; Fortin & Massé, 1999; Gautier & Droit- Volet, 2002 ; Macar, Grondin, & Casini, 1994, Burle et Casini, 2001, Hallez et Droit-Volet, 2017, chez l'enfant).

Toutefois, si la distorsion temporelle générée par une double tâche ne fait aucun doute, la présence d'un « Gate » est plus discutable et a été remise en cause par, Helga Lejeune (2000). En effet, l'interrupteur pourrait assurer lui-même ce rôle de « Gate » en fonctionnant selon un mode dit de clignotement (flickering). On assisterait alors à l'alternance de phases attentionnelles d'une tâche à l'autre. Cependant, les mesures précises du temps dont sont capables les nourrissons pourtant dépourvus de capacités attentionnelles, suggèrent que notre « horloge » peut aussi traiter le temps de façon automatique. En l'occurrence, les jeunes enfants de 5 ans réussissent les tâches implicites de traitement des durées aussi bien que les adultes, en dépit de leurs difficultés à diriger leur attention vers les caractéristiques temporelles du stimulus (Johnson, Burrowes, & Coull, 2015 ; Johnson, et al., 2016). Ceci est en désaccord avec cette idée que l'horloge interne est sous le contrôle exclusif de l'attention. Il semble que l'attention agisse à un niveau différent du traitement temporel. De plus, les études sur les tâches interférentes ont montré que les processus de mémoire de travail interviennent dans les

distorsions temporelles. Toutefois, comme nous l'avons dit, il est difficile de dissocier les effets relevant de l'attention de ceux relevant de la mémoire de travail. Aussi peut-on émettre l'hypothèse que la double tâche consommerait trop de ressources cognitives pour permettre un traitement efficace de l'intervalle en mémoire de travail perturbant peut-être le décompte du temps, mais aussi le traitement cognitif de l'intervalle nécessaire à toutes les tâches explicites. Ceci ne remet toutefois pas en cause le principe du modèle de pacemaker-accumulateur.

2. Les modèles d'oscillateurs neuronaux

Tout en conservant l'idée de pacemaker-accumulateur, les chercheurs ont toujours tenté d'expliquer d'une façon plus précise la variabilité observée lors des jugements temporels, mais aussi de rendre plausible les modèles d'horloge interne sur le plan neuronal. En effet, il n'existe pas dans le cerveau de pacemaker qui donnerait la mesure du temps. Dès 1978, Pöppel postule qu'il existe des neurones spécifiques au codage des intervalles de temps fonctionnant comme des oscillateurs, avec différentes périodes et phases permettant de coder le temps. Dès les années 90, Treisman et ses collaborateurs conçoivent le pacemaker sous la forme d'un oscillateur. Comme on peut le voir sur la figure 8, il s'agit alors d'un mécanisme périodique dont le calage et le décalage de phase au moment de l'apparition du stimulus pourraient générer de la variabilité en plus de celle causée par le changement du niveau d'arousal. Ils proposent également que l'écoute d'un rythme pourrait aider à calibrer l'oscillateur, ce qui expliquerait la reproduction temporelle plus précise des rythmes. Il est important de noter que cette conception oscillatoire de « l'horloge » pose les bases de la notion de mécanisme commun entre la perception des durées et la perception des séquences d'intervalles qui constituent les rythmes. Nous reviendrons sur cette idée importante dans le cadre de mes travaux de thèse sur la synchronisation à laquelle nous consacrerons un chapitre entier. Cependant pour continuer notre

présentation des modèles, nous allons maintenant voir comment cette idée d'oscillateur a été développée et déclinée au cours de ces dernières décennies.

Treisman et al. 1990

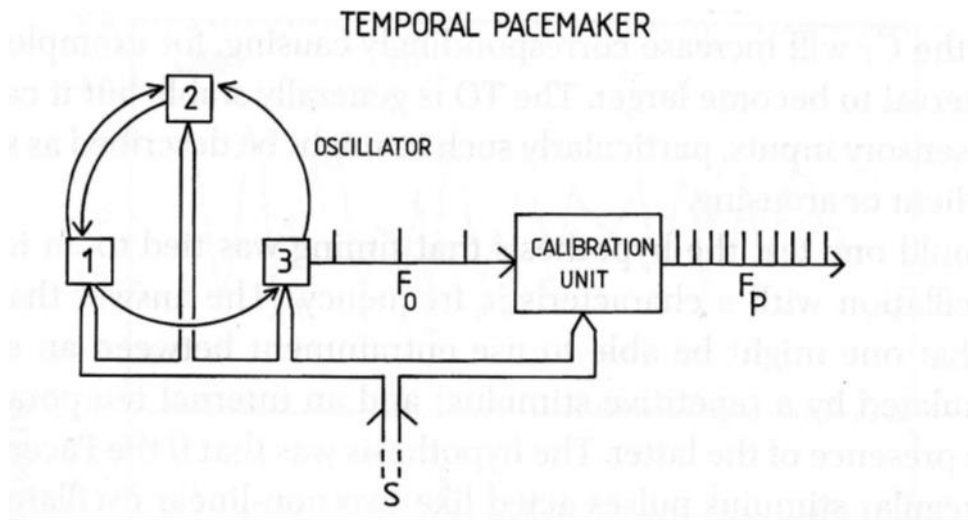


Figure 8 : modèle d'oscillateur de Treisman, 1990

2.1. Les modèles d'oscillateurs multiples

L'un des principaux reproches que les chercheurs font au modèle du traitement de l'information temporelle est que son fonctionnement ne permet de coder qu'un intervalle, qu'une durée à la fois. Il ne semble donc pas satisfaisant pour rendre compte des capacités des humains et des animaux à maintenir en mémoire différentes durées présentées de façon simultanée. Or, dans la vie quotidienne, nous sommes souvent confrontés à plusieurs événements de différentes durées et l'encodage de ces durées s'avère souvent nécessaire. Aussi, en 1990, Church et Broadbent proposent un modèle de perception du temps de type connexionniste, c'est-à-dire un modèle composé de plusieurs systèmes de codage du temps reliés entre eux et fonctionnant en parallèle. Dans ce modèle, présenté figure 9, le pacemaker unique est remplacé par une multitude d'oscillateurs neuronaux avec chacun leur période et leur phase propre. L'accumulateur est remplacé par une multitude d'indicateurs de statut reliés aux oscillateurs permettant de coder en temps réel l'état de chaque oscillateur. Enfin, l'ensemble de

ce pattern d'activité est intégré en mémoire sous la forme d'une matrice d'activation qui rend compte de l'activité globale de l'ensemble du système. Les auteurs postulent que ces oscillateurs, fonctionnant en continu, peuvent être remis à zéro lorsque l'on veut commencer à juger une durée. Le pattern d'activation obtenu en fin de durée est alors comparé avec les patterns d'activation des durées contenues en mémoire de référence.

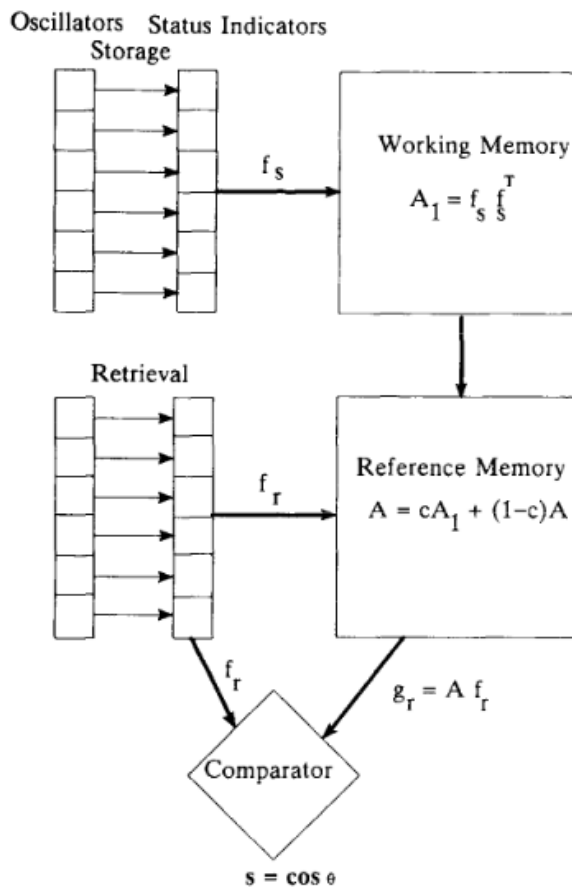


Figure 9 : Modèle des oscillateurs multiples de Church et Broadbent, 1990

A partir des travaux de Gallistel (1990), Church et Broadbent proposent un nombre de 11 oscillateurs pour coder le temps, de façon à obtenir des périodes d'oscillation couvrant une gamme de durées allant de quelques millisecondes à plusieurs heures, pour les rythmes circadiens. Ils proposent ainsi un système de codage du temps capable de percevoir l'ensemble

des durées pertinentes pour l'adaptation à notre environnement particulièrement riche. Ce modèle a ensuite été repris et affiné par Miall (1989, 1996) pour qui l'idée d'oscillateurs avec des périodes très variées paraît peu plausible du point de vue biologique. Il propose alors que les oscillateurs auraient en fait des périodes courtes et assez proches, mais avec des décalages de phases. De cette manière, les différents oscillateurs atteindraient leur pic d'activité de façon simultanée, de temps en temps seulement, produisant une élévation périodique de l'activité globale. C'est cette élévation périodique de l'activité qui constituerait l'équivalent biologique des pulsations du modèle du pacemaker-accumulateur. La variance serait alors générée par des décalages aléatoires de la période des oscillateurs. Ces modèles d'oscillateurs sont non seulement plus réalistes sur le plan biologique, mais ils permettent aussi de faire le lien entre perception du temps et activités rythmiques. En effet, les études sur le traitement des rythmes chez l'adulte (Large, 2000), et l'enfant (Drake et al., 2000) montrent que nous sommes capables non seulement de synchroniser nos mouvements avec un rythme externe, mais aussi de produire des sous composantes de ce rythme. Les humains sont en effet capables de décomposer un rythme en deux ou trois pour taper le demi temps avec précision, sans que cela ne soit guidé par le rythme externe, en d'autres termes de produire des harmoniques rythmiques (Large & Snyder, 2009). Sur la base de ces capacités observées chez l'homme, Large et Snyder (2009) proposent un modèle d'oscillateurs reposant sur des patterns d'activation-inhibition des neurones sensoriels (figure.10). Cette modulation par les neurones inhibiteurs puis activateurs génère une activité ondulatoire des groupes de neurones. Ainsi, l'activité augmente progressivement jusqu'à un point de basculement correspondant à l'activation des neurones inhibiteurs. L'activité diminue donc jusqu'au repos, puis se remet à augmenter, générant ainsi une ondulation continue avec une période et une phase. Cette onde constituerait l'état de fonctionnement de base des neurones et serait à l'origine du rythme interne.

Ces auteurs proposent ensuite le phénomène d'entraînement de la réponse des neurones sensoriels à un rythme externe par une onde synchronisée à celui-ci. Ceci amènerait une modification de la période, ou, si l'on veut, un « couplage » de la période interne avec celle du rythme externe, permettant ainsi la synchronisation. Toutefois, les deux oscillations ne seraient pas obligatoirement en phase ce qui générerait des phénomènes d'anticipation rythmiques. Enfin, cette oscillation produirait une résonance dans le réseau de neurones sous forme d'harmoniques rythmiques permettant la décomposition du rythme observé (Pour les modèles mathématiques détaillés se référer à Large et Snyder, 2009).

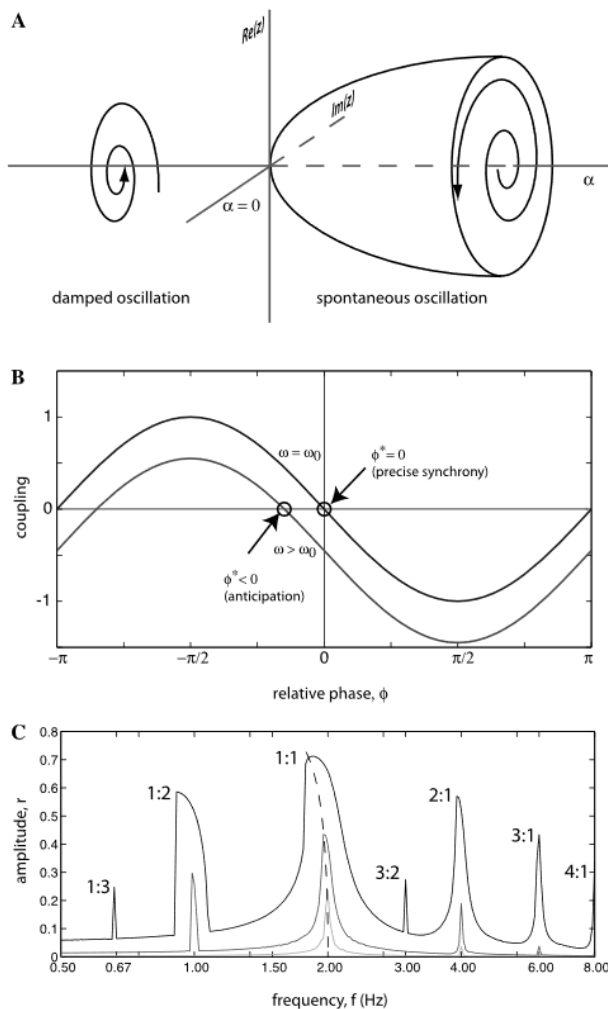


Figure 10 : fonctionnement des oscillateurs multiples, en haut oscillation spontanée de groupe de neurones, au centre couplage de cette oscillation avec le rythme externe, en légère anticipation de phase, en bas formation d'harmoniques rythmiques sein du réseau de neurones (d'après Large & Snyder, 2009).

2.2. Le modèle du « Striatal Beat Frequency » ou SBF

Parallèlement à la réflexion sur la manière dont les neurones pourraient coder le temps, restait à découvrir quelles structures étaient impliquées dans son codage. Certains chercheurs ont donc essayé de trouver dans le cerveau la trace de l'activité temporelle. Il aura fallu de très nombreuses études pour identifier avec précision la fréquence des ondes cérébrales responsables du codage temporel. Il s'avère que cela est variable selon les aires concernées et la tâche considérée (pour une revue détaillée voir Merchant & Bartolo, 2018). Par exemple, selon l'étude de Bartolo, Prado, et Merchant, (2014), l'entraînement des oscillateurs serait sous la dépendance des ondes bêta. Cette modulation ondulatoire de l'activité des neurones est supposée être le médiateur des modifications de période et de phase permettant la synchronisation des oscillations internes avec un stimulus externe, grâce à un couplage dynamique avec les aires sensorielles et motrices (Fujioka, Trainor, Large & Ross, 2012 ; Bartolo, Prado & Merchant 2014). Cela correspond à l'entraînement des oscillateurs mentionné par Large et Snyder (2009). Toutefois, se pose la question de l'intégration de ces oscillations en un message unique, en une information temporelle.

Des études ont mis en évidence les difficultés temporelles rencontrées par des patients atteints de la maladie de Parkinson présentant des anomalies dans le fonctionnement de la dopamine dans la voie nigro-striatale (Praamstra & Pope, 2007 ; Jones et al., 2008 ; Jones et al., 2011 ; Grahn & Brett, 2009). Praamstra et Pope (2007) ont montré par exemple que les jugements temporels implicites sont perturbés chez les parkinsoniens qui présentent une altération des noyaux de la base. De plus, des études ont montré que les rats avec des lésions du striatum sont incapables de discrimination temporelle précise dans les tâches de bissection (Meck, 2006). Ces résultats suggèrent donc un rôle critique du striatum dans l'intégration de l'information temporelle. Depuis, d'autres études ont confirmé l'activation du striatum dans les tâches de jugement temporel (Agostino, Cheng, Williams, West, & Meck, 2013; Mac Donald,

Cheng, & Meck, 2012 ; Matell et al., 2000 ; Coull, Cheng & Meck, 2011 ; Pfeuty et al., 2003 ; Schubotz et al., 2000 ; Jahanshahi et al., 2006). Aussi, Matell et Meck (2000, 2004) ont-ils proposé un nouveau modèle construit autour de ce rôle clef du striatum : le modèle SBF pour « Striatal Beat Frequency ». Le modèle est présenté figure 11.

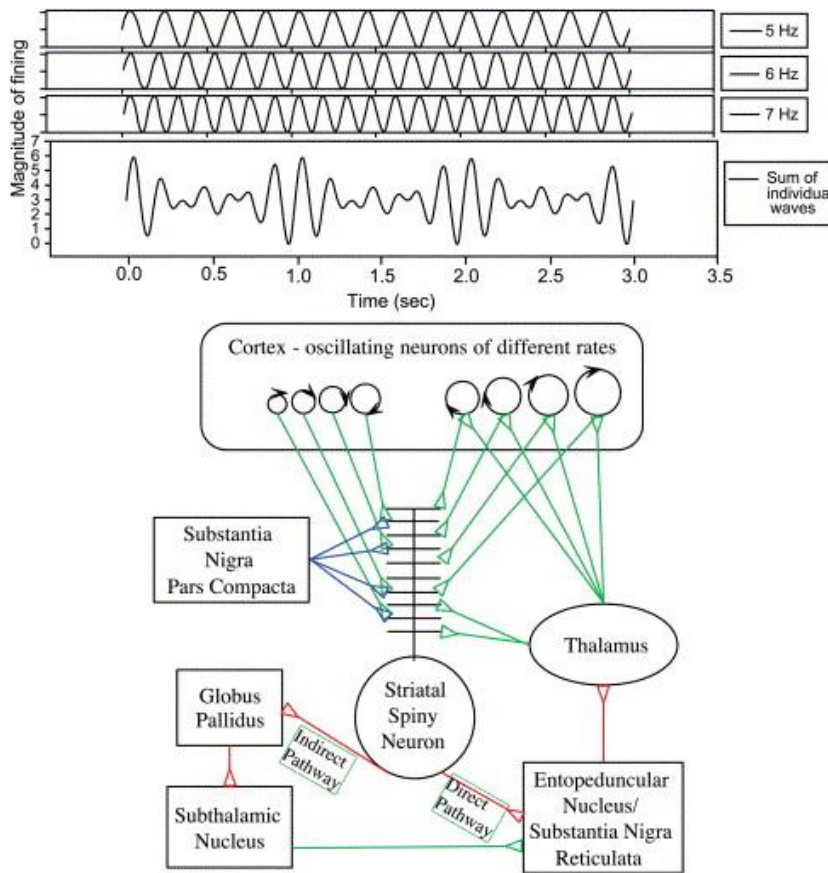


Figure 11 : modèle du Striatal beat Frequency de Matell et Meck, 2000

Selon ce modèle, le striatum joue un rôle clef parce qu'il est étroitement relié à la fois aux aires sensorielles et au cortex préfrontal par les boucles cortico-sous-corticales. Ses connexions avec de nombreuses structures cérébrales et sa physiologie particulière, permettent au striatum de détecter les patterns d'oscillations neuronales générés par les stimuli temporels. Le striatum agirait comme un « détecteur de coïncidence » entre les patterns d'activité neuronale des différentes structures permettant d'intégrer ces informations en un message cohérent, et de transférer ensuite ces ondulations vers les aires motrices afin d'intégrer la dimension temporelle

dans la programmation des gestes. Dans ce modèle, les neurones dopaminergiques permettent également le renforcement du pattern d'activation neuronale correspondant à l'intervalle appris et facilitent ainsi la reconnaissance et la reproduction de l'intervalle temporel (Malapani et al., 1998 ; Gerfen & Bolam, 2010 ; Soares et al., 2016°).

En conclusion, les données neurophysiologiques ont permis une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans le traitement de l'information temporelle et de concevoir des modèles plus proches de la réalité physiologique. Cependant, ils ne remettent pas en cause les prédictions comportementales des anciens modèles d'horloge interne car, quelle que soit la structure cérébrale impliquée, plus les durées sont longues, plus le temps est jugé long. De même, plus l'activation physiologique est élevée, plus le temps est surestimé. Par ailleurs, comme nous allons le voir plus en détails à propos des données d'imagerie cérébrale, ces observations ont permis de mettre en lumière l'implication de nombreuses aires cérébrales dans le traitement du temps, dont les aires motrices. On retrouve ici le rôle déterminant des aires motrices, bien que leur fonction exacte ne soit pas précisée.

Pour finir avec les modèles de perception du temps, je vais maintenant présenter les nouveaux modèles issus des neurosciences qui remettent en question le fait que le traitement du temps soit assuré par un système dédié bien localisé dans le cerveau.

2.3 Les modèles issus des neurosciences.

L'idée d'un traitement de l'information temporelle distribué dans l'encéphale a conduit certains auteurs à proposer que la perception du temps serait une propriété intrinsèque des réseaux de neurones et non pas une fonction sous la dépendance de structures spécifiques (Wiener & Kanai, 2016). D'après des recherches récentes, il semblerait que le codage d'un intervalle de temps prenne sa source dans les neurones corticaux. En effet, que l'on souhaite volontairement évaluer le temps ou non, le cortex répond de façon automatique à l'apparition

d'un stimulus permettant d'ancrer l'apparition du stimulus dans le temps, que l'attention soit consciemment dirigée vers le traitement temporel ou non. Ainsi, les chercheurs ont observé une augmentation linéaire de l'activité déclenchée par l'apparition de stimuli temporels dans différentes aires cérébrales dont la SMA, le cortex pariétal, le cortex préfrontal, et le cortex moteur (Janssen & Shadlen, 2005 ; Kim et al., 2013 ; Kononowicz & Penney, 2016; Kononowicz & Van Rijn, 2014 ; Macar & Vidal, 2003 ; Mita et al., 2009; Niki & Watanabe, 1979 ; Pfeuty, Ragot, & Pouthas, 2003a, 2003b ; Pouthas, 2008 ; Van Rijn et al., 2011). Cette augmentation linéaire de l'activité neuronale a été qualifiée de phénomène de « Ramping »² ou « climbing ». Elle correspondrait à une modulation de l'activité électrique des membranes cellulaires des neurones, conduisant à une plus forte activité synaptique (Pérez & Merchant, 2018), pour une revue, Paton et Buonomano, 2018). Cette augmentation de l'activité ou « ramping » démarrant avec l'apparition du stimulus et s'arrêtant avec lui, se ferait de façon linéaire à mesure de l'écoulement de l'intervalle temporel et permettrait ainsi un codage physiologique du temps. De cette façon, l'activité de ramping pourrait être considéré comme l'expression physiologique du processus d'accumulation des pulsations décrit dans les modèles de pacemaker-accumulateurs (Gibbon 1977).

Toutefois, si cette conception semble séduisante pour rendre compte de la perception linéaire des durées ou intervalles de temps isolés, elle trouve sa limite lorsqu'il est question d'expliquer les processus rythmiques qui semblent davantage reposer sur des mécanismes de nature ondulatoires (pour une revue voir Paton & Buonomano, 2018). Ceci a conduit certains auteurs à proposer une approche différente du codage physiologique du temps, une perception du temps sans horloge : les modèles de « population clock » ou de codage temporel par les

² Et de cette activité de « ramping » résulte une grande onde lente négative observée par Walter (1964 et Weinberg, Grey Walter, Cooper, and Aldridge (1974)). Cet index est généralement appelé CNV (contingent negative variation

réseaux de neurones (Buonomano & Kamarkar, 2002 ; Buonomano & Laje, 2010 ; Mauk & Buonomano, 2004 ; Karmakar & Buonomano, 2007 ; Bueti et al., 2012). Dans ces modèles, l'idée est qu'à l'apparition d'un stimulus, notre cerveau, via l'activations spécifique et dynamique de certains neurones au sein du réseau coderait en même temps plusieurs caractéristiques du stimulus, tels que la forme, la dimension, le mouvement et bien sûr la durée. Ce codage complexe serait possible grâce à deux propriétés des réseaux de neurones.

Tout d'abord, les neurones corticaux n'ont pas une activité synchronisée. Ils ne déchargent ni à la même fréquence, ni avec les mêmes phases, ceci conduit à un pattern global de l'activité neuronale évoluant dans le temps. Comme le suggère la figure 12, chaque instant donné est codé par un pattern spécifique d'activation neuronale notamment au niveau du cortex préfrontal (Buonomano & Maass, 2009 ; Buonomano & Merzenich, 1995).

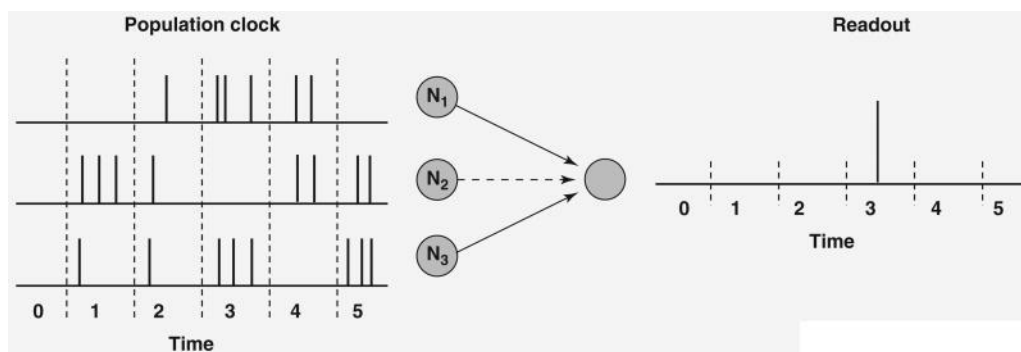


Figure 12 : Codage du temps au seins d'un réseau de neurones grâce à l'activité propre de chaque cellule en fonction du temps, à gauche, qui induit une activité globale du réseau, à droite, variant en permanence et codant ainsi le temps, (d'après Buonomano & Laje, 2011)

Ensuite, à cette variation de l'activité globale du réseau de neurones, s'ajoute une notion de trajectoires neuronales. Ainsi, un même intervalle serait toujours codé par la même trajectoire d'activation à travers le réseau. Autrement dit pour un stimulus donné, certains neurones seulement s'activeraient de façon successive, toujours de la même manière, créant un codage spatial dynamique au sein du réseau neuronal qui serait non seulement spécifique à l'intervalle, mais aussi à un stimulus bien particulier. Cette trajectoire pourrait ensuite être répétée dans le cas de stimuli rythmiques. Au final, l'information temporelle circulerait au sein

des réseaux de neurones et serait ensuite susceptible d'être communiquée aux aires cérébrales voisines recrutées en fonction du type de traitement requis.

Goudar et Buonomano (2018) ont montré que ces trajectoires neuronales (figure 13), non seulement sont constantes si l'on répète un stimulus temporel moteur ou auditif, mais deviennent de plus en plus précises avec la répétition du stimulus. Avec de l'entraînement, la discrimination s'améliore du point de vue comportemental au fur à mesure des essais. Ainsi, la conception est d'autant plus intéressante qu'elle permet d'expliquer les phénomènes d'apprentissage sur les performances temporelles au fur et à mesure des essais.

Toutefois, la théorie du « ramping » et celle de la « population clock », même si elles semblent au premier abord assez différentes ne sont pas mutuellement exclusives. En effet, la théorie de « population clock » ne rend pas bien compte de la perception linéaire du temps, aussi, Paton et Buonomano (2018) suggèrent que ces deux approches puissent être combinées en envisageant que le codage sous la forme de trajectoires d'activation neuronale soit sous la dépendance de l'activité de ramping.

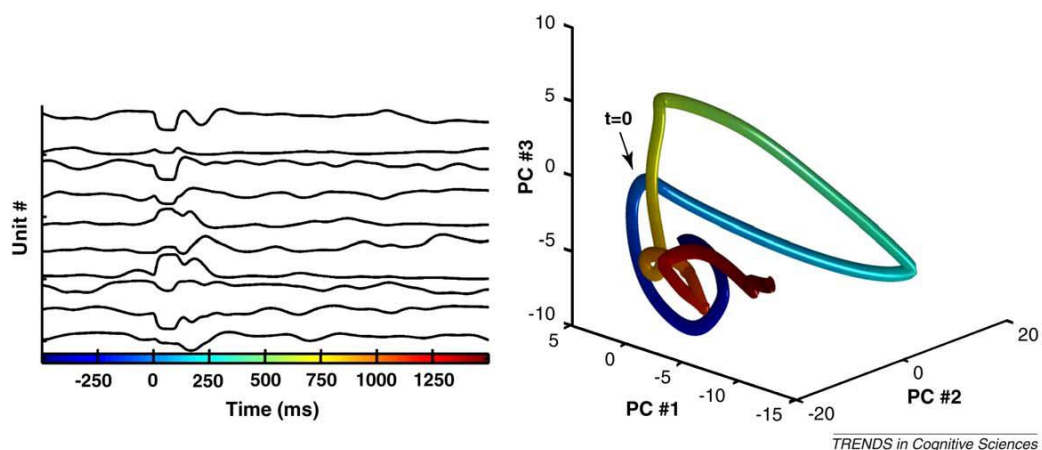


Figure 13 : L'activité ondulatoire dans le réseau de neurones (à gauche) est également distribuée de façon spatiale au sein du réseau formant des « trajectoires neuronales » codant la durée des événements (Buonomano & Laje, 2011)

De plus, Goudar et Buonomano (2018) ont montré que ces trajectoires neuronales (figure 13), non seulement sont constantes si l'on répète un stimulus temporel moteur ou auditif, mais

deviennent de plus en plus précises avec la répétition du stimulus. Avec de l'entraînement, la discrimination s'améliore du point de vue comportemental au fur à mesure des essais. Cette conception est d'autant plus intéressante qu'elle permet d'expliquer les phénomènes d'apprentissage sur les performances temporelles au fur et à mesure des essais.

Ces modèles de « population clock » et de SBF sont intéressants car ils ont permis de mieux comprendre les mécanismes biologiques à l'œuvre lors du traitement des durées et ce avec une précision et une finesse remarquable. Toutefois, ce type d'approche neurophysiologique pose un certain nombre de problèmes. Tout d'abord, ces modèles permettent d'envisager le traitement des durées courtes de quelques centaines de millisecondes, mais non des durées longues de plusieurs secondes. Le mécanisme décrit est insuffisant pour envisager des processus de maintien et de mise à jour du flux de l'information temporelle en mémoire dans le cas des durées longues. La compréhension de ce qui se passe au niveau d'un neurone ne nous renseigne donc que peu sur les différents processus impliqués dans le traitement de l'ensemble des durées, quelle que soit la gamme temporelle envisagée. En effet, en dépit des grandes avancées dans le domaine des neurosciences, il reste difficile de faire un lien entre les activations des neurones et les traitements cognitifs du temps, impliquant des processus attentionnels, mnésiques et décisionnels. De plus, il est impossible de comprendre à partir de la simple activité des groupes de neurones l'émergence, relativement au contexte, d'une pensée ou d'un temps explicite, qui va impacter le jugement du temps, impacter un éventuel traitement automatique du temps. C'est la raison pour laquelle les modèles plus cognitifs de traitement de l'information temporelle nous sont encore indispensables. En outre, ces modèles cognitifs nous permettent de formuler des hypothèses claires que l'on peut tester au niveau comportemental. Cette vérification des hypothèses sur le plan comportemental demeure indispensable à l'interprétation de ce qui est observé en imagerie. Comme le souligne Jennifer Coull (2014), les études en imagerie nécessitent un contrôle très précis des traitements

cognitifs lors des tâches pour éviter des erreurs d'interprétation. On peut par exemple observer l'activation d'une aire dans une tâche temporelle qui résulte de la complexité ou de la nature de la tâche et non du traitement temporel proprement dit. C'est donc dans la confrontation entre les modèles, et dans l'interaction constante entre les différentes approches, analyse du comportement et imagerie cérébrale, que nous avons le plus de chance de faire avancer notre connaissance sur le jugement du temps. Aussi nous allons maintenant présenter les résultats d'imagerie concernant les différentes structures cérébrales impliquées dans le traitement du temps par rapport à la tâche étudiée et aux comportements attendus. Cette analyse a pour but de nous donner des informations utiles sur les types des processus mis en jeu.

3. Pas de système dédié au traitement du temps, mais plusieurs structures qui exercent des rôles différents.

Bien que les chercheurs utilisent toujours le terme d'horloge interne, l'idée d'une d'horloge dédiée bien localisée dans le cerveau n'est plus défendue par la plupart des chercheurs (Ivry & Schlerf 2008; Allman, Teki, Griffiths & Meck, 2014 ; Muller & Nobre, 2014). La plupart est convaincu que le traitement du temps est effectué par des processus distribués dans l'encéphale variant en fonction de la tâche (Buonomano & Maass, 2009). Les aires cérébrales impliquées dans les traitements temporels sont présentées figure 14. On trouve le cortex préfrontal dorsolatéral, l'aire motrice supplémentaire (SMA) et la pré-SMA, le cortex pariétal et le cortex temporal, le cortex occipital, les ganglions de la base, le thalamus, l'insula et le cervelet (Grahn, 2012, pour une revue Voir Coull, Cheng & Meck, 2011 et Kotz et al., 2016) Ces dernières années, les chercheurs ont donc eut le souci d'essayer de mieux comprendre le rôle de chacune de ces structures dans les traitements temporels, et notamment des aires cérébrales motrices qui nous intéressent plus particulièrement dans le cadre de ce travail de thèse.

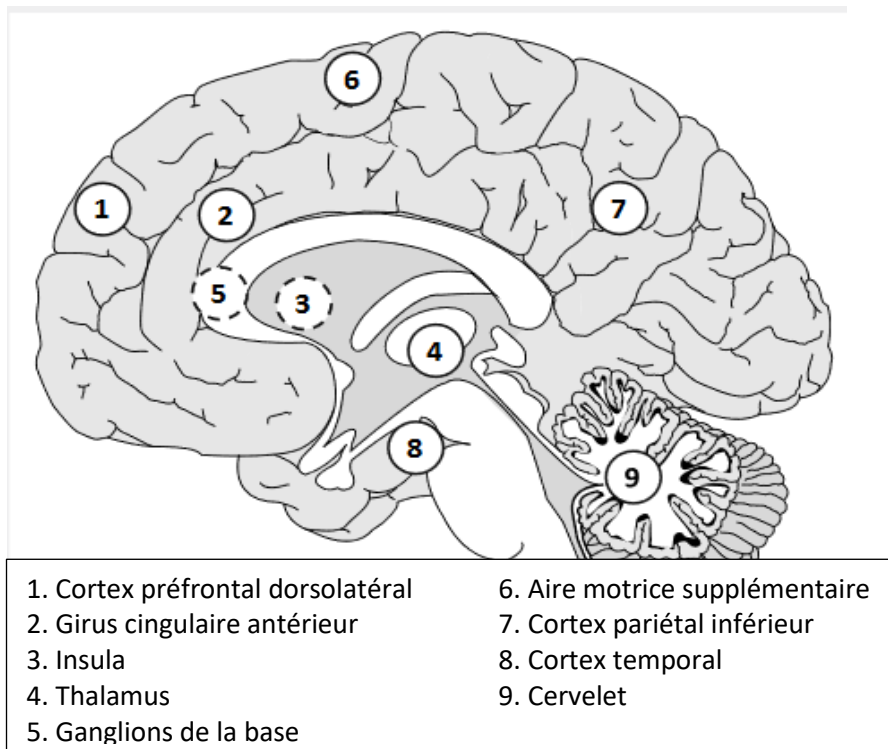


Figure 14 : Structures cérébrales de la perception du temps (d'après Kötz et al., 2018)

3.1 les structures corticales

Les aires sensorielles

Au niveau cortical, les aires sensorielles auditives et visuelles permettent un premier codage du stimulus rythmique (Cirelli et al., 2014 ; Kötz et al., 2018 ; Chen, Penhune & Zatorre, 2008a, 2009) et sont activées selon la modalité sensorielle de présentation du stimulus, il y a toutefois un débat sur un traitement modal ou amodal du temps (Zélanti & Droit-Volet, 2012). En utilisant des tâches interférentes dans l'une ou l'autre modalité, certains chercheurs ont supposé que le traitement de la durée relevait d'un traitement amodal au niveau de l'administrateur central de la mémoire de travail. Quoiqu'il en soit, il n'y a pas de doute que selon la modalité de présentation de la durée on trouve l'activation d'aires cérébrales différentes.

Le cortex préfrontal dorsolatéral droit

L'activation du cortex préfrontal dorsolatéral droit est systématiquement mise en évidence dans les études d'imagerie cérébrale sur la perception du temps (Wiener et al., 2010 ; Coull et al., 2008). Son rôle est cependant discuté. Récemment, des chercheurs suggèrent que son rôle est avant tout au niveau décisionnel. Il serait impliqué dans la décision de porter attention au temps qui passe et dans le contrôle du comportement temporel (Kotz et al., 2018). Dans une étude chez le rat, Buschi et al. (2018) ont altéré le cortex préfrontal médian avec des injections de gaba A, récepteur agoniste du muscimol. Ils ont alors montré que l'altération du fonctionnement du cortex altérait la variabilité mais pas la précision conservant la propriété du temps scalaire. Aussi le rôle du cortex préfrontal dans le jugement du temps relèverait d'un fonctionnement lié à la mémoire de travail ou à l'attention lors des tâches temporelles (Lewis & Miall, 2006 ; Coull et al., 2015). L'activation du cortex préfrontal serait ainsi responsable des aspects exécutifs du traitement des durées (Zatorre, Chen, & Penhune, 2007). Il permet tout d'abord l'allocation volontaire de l'attention vers la tâche, ainsi que la focalisation vers les caractéristiques temporelles des stimuli. Il permet ensuite le maintien des intervalles en mémoire de travail et leur récupération. Selon Laje et Buonomano (2013) Le cortex préfrontal serait capable par une modulation de son activité de maintenir « l'entraînement » produit par un rythme externe après son arrêt. Il semble aussi que lors de la production d'intervalles répétés, le cortex préfrontal gère l'initiation de l'implémentation de la séquence rythmique dans les aires motrices (Grahn & Rowe, 2009 ; Grahn & Brett, 2007).

Tout ceci explique que les jeunes enfants dont le cortex préfrontal n'est pas assez mature soient très variables dans leur estimation du temps (Droit-Volet, 2013). Les travaux récents sur le développement des jugements temporels montrent en effet le rôle majeur du développement des compétences d'attention et de mémoire de travail dans le développement des conduites de

jugements temporels (Droit-Volet & Zélanti, 2013a ; Droit-Volet, Zélanti & Wearden, 2015 ; Hallez & Droit-Volet, 2017, Droit-Volet, 2017).

Ainsi, de par sa structure, mais aussi ses connexions étroites avec les autres aires cérébrales (Baker, 2007), le cortex préfrontal permet d'intégrer l'ensemble des informations temporelles accessibles à la conscience, au système cognitif contrôlé. Il joue ainsi certainement un rôle prépondérant dans la formation des représentations temporelles et la construction du concept de temps. De façon intéressante, lorsque l'on examine le développement de cette structure ainsi que des boucles cortico-sous corticales, il apparaît que cette structure et ses connexions connaissent des étapes de maturation importantes aux âges de 5 ans et de 8 ans (Rubia, 2000). C'est pour cette raison que dans mes recherches de thèse j'ai systématiquement utilisé ces deux groupes d'âge en comparaison à un groupe d'âge adulte. En effet en utilisant ces groupes d'âge, on peut voir ce qui change du point de vu des conduites temporelles avec les changements sur le plan des capacités d'attention et de mémoire liés à la maturation du cortex préfrontal (Cowan, 2016). D'ailleurs, j'ai évalué ces capacités d'attention et de mémoire de travail avec différents tests neuropsychologiques.

Le cortex pariétal inférieur et le gyrus cingulaire antérieur

Comme le cortex préfrontal, le cortex pariétal inférieur et le gyrus cingulaire antérieur jouent un rôle dans l'attention-concentration accordée au temps. Ces deux structures sont impliquées dans l'allocation et le maintien de l'attention vers les caractéristiques saillantes du stimulus. Ces deux régions corticales assureraient la stabilisation des processus attentionnels de nature « bottom-up », autrement dit l'attention dirigée vers les caractéristiques temporelles du stimulus qui sont intégrées de façon automatique comme pour les séquences rythmiques (Buschman & Miller, 2007). Le cortex pariétal, comme le cortex préfrontal, serait donc impliqué dans les traitements des durées (Wiener et al., 2012 ; Jazayeri & Shadlen, 2015 ;

Janssen & Shadlen, 2005). Toutefois, même si ce n'est pas l'objet de ma thèse, il est important de noter qu'il existe tout un pan de la littérature qui suggère que le cortex pariétal, plus précisément le IPS (intraparietal sulcus) serait impliqué dans le traitement de toutes les magnitudes (espace, nombres) dont le temps (Bueti et Walsh, 2009). Cependant, dans cette thèse, nous avons pris le parti de ne pas présenter ces travaux, même si le rôle de la motricité peut être important pour le traitement de toutes les magnitudes et pas seulement le temps.

L'insula

Certains auteurs, notamment Marc Wittmann, ont mis en évidence l'activation de l'insula lors des jugements temporels. Cependant ces résultats n'ont pas été répliqués dans toutes les études d'imagerie cérébrale. Le rôle de l'insula dans la perception des durées n'est en fait pas clair. Elle serait impliquée dans la régulation temporelle de l'action, plus particulièrement les phénomènes liés à l'impulsivité temporelle et à la récompense. Marc Wittmann Lui attribue aussi un rôle dans la prise de conscience de l'état interne, ce qui l'a conduit à proposer une théorie du temps incarné (Time embodiment) (Wittmann 2013). Certaines études ont mis en avant une corrélation entre l'activation de l'insula et des difficultés d'inhibition de réponse lors de tâches d'attente temporelle (Wittman, 2010). Toutefois, il existe peu d'études mettant en avant ce rôle de l'insula dans des tâches temporelles. Peut être cette activation est-elle non spécifique du traitement du temps et davantage reliée à des problématique d'inhibition motrice. Quoi qu'il en soit, la réalisation d'autres études est donc nécessaire pour comprendre le rôle exact de l'insula dans les jugements temporels.

L'aire motrice supplémentaire

Pendant de nombreuses années, l'aire motrice supplémentaire (SMA) a été considérée comme une aire exclusivement motrice. Toutefois, des études en imagerie ont montré de façon

consistante une activation de la SMA lors des tâches temporelles motrices, mais aussi, des tâches de perception du temps sans réponse motrice (Wiener, Turkeltaub & Coslett, 2010 ; Schwartze et al., 2012 ; Coull, Chen & Meck, 2011 ; Coull, Vidal & Burle, 2016). Une étude de Coull et de ses collaborateurs (2015) a montré que la nature de l'activation de la SMA diffère entre une tâche de perception non temporelle, par exemple une tâche essentiellement spatiale, et une tâche temporelle. Cela suggère un rôle naturel de la SMA dans le traitement de l'information temporelle différent de son rôle dans les processus généraux de perception. Par ailleurs, plusieurs études neurophysiologiques ont permis d'observer l'activité de ramping, en réponse aux stimuli temporels, au niveau de la SMA et de la prèSMA, débutant avec l'intervalle à évaluer et se terminant avec lui (pour une revue Kononowicz, Van Rijn, & Meck, 2017). Plusieurs auteurs suggèrent même que le ramping pourrait être généré au niveau de la SMA lors du codage d'un intervalle (Gómez, Marco, & Grau, 2003; Macar et al., 1999; Mita et al., 2009 ; Mento, Tarantino, Sarlo, Bisiacchi, & Silvia, 2013).

Cette activité de ramping au niveau de la SMA a conduit les chercheurs à penser que la SMA jouerait le rôle de l'accumulateur décrit dans les modèles d'horloge interne (Coull et al., 2008 ; Macar, Vidal, & Casini, 1999; Pfeuty, Ragot, & Pouthas, 2003b). Des études plus récentes ont permis d'affiner ce point de vue. En effet, dans le cas d'une durée apprise préalablement, l'activité de ramping qui démarre avec une nouvelle présentation de cette durée n'augmente pas de façon infinie en s'arrêtant à la fin de la durée, mais atteint rapidement un plateau dès que la durée apprise est écoulée. De plus, la pente de l'activité de ramping varie avec la durée mémorisée (Merchant et al, 2011). Comme l'ont observé Nachev, Kennard et Husain (2008), il semble ainsi que la SMA joue un rôle spécifique dans la reconnaissance d'une durée d'origine externe, déjà encodée, en produisant un pattern susceptible d'identifier la fin de celle-ci. La variabilité que l'on observe dans le jugement des durées serait également en lien avec la phase des oscillateurs de la SMA au moment de l'apparition du stimulus, générant un

bruit d'autant plus grand que les oscillations sont en décalage de phases avec l'onde générée par l'apparition du stimulus (Kononowicz & Van Rijn, 2014 ; Bartolo, Prado, & Merchant, 2014; Fujioka et al., 2012, 2015).

Enfin, bien que le rôle de la SMA ne se cantonne pas à un fonctionnement moteur, la SMA est particulièrement impliquée dans les activités temporelles motrices séquentielles (pour une revue voir Tajn 2001). Comme le cortex préfrontal, la SMA semblerait capable de maintenir par elle-même une activité rythmique en l'absence de tout stimulus externe (Buonomano & Laje, 2011). Elle est donc impliquée dans les mouvements temporels programmés à partir d'un rythme interne, tel que le tempo moteur spontané que nous allons étudier. De plus, la SMA joue un rôle d'inhibiteur de la réponse motrice empêchant ainsi les mouvements inadaptés à la réalisation des buts de l'individu ; lors, par exemple, des tâches de « go no go ». Comme le suggèrent Coull, Vidal et Burle (2016), elle permet ainsi le déclenchement de la réponse motrice exactement au moment souhaité en inhibant l'action jusque-là. La SMA est donc impliquée dans l'aspect temporel du geste. Mais, si une telle régulation temporelle du geste par la SMA est possible, c'est parce que cette structure, que l'on pensait purement motrice, permet de prédire avec précision l'écoulement d'une durée grâce à la modulation de son activité cellulaire en fonction du temps (Wiener et al., 2011; Schwartze, Rothermich, & Kötz, 2012).

3.2. Les noyaux de la base

Comme nous l'avons dit en évoquant le modèle SBF de Matell et Meck (2000), le rôle central du striatum dans la production et la perception des durées ne fait plus de doute (Coull et al., 2008 ; Dalla & Meck, 1993 ; Matell et al., 2000 ; Matell & Meck, 2004 ; Grahn & Rowe, 2009). Nous ne reviendrons donc pas sur son rôle important dans le traitement du temps. Nous évoquerons seulement le fait que l'une des raisons qui confèrent à cette structure un rôle central dans la perception du temps, c'est que son activité est directement modulée par la transmission

de dopamine en provenance des neurones de la substance noire. Ainsi, le striatum est très certainement la structure qui repère la pertinence du traitement du temps et fait le relais entre un état physiologique interne (état motivationnel, état d'éveil) et les différents patterns temporels correspondant à la durée, d'un stimulus, d'un événement. Ces structures sous corticales qui sont également impliquées dans la motricité permettent aussi de par leurs connexions avec les motoneurones de la moelle une modulation de la dynamique temporelle du geste (Harrington, & Jahanshahi, 2016). C'est ce que suggèrent les travaux de Droit-Volet et ses collaborateurs (Gil & Droit-Volet, 2012 ; Fayolle, Gil, & Droit-Volet, 2015) dont nous avons parlé concernant l'effet des émotions dans le cas des situations de menace qui nécessitent une action rapide, automatique. Par ailleurs, comme illustré sur la figure 11, (p 27) une fois intégrée dans le striatum, l'information temporelle fait relais au niveau du thalamus, avant de retourner vers le cortex ou le cervelet pour la calibration des gestes plus volontaires et/ou la prise de conscience de la durée. Ainsi le traitement temporel est assuré par une boucle Cortico-Striato-thalamique.

3.3 Le cervelet

Tout comme pour le striatum, différentes recherches ont montré l'implication du cervelet dans les activités temporelles, notamment celles impliquant des intervalles temporels courts, (<1s). Ivry et Keel (1989) ont d'ailleurs plaidé en faveur de son rôle critique pour les jugements des durées courtes. Des études plus récentes ont montré que le cervelet ne peut maintenir par lui-même une activité oscillatoire rythmique. Il ne peut donc pas à lui seul générer des mouvements temporels autorégulés. En revanche, il a la capacité d'intégrer des intervalles de temps courts dans la programmation fine du geste à un instant précis (Ivry & Schlerf, 2008). Les études avec des patients présentant des lésions du cervelet sont en accord avec cette idée (Ivry et Spencer, 2004 ; Schlerf, Spencer, Zelaznik, & Ivry, 2007). En effet, les patients

présentant des lésions du cervelet sont non seulement en difficulté pour coordonner leurs mouvements, (McNaughton et al., 2004), mais aussi pour produire avec précision un mouvement spécifique dans un temps donné, qu'il s'agisse d'un mouvement isolé (Spencer, Zelaznik, Diedrichsen, & Ivry, 2003) ou d'une séquence rythmique (Timmann et al., 1999 ; Schlerf et al., 2007). Des études ont montré que les enfants souffrant de médulloblastomes conservent leur aptitude de jugement temporel dans une tâche de discrimination de rythmes, (Provasi et al., 2014) et de durées (Droit-Volet et al., 2013) Cependant, lors de la reproduction de rythmes ou de durées, ils font preuve d'une plus grande variabilité dans leurs frappes que les sujets sains. Le cervelet serait donc la structure spécialisée dans le calibrage temporel du geste jouant un rôle crucial pour la coordination sensori-motrice. Cependant, la structure du cervelet est complexe, On parle d'un deuxième cerveau. Des travaux suggèrent que la partie médiane du cervelet, incluant le vermi, soit plus impliquée dans l'exécution motrice alors que la partie latérale serait plus impliquée dans le « timing » en soi (Malapani, Dubois, Rancurel, & Gibbon, 1998 ; Ivry et Keele, 1989 ; Fierro et al, 2007 ; Koch et al., 2007). Le cervelet serait donc aussi doté d'une horloge interne dévolue au traitement des intervalles courts (Ivry et Keele, 1989, Ivry, 1996).

Conclusion

En conclusion, les chercheurs utilisent toujours l'idée d'une « horloge interne » pour rendre compte des jugements temporels. Cependant, il ne s'agit que d'une métaphore. Ils sont tous conscients de l'absence d'un tel système dans le cerveau et proposent des modèles « d'horloge interne » où le temps est codé au moyen de multiples oscillateurs distribués dans le cerveau. Dans un article récent, Merchant et Yarrow (2016) résument le point de vue actuel de la plupart des chercheurs. L'information temporelle circule dans les différentes aires cérébrales. Les oscillations apparaîtraient au niveau des zones sensorielles sollicitées par l'apparition du

stimulus dont la durée doit être estimée. Ensuite, l'information serait communiquée au cortex préfrontal étroitement relié à la SMA et aux noyaux de la base permettant une intégration de l'information temporelle par la modification de l'activité des neurones à la base du codage du temps. Cette information ainsi codée serait ensuite transmise aux aires spécialisées dans le traitement requis selon la tâche, ainsi que dans les zones motrices permettant de déclencher la réponse. Ainsi, comme le relèvent Merchant et Yarrow (2016), notre connaissance du traitement du temps par le cerveau s'améliore. Toutefois, ces connaissances du fonctionnement du cerveau ne permettent pas de rendre compte de la complexité du traitement de l'information temporelle qui implique de nombreuses opérations complexes. De plus, les modèles ont été conçus à partir d'observations réalisées auprès d'adultes. Ils nous renseignent donc peu sur le développement des compétences du jugement temporel et de ses variations selon la nature de la tâche, s'il s'agit d'une tâche de synchronisation, ou d'estimation des durées. En effet, selon ces tâches et les processus de traitement, on peut observer des trajectoires de développement différentes comme l'on montré Droit-Volet et Coull (2016) pour le jugement explicite et implicite du temps. Les modèles neuronaux ne nous renseignent pas non plus sur le rôle de la motricité et des aires motrices dans les différentes formes de jugements temporels. Or, étudier des enfants d'âges différents avec différents niveaux de capacités cognitives et différentes capacités sensorimotrices permet d'appréhender cette question. Pour aborder cette question du rôle de la motricité dans le traitement du temps nous avons donc décidé d'élucider l'évolution des conduites temporelles chez des enfants d'âges différents, dans une tâche de synchronisation, où la maturité joue un rôle important, et dans une tâche de jugement de durées. Nous nous attarderons davantage sur l'activité de synchronisation en lui consacrant un chapitre entier, car nous avons essentiellement utilisé cette tâche. Cependant, avant de présenter notre chapitre sur la synchronisation, et son développement, nous allons rapidement examiner les travaux sur le développement du jugement des durées.

Chapitre 3 : Le développement du jugement des durées.

1. Les compétences temporelles du bébé

On pourrait penser que les bébés sont incapables d'estimer correctement les durées étant trop variables dans leurs traitements temporels. Il semble qu'ils ne portent pas attention au temps qui passe car ils sont trop distraits par leurs émotions et toutes les stimulations que leur environnement leur procure. Toutefois, cela n'est pas exact car en réalité les bébés sont capables d'estimation temporelle précise. Tout dépend en fait de la gamme des durées à estimer, et des conditions susceptibles ou non de leur permettre d'apprendre l'association d'un événement à sa durée. Il est évident qu'un bébé ne va pas retenir la durée de la musique du mobile au-dessus de son lit si sa mère ne l'actionne qu'une seule fois. En revanche, si elle daigne l'actionner plusieurs fois par jour, à chaque sieste, alors il parviendra à apprendre la durée de cette musique. A la fin de la musique, il s'agit de espérer que sa mère revienne pour l'activer de nouveau.

Les bébés discriminent sans difficulté les durées très courtes de quelques millisecondes. Ceci a été montré dans le cas du langage. Eimas et ses collègues (1971) ont mis en évidence avec une méthode d'habituation que le bébé âgé de 4 mois est capable de différencier divers sons de la langue sur la base de leur délai de voisement. Cette capacité de traitement des intervalles de quelques dizaines de millisecondes s'explique par l'expertise du bébé dans le traitement des sons du langage dans lequel il est immergé depuis la vie in utero. Friedman (1977) en conclut que le temps est avant tout auditif parce que le temps est inhérent au langage. D'ailleurs les travaux chez l'enfant ont montré une meilleure sensibilité aux stimuli temporels auditifs que visuels (Droit-Volet, Tzourzou, & Wearden, 2004; Zélanti & Droit-Volet, 2012 ; Gori, et al., 2017 ; pour une revue voir Comstock et al., 2018). Cette meilleure sensibilité temporelle pour les stimuli auditifs subsiste à l'âge adulte bien que dans une moindre mesure. Les études ont toutefois montré que les compétences temporelles des bébés ne se limitent pas au traitement des durées de quelques millisecondes. Ils seraient également capables de juger

des durées allant de plusieurs centaines de millisecondes à plusieurs secondes dans certaines conditions, avec toutefois une évolution des compétences avec l'âge.

En effet, des études ont montré que le bébé de 6 mois est capable de discriminer des changements de quelques centaines de millisecondes dans une séquence rythmique. Clifton, (1974) et Colombo et Richman, (2002) ont montré une décélération du rythme cardiaque des bébés, lors de l'omission d'un stimulus. Brannon et ses collaborateurs (2007) ont enregistré l'activité cérébrale des nourrissons de 1 mois et observé que ces derniers réagissent aux déviations temporelles dans une séquence rythmique quand un intervalle-inter-stimulus de 500 ou 750 ms survient alors que IIT est habituellement d'1,5 s. Récemment De Hevia et ses collègues (2014) ont même réussi à mettre en évidence ces capacités de discrimination dès la naissance. Cependant, il semblerait que les capacités de discrimination s'améliorent au cours des premiers mois de la vie. Brannon et al. (2007) montrent en effet que les nourrissons de 6 mois sont capables de discriminer des durées différentes d'un ratio de 1 :2 (ex : 1,5 vs. 3 s) mais non de 2 :3, alors que les jeunes enfants âgés de plus de 10 mois y parviennent. Cependant, tout dépend de la tâche car, en bissection temporelle, à l'âge de 5 ans, les enfants éprouvent toujours des difficultés à discriminer des durées très proches, différant d'un ratio de 2 :3 (Droit-Volet & Zélanti, 2013b). Quoi qu'il en soit, à 5 ans, ils ne peuvent pas discriminer des durées différentes d'un ratio plus court (5 :6), alors qu'ils y parviennent à 8 ans. L'évolution de la sensibilité au temps dépend donc de la tâche utilisée, notamment s'il s'agit d'un jugement explicite ou implicite du temps, comme nous le verrons plus loin.

Ainsi, selon les études chez le nourrisson, celui-ci parvient avec plus d'assurance à traiter des durées courtes que des durées longues. Toutefois, quand les conditions d'apprentissage le permettent, il peut également mémoriser des durées longues de plusieurs secondes. En utilisant la méthode du conditionnement, Fitzgerald et Brackbill (1968) ont mis en évidence une réponse automatique de changement de taille pupillaire démontrant un

apprentissage de la durée. Dans cette étude, des bébés de 4 mois étaient soumis à l'alternance de lumière forte et faible toutes les 20 s. La lumière forte déclenchait une réponse de réduction de la taille de la pupille. Après un certain nombre d'essais, les auteurs se sont aperçus que cette réaction pupillaire subsistait même lors des essais tests, sans modification du niveau d'éclairage. Les bébés de 4 mois ont donc pu apprendre la durée séparant deux changements d'intensité lumineuse, bien qu'il s'agisse d'une durée longue de 20 s. De façon plus surprenante encore, Darchevile, Rivière et Wearden, (1992, 1993) ont obtenu une réponse volontaire, contrôlée dans le temps, de bébés âgés de 3 à 4 mois, en situation de conditionnement à un intervalle temporel fixe pour obtenir un renforcement. Après chaque appuie renforcé, par le passage d'un extrait de dessin animé, les bébés se sont montrés capables de faire une longue pause puis, à la fin de l'intervalle fixe ils se mettaient à appuyer, taper sur un rouleau. Ils ont réussi à augmenter leur temps de pause en suivant la durée de l'intervalle fixe de 10 à 80 s. Le constat de l'existence de compétences temporelles précoces nous pousse à concevoir, qu'en amont de la représentation cognitive du temps, il existe un autre type de codage du temps plus automatique. Ainsi, dès son plus jeune âge, l'enfant fait l'expérience perceptive ou motrice du temps. Il est fort probable que ces expériences initiales l'aident dans le développement d'autres formes de jugements du temps dont le jugement explicite de l'écoulement du temps.

1. Le développement des capacités de jugement du temps

Au cours des deux dernières décennies, de nombreux travaux ont permis d'examiner les capacités des enfants à juger les durées. Notons que nos connaissances sur le développement des compétences temporelles entre 6-12 mois et 3 ans sont limitées, voire inexistantes, du fait de la difficulté à examiner du point de vue comportemental les enfants entre 12 mois et 3 ans. A ces âges, on ne peut plus utiliser de méthode de conditionnement au temps, et les enfants ne maîtrisent pas suffisamment bien le langage pour comprendre des consignes verbales. Aussi, le

développement des conduites de jugement temporel a-t-il été étudié à partir de l'âge de 3 ans, âge auquel on peut proposer des tâches explicites. Dans ma thèse, j'ai travaillé uniquement avec des enfants de plus de 3 ans, même si je suis en train d'essayer de mettre au point une méthode permettant d'appréhender les capacités de jugement du temps entre 6 et 12 mois avec une analyse du regard (eye-tracker).

2.1. L'évolution des capacités de jugement du temps

Pour étudier l'évolution avec l'âge des jugements temporels volontaires et contrôlés, les chercheurs ont principalement utilisé deux types de tâches : les tâches de généralisation temporelle et les tâches de bissection temporelle. La généralisation temporelle est une tâche qui a été utilisée chez l'humain adulte à partir des années 1990 par Wearden (Wearden, 1992 ; Wearden & Ferrara, 1995, 1996). Dans cette tâche, une durée standard est d'abord présentée au sujet 5 à 10 fois selon les études. Puis, des durées de comparaison sont présentées au sujet soit plus longues (ex : 5, 6 et 7 s) soit plus courtes (ex: 1, 2, 3 s) que la durée standard, soit de même durée (4 s). A chaque durée de comparaison, les participants doivent indiquer s'il s'agit, oui ou non, d'une durée identique à la durée standard. Les résultats sont alors représentés sous la forme d'un gradient de généralisation, comme celui présenté figure 15.

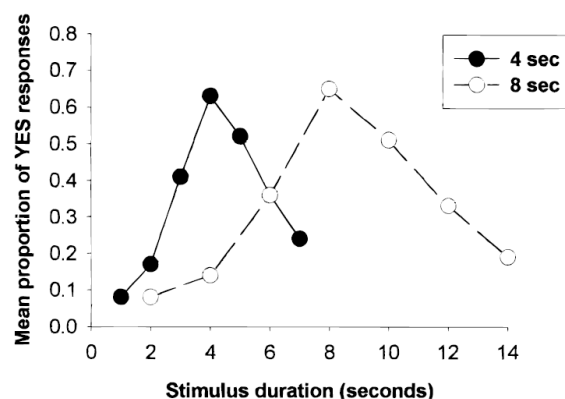


Figure 15 : Gradient de généralisation : Proportions de réponses « oui » en fonction des durées de comparaisons pour une durée standard de 4 s et de 8 s, pour des enfants de 8 ans (d'après Droit-Volet, Clément, & Wearden, 2001)

Ce gradient correspond à la proportion des réponses « oui » obtenues en fonction des durées de comparaison. Dans cette tâche, on obtient généralement une courbe de type courbe de Gausse avec un pic centré sur la durée standard. Ainsi, plus on s'éloigne de la durée standard, plus la proportion de réponses « oui » diminue pour atteindre parfois une proportion nulle pour les durées de comparaison les plus éloignées.

Dans la tâche de bissection temporelle, la familiarisation est un peu différente (Allan & Gerhardt, 2001). On fixe au départ deux durées, l'une courte et l'autre longue, par exemple 1 s et 7 s et on présente au sujet alternativement chacune des deux durées un nombre suffisant de fois en disant bien clairement « ceci est la durée courte » ou « ceci est la durée longue ». Puis, lors de la phase de test, on présente un ensemble de durées de comparaisons distribuées sur un continuum allant d'une durée un peu inférieure à la durée courte à une durée un peu supérieure à la durée longue. A chaque durée de comparaison, les participants indiquent s'il s'agit de la durée courte ou de la durée longue. Les résultats sont alors présentés sous la forme d'une courbe psychophysique telle que représentée sur la figure 16, qui correspond à la proportion de réponses « longue » en fonction de chaque durée de comparaison. On obtient ainsi une courbe, avec un point où la discrimination n'est pas possible (probabilité = 0.5) : le point de bissection temporelle. Les durées pour lesquelles la probabilité de réponse « longue » est inférieure à 0.5 correspondent aux durées perçues comme courtes. A l'inverse les durées pour lesquelles la probabilité dépasse 0.5 sont celles perçues comme longues.

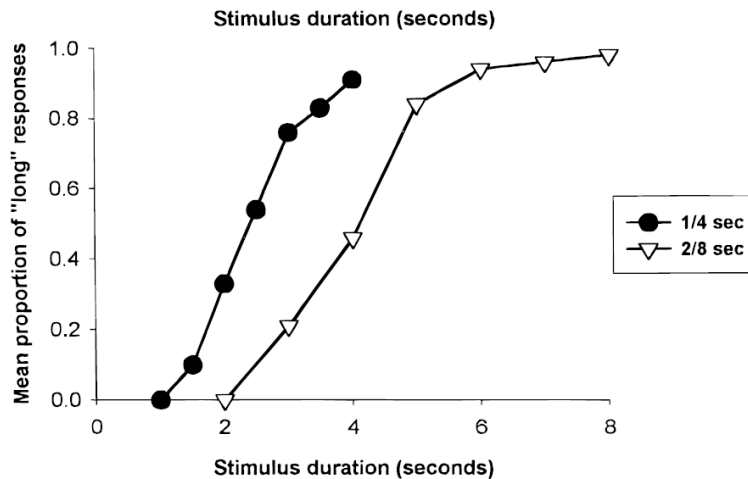


Figure 16 : Courbe de bissection temporelle, Proportion de réponses long en fonctions des durées de comparaisons deux durées standards pour des enfants de 8 ans (d'après Droit-Volet & Wearden, 2001).

La pente de la courbe peut être calculée comme indice de la qualité de la perception temporelle, une courbe plate indiquant une difficulté à discriminer les durées (Delgado & Droit-Volet, 2007). Un décalage de la courbe vers la droite signifie quant à lui que les durées sont jugées plus courtes (voire sous-estimées par rapport aux autres), et un décalage vers la gauche qu'elles sont jugées plus longues.

Ces tâches ont été utilisées chez l'animal avec plusieurs séances d'exposition. Chez l'homme, quelques essais de présentation des durées sont suffisants à leur mémorisation. Cependant chez l'enfant, un nombre plus important de présentations des durées standards a été utilisé. Certains chercheurs ont même fixé un critère d'apprentissage de la durée standard. Quoiqu'il en soit, 2 blocs de 5 à 8 essais sont suffisants pour que l'enfant de 3 à 5 ans parviennent à obtenir plus de 75% de réponses correctes du moins en bissection temporelle. Dans les tâches de généralisation temporelle, les résultats ont montré que tous les enfants³ quel que soit leur

³ Les travaux menés avec la reproduction temporelle montrent la même tendance : une réduction de la variabilité avec l'âge. Toutefois, ces travaux en reproduction montrent également une tendance à surestimer la durée chez les enfants de moins de 7 ans en reproduction qui pourrait être liée au développement des habiletés motrices et non au développement du traitement temporel. Ceci a conduit Droit-Volet, 2007 à déconseiller l'usage de la reproduction dans les études purement développementales.

âge présentent des jugements temporels conformes à la théorie du temps scalaire. Comme les adultes, dès 3 ans, les enfants présentent un gradient de généralisation temporelle avec un pic situé à la valeur de la durée standard. En bissection temporelle, le point de bissection ne change pas avec l'âge des sujets. Il se situe en effet à la valeur de la moyenne arithmétique des durées standards courtes et longues. Ceci révèle qu'en généralisation, comme en bissection, les enfants sont capables d'avoir une représentation exacte de la valeur de la durée standard. Toutefois, la discrimination semble plus difficile pour les jeunes enfants. En effet, les courbes de généralisation et celles de bissection sont souvent plus plates chez les enfants âgés de 3 et 4 ans que chez ceux âgés de 8 ans (Droit-Volet, Clément, & Wearden, 2001 ; Droit-Volet, Tourret, & Wearden, 2004 ; Droit-Volet & Wearden, 2001, 2002 ; Gautier & Droit-Volet, 2002). Quant aux ces courbes des enfants de 9 et 10 ans, elles s'approchent de celles des adultes (McCormack, et al., 1999). Toutefois, dans certains cas, quand l'estimation temporelle est plus difficile avec par exemple des durées longues, entre 8 et 20 s, les enfants de 9 ans présentent encore des courbes plus plates que celles des adultes (Droit-Volet, Zélanti & Wearden, 2015). De plus, les perceptions des enfants sont beaucoup plus **variables** que celles des adultes. Droit-Volet (2002) a montré que cette plus grande variabilité chez les jeunes enfants dans certaines tâches subsiste quelle que soit la gamme de durées, inférieures ou supérieures à la seconde. Cependant les jeunes enfants éprouvent plus de difficultés pour les durées très courtes < 1 s, et pour les durées très longues, > 8 s. Entre 1 et 4 s, la discrimination serait plus aisée pour les enfants. En résumé, les différences dans le jugement du temps en généralisation et en bissection ne seraient pas dues à un manque d'exactitude de la représentation des durées, mais à leur plus grande variabilité. La question qui se pose est donc de savoir quelle est l'origine de cette plus grande variabilité, ou bruit dans l'estimation des durées chez les jeunes enfants. Autrement dit, est ce que ce bruit est dû à un fonctionnement immature de l'horloge interne, ou à d'autres facteurs indépendants

du traitement temporel à proprement parlé, notamment des facteurs liés au développement cognitif en général ?

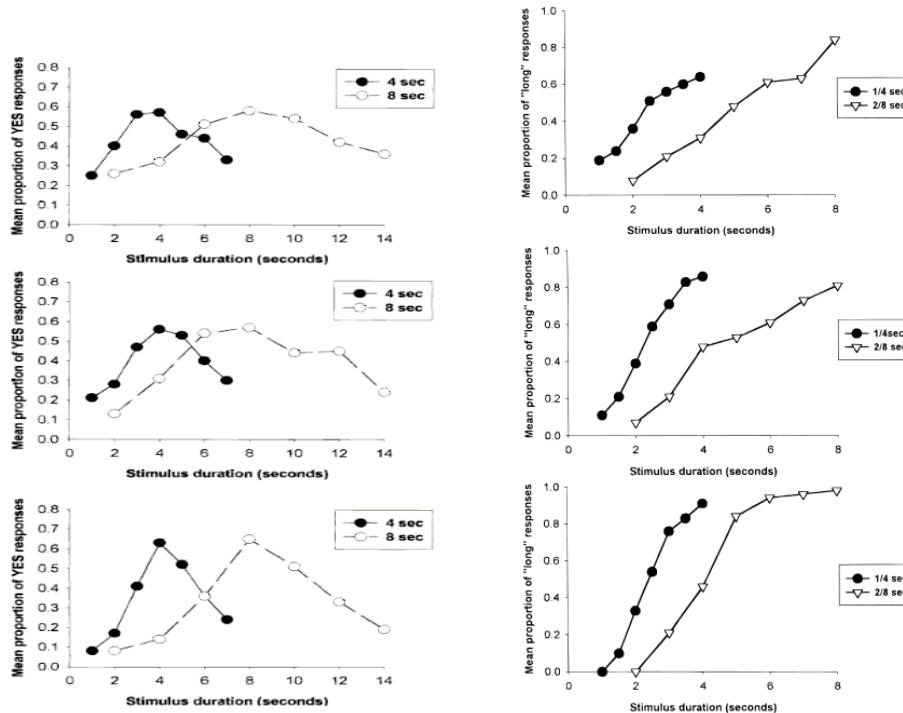


Figure 17 : Gradient de généralisation temporel (à gauche) et courbes de bissection temporelle (à droite) d'enfants de 3, 5 et 8 ans (d'après Droit-Volet & Wearden, 2001 ; Droit-Volet, Clément & Wearden, 2001)

2.2 Causes de la variabilité liées au développement cognitif général

Les causes liées au développement des processus mnésiques

L'une des premières hypothèses qui a été mise en avant pour expliquer cette variabilité dans les jugements temporels des jeunes enfants est la variabilité de la représentation en mémoire du temps chez l'enfant. Selon les modèles de la théorie du temps scalaire, la durée est encodée de façon correcte. La principale source de variation des jugements du temps réside donc dans les processus de mémorisation des durées. En effet, les durées standards présentées sur plusieurs essais sont stockées en mémoire de référence sous la forme d'une distribution,

avec une valeur centrale correspondant à la durée standard, et un indice de dispersion. Aussi appliquant les modèles mathématiques de la théorie du temps scalaire aux données obtenues chez l'enfant, en généralisation et en bissection, Droit-Volet (2002) et Droit-Volet et Wearden (2001, 2002) ont mis en évidence une plus grande variabilité des représentations en mémoire des durées chez le jeune enfant que chez l'adulte. Par conséquent, des études spécifiques sur la mémoire à court terme des durées chez l'enfant ont été réalisées. En l'occurrence, Rattat et Droit-Volet, (2001) ont montré avec des enfants de 3, 5 et 8 ans qu'au bout de 15 minutes de rétention en mémoire des durées, la courbe de bissection devient plate chez les enfants âgés de 3 ans et de 5 ans, alors qu'elle reste abrupte chez les enfants âgés de 8 ans même après 24 h d'intervalle de rétention (voir aussi Rattat et Droit-Volet, 2005). Les jeunes enfants ont donc plus de difficultés à maintenir une durée en mémoire de travail. Leur performance est aussi plus perturbée par l'ajout de tâches interférentes pendant l'intervalle de rétention que celle des enfants âgés de 8 ans ou des adultes (Rattat, 2010; Rattat & Droit-Volet, 2010). L'idée d'une difficulté de maintien en mémoire de travail des jeunes enfants est confortée par les résultats de récentes études développementales utilisant des tests neuropsychologiques permettant d'évaluer les capacités individuelles de mémoire de travail des participants (Zélandi & Droit-Volet, 2011 ; Droit-Volet, 2013 ; Droit-Volet & al., 2015 ; Droit-Volet & Hallez, 2018). Ces études ont montré que la variabilité des jugements temporels dépend des capacités de mémoire de travail. Plus celles-ci sont réduites et plus l'enfant se montre variable dans ses jugements en généralisation et en bissection ce qui se traduit par des courbes psychophysiques plus plates.

Ainsi, les capacités de mémoire de travail plus réduites chez le jeune enfant expliquent en partie leur moins bon sens du temps. Cependant, on ne peut réduire les différences dans les jugements temporels à un problème de mémoire de travail. D'ailleurs ce qui se trouve en mémoire de travail dépend de ce qui a été encodé. Pour trancher cette question du rôle critique de la représentation en mémoire des durées, Delgado et Droit-Volet (2007) ont décidé de créer

du bruit dans la présentation des durées standards, dans des tâches de généralisation et de bissection temporelles. Ainsi, des enfants de 5 ans et 8 ans et des adultes réalisaient des tâches habituelles de généralisation et de bissection temporelle avec une phase de présentation de la même durée standard ($M = 4$ s, $SD = 0$, par exemple), alors que d'autres enfants et adultes réalisaient cette tâche mais avec des présentations différentes, variées, de la durée standard. Celles-ci variaient de telle sorte que la moyenne des durées présentées était toujours égale à la durée standard ($M = 4$ s), mais avec une variabilité plus élevée ($SD = .20$).

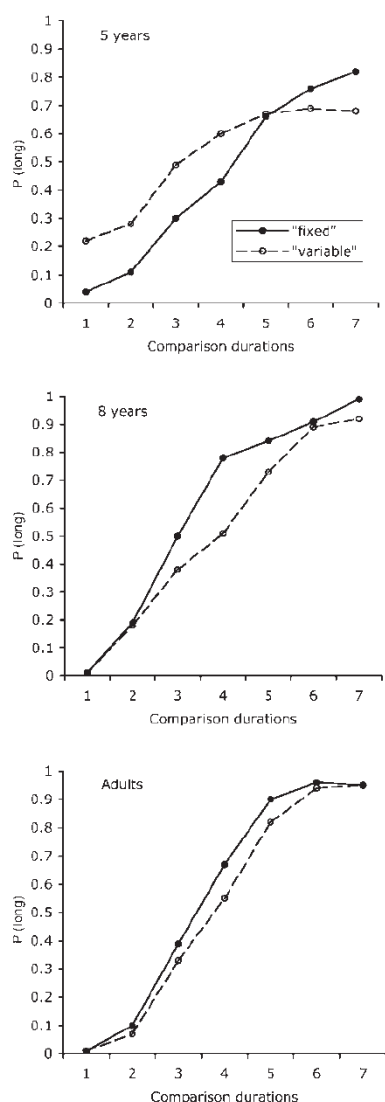


Figure 18 : courbes de bissection temporelles en condition durée de référence variable (bruitée) et fixe (non bruitée) pour les 3 groupes d'âges (d'après Delgado & Droit-Volet, 2007).

L'étude a montré que, quelle que soit la tâche, plus les enfants sont jeunes et plus ils sont impactés par le bruit introduit dans la présentation des durées standards. Ainsi, les variations dans la représentation en mémoire plus importante chez le jeune enfant résultent en partie du bruit initial plus important lors de l'encodage du temps. La modélisation mathématique des données des enfants réalisée par Delgado et Droit-Volet (2007) nous conforte dans cette interprétation.

En conclusion, même si l'on ne peut nier une plus grande fragilité de la rétention de la durée en mémoire chez l'enfant liée aux capacités de mémoire à court terme réduites, cela ne suffit pas à expliquer la plus grande variabilité dans les jugements temporels. Aussi les chercheurs ont essayé d'étudier l'impact des capacités d'attention réduites chez l'enfant sur ces jugements.

Les causes attentionnelles de la variabilité dans les jugements temporels

Une autre piste pour expliquer cette variabilité plus élevée dans les jugements des durées serait donc une perception plus bruitée. Or, nous avons vu que l'attention accordée au traitement du temps est essentielle pour son estimation. Les études en double tâche ont montré qu'une réduction de l'attention accordée au temps se traduit par un raccourcissement subjectif du temps (pour exemple Brown, 2010 ; Casini & Macar, 1997 ; Hallez & Droit-Volet, 2017).

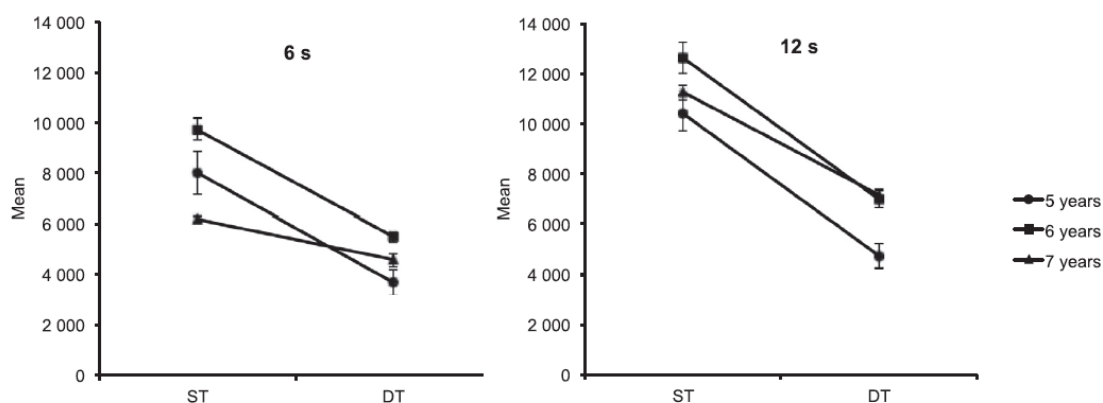


Figure 19 : Reproduction de durées pour des enfants de 5, 6 et 7 ans, en condition de simple tâche, ST et de double tâche DT, pour des durées de 6 et 12 secondes (d'après Hallez & Droit-Volet, 2017).

Dans une étude récente publiée en 2017, dont les résultats sont présentés figure 19, Hallez et Droit-Volet ont clairement montré qu'en double tâche, quand les enfants doivent nommer la couleur d'un carré présenté pendant la durée à évaluer, ils sous-estiment le temps. Ceci d'autant plus qu'ils sont jeunes. Cette sous-estimation est corrélée avec leurs capacités globales d'attention évaluées au moyen de tests neuropsychologiques. Ainsi les ressources attentionnelles réduites des jeunes enfants expliquent qu'ils soient plus variables dans leurs jugements temporels et plus sujets à des distorsions temporelles. L'impact de leurs capacités attentionnelles réduites sur l'estimation du temps a été montré non seulement dans le cadre de paradigmes de double tâche, mais aussi dans le cadre de tâches utilisant des distracteurs attentionnels que les sujets doivent ignorer (Gauthier & Droit-Volet, 2002), ainsi que dans des tâches avec un signal avertisseur dont le but est de déclencher l'orientation de l'attention (Droit-Volet, 2003). Dans l'étude de Droit-Volet (2003), les enfants âgés de 3 et 5 ans devaient évaluer des durées en bissection temporelle. L'introduction d'un signal avertisseur dans certains essais produisait un allongement subjectif du temps. Si l'on considère ce résultat à travers un modèle d'horloge interne, on peut dire que tout se passe comme si le signal provoquait la fermeture plus rapide du « switch attentionnel » de sorte que plus d'unités temporelles soient comptabilisées. Quoi qu'il en soit, les performances des jeunes enfants étaient clairement liées

à leurs capacités attentionnelles, les distorsions causées par le signal avertisseur étant plus élevées chez les jeunes enfants avec une plus grande variabilité. Cela semble indiquer que les différences développementales observées en termes de distorsions temporelles seraient dues, elles aussi, à une difficulté cognitive : le manque de ressources attentionnelles chez les enfants plutôt qu'à une « horloge » fonctionnant différemment de celle de l'adulte (Zélanti & Droit-Volet, 2011 ; Droit-Volet, Delgado, & Rattat, 2006). En somme, les différentes composantes de l'attention – attention partagée, sélective, inhibitrice et orientation de l'attention - limitées chez le jeune enfant constitueraient l'une des principales causes de la variabilité plus élevée de la perception du temps chez le jeune enfant dans les tâches de généralisation et de bissection.

La variabilité causée par les processus de décision.

Enfin, les changements avec l'âge dans les règles de décision peuvent également concourir aux différences de variabilité avec l'âge dans les jugements de durées. Toutefois, il y a peu de recherches dans ce domaine chez l'enfant (Droit-Volet & Izaute, 2008, 2009) comme chez l'adulte (Wearden & Grindrod 2003; Droit-Volet, Lamotte & Izaute, 2017 ; Franssen, & Vandierendonck, 2002 ; Brown, Newcomb & Kahrl, 1995). Ceci provient certainement du manque d'intérêt pour les processus qui ne relèvent pas, ou n'impactent pas directement, les traitements temporels. Cependant, les tâches de bissection et de généralisation nécessitent de comparer des durées avec la durée standard et de décider si la durée est égale, inférieure, ou supérieure à la durée standard. Or, ce seuil de discrimination ne dépend pas que des différences entre les valeurs absolues des durées, mais aussi de la marge de confiance du sujet dans son jugement. Aussi, en bissection temporelle, avec un groupe de durées distribuées entre de 2 s et 5 s, avec une moyenne arithmétique de 3,5 s, certains sujets, peu conservateurs, vont considérer que la durée de comparaison de 3 s est similaire à la durée courte de 2 s. D'autres, plus conservateurs, vont décider que 3 s diffère de 2 s et répondre « long » au lieu de court. Nous

savons qu'entre 3 et 8 ans les fonctions exécutives ne sont pas encore pleinement efficaces (Rubia, 2000 ; Paus, 2005). De plus, les jeunes enfants ont souvent peur de se tromper recherchant toujours l'approbation de l'adulte. Il est également possible que dans ce type de tâche les enfants ressentent une forme de pression temporelle : la nécessité de répondre rapidement. Au moyen de la modélisation mathématique des données en bissection et en généralisation temporelle chez l'enfant, Droit-Volet et Wearden (2001) et Droit-Volet, Clément et Wearden (2001) ont montré que l'aplatissement des fonctions psychophysiques s'explique en partie par un pourcentage important de réponses données au hasard (paramètre p). La proportion de réponses aléatoires diminue avec l'âge pour être nulle à l'âge de 8 ans (Bissection temporelle : 3 ans : $p = .10-.20$; 5 ans : $p = .10-.15$; 8 ans : $p = .01$; généralisation : 3 ans : $p = .39-.50$; 5 ans : $p = .22-.36$; 8 ans : $p = .12$). Sur la base des valeurs du paramètre p du modèle mathématique, on peut aussi constater que la part de réponses aléatoires est plus élevée en généralisation qu'en bissection, la première tâche étant plus difficile à réaliser que la seconde (Droit-Volet, Zélanti, & Wearden, 2015). Un grand nombre de réponses est donc due au hasard chez le jeune enfant, ce qui accroît la variabilité du jugement temporel. Toutefois, Droit-Volet et Rattat (2006) ont montré que les processus de décision des enfants s'améliorent avec l'apprentissage si on augmente le nombre d'essais. En effet, le nombre de réponses aléatoires diminue au fur et à mesure des essais. Ceci améliore la fonction psychophysique parce que moins de réponses sont fournies dans la zone de l'incertitude (probabilité de 50%). Il en résulte une catégorisation temporelle plus nette. Avec leur modèle, McCormack et al. (2004) ont montré que si l'on rajoute une part de hasard dans les réponses des adultes, on obtient une courbe ressemblant à celle produite par les enfants. Enfin, alors que la théorie du temps scalaire suggère que les processus de décision sont indépendants des jugements temporels, Droit-Volet et Izaute (2005) ont montré que les seuils dépendent des connaissances des sujets et de leur confiance en leurs connaissances. Droit-Volet & Izaute (2005) ont notamment montré en

généralisation temporelle que l'apport d'un feed-back après chaque jugement temporel améliore la précision du jugement des jeunes enfants, comme illustré sur la figure 20. Ceci réduit la part de réponses aléatoires (paramètre p de la modélisation) et augmente le seuil de discrimination (paramètre b supérieur avec que sans feedback).

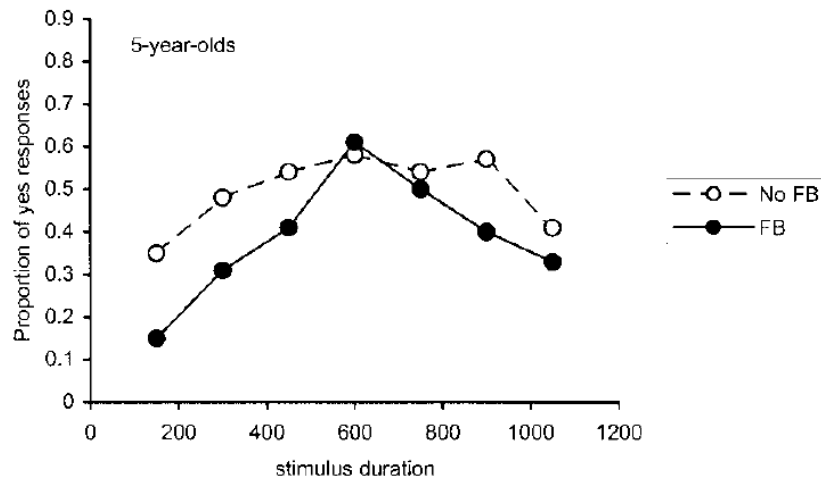


Figure 20 : Gradient de généralisation des enfants de 5 ans avec et sans feed-back (Droit-Volet & Izaute, 2005).

Ceci révèle qu'avec une amélioration de leurs connaissances temporelles, les sujets deviennent plus confiants dans leurs jugements et relativement moins conservateurs. Ceci expliquerait d'ailleurs les courbes de généralisation asymétriques chez les adultes avec plus de durées de comparaisons jugées supérieures à la durée standard, et les courbes de généralisation plus symétriques chez les enfants. Les difficultés de prise de décision chez les jeunes enfants pourraient donc bien aussi concourir à l'augmentation de la variabilité du jugement temporel dans les tâches explicites de généralisation et de bissection.

En résumé, le développement des différentes fonctions cognitives, la mémoire de travail, l'attention, et les processus de décision, pourraient constituer le facteur majeur à l'origine des différences avec l'âge dans les jugements des durées. Ceci apparaît clairement lorsque l'on soumet des enfants d'âges différents à des tâches de jugement temporel sollicitant plus ou moins

ces fonctions. En comparant par exemple des jugements explicites avec des jugements implicites du temps.

2.3. Le développement avec l'âge du jugement temporel explicite des événements

Les contraintes liées aux tâches rendent difficile l'examen des compétences purement temporelles de l'enfant.

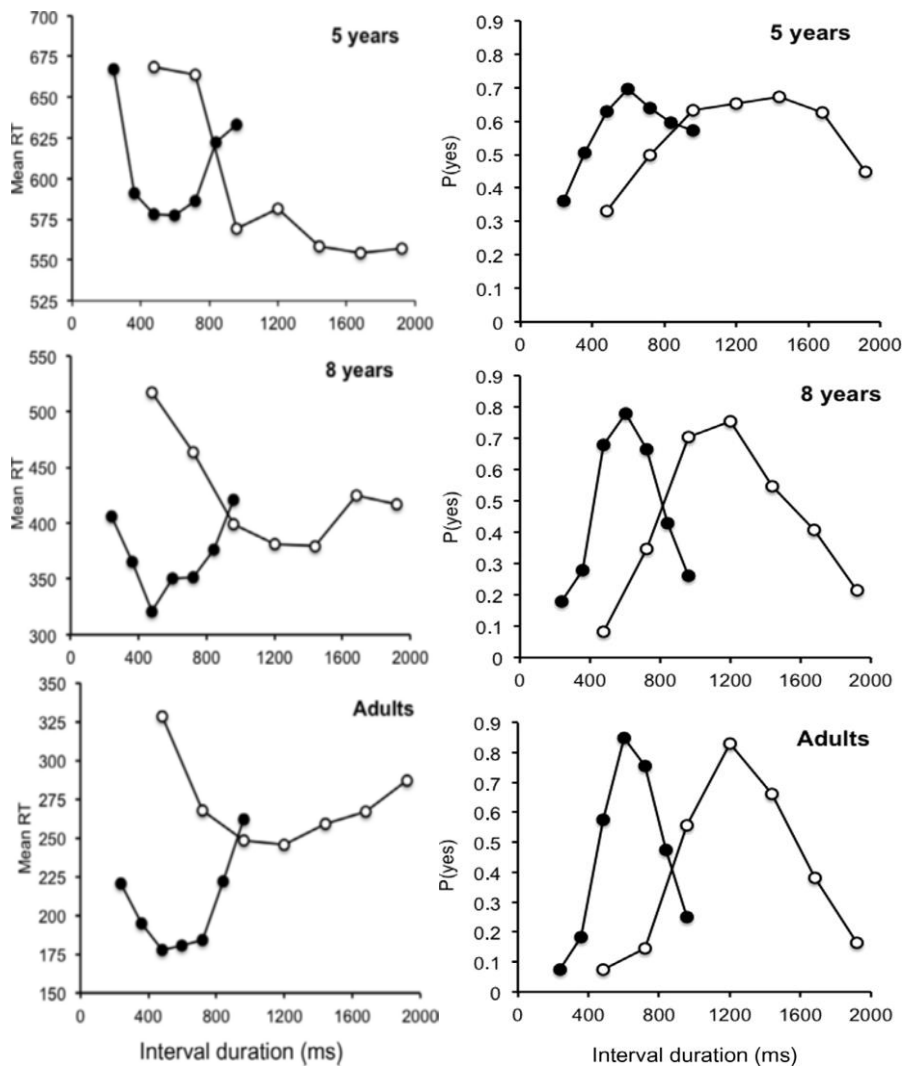


Figure 21 : A gauches temps de réaction en fonction de la durée de comparaison en tâche implicite. A droite gradients de généralisation lors de la tâche explicite de jugement des durées (d'après Droit-Volet & Coull, 2016).

Récemment, Droit-Volet et Coull (2016) ont donc comparé le développement des jugements temporels explicites des enfants âgés de 3 à 8 ans et des adultes dans une tâche classique de généralisation temporelle, avec le développement des jugements temporels implicites (figure 21). La procédure utilisée dans ces deux tâches était similaire. Dans la phase d'apprentissage des durées, les sujets devaient appuyer le plus vite possible après un stimulus séparé d'un premier stimulus par un intervalle cible (600 ms ou 1200 ms). Cependant, dans la tâche explicite de jugements temporels, ils recevaient la consigne d'appuyer vite pour bien apprendre la durée de l'intervalle entre les deux stimuli, alors que dans la tâche implicite, ils ne recevaient aucune consigne temporelle. L'expérimentateur ne faisait jamais référence au temps. Les courbes pour les deux tâches sont présentées figure 21. A la lecture de cette figure, on s'aperçoit clairement que les trajectoires de développement sont différentes pour le jugement implicite et explicite du temps. En effet, dans la tâche explicite, on retrouve les résultats obtenus dans les études décrites précédemment, en l'occurrence, le gradient de généralisation plus plat chez les enfants âgés de 5 ans que chez les enfants âgés de 8 ans ou les adultes.

De plus, alors que le pic du gradient de généralisation ne diffère pas entre les âges, témoignant d'une représentation correcte du temps, la variabilité du jugement temporel (FWHM) diminue avec l'âge. En revanche, dans la tâche implicite, bien que les jeunes enfants obtiennent des temps de réaction plus élevés, leurs courbes de jugement temporels ont des formes en U similaires à celles des adultes. En effet, le pic de leur courbe en U est localisé à une valeur proche de l'intervalle cible comme chez l'adulte (chez l'adulte voir aussi, Rohenkohl, Coull & Nobre, 2011). De plus, cette fois, il n'y a aucune différence dans la variabilité du jugement du temps entre les sujets d'âges différents. Aucune différence entre les groupes d'âges n'est observée dans la valeur du (FWHM). Droit-Volet et Coull (2016) ont également évalué les capacités cognitives des enfants au moyen de différents tests neuropsychologiques. Elles ont observé que les différences dans l'indice de dispersion temporel

(FWHM) dans la tâche explicite sont significativement liées aux scores des enfants aux tests cognitifs. Plus les enfants ont des scores élevés aux tests d'attention-concentration, moins ils sont variables dans leurs jugements temporels. En revanche, pour la tâche implicite, il n'y a aucun lien entre les différences individuelles dans les scores aux tests cognitifs et les différences dans les performances temporelles. Autrement dit, les différences sur le plan des capacités cognitives n'influent pas sur le jugement temporel. Ces résultats confirment bien le développement précoce d'un traitement automatique de la durée. Ils montrent également que les différences développementales dans le jugement des durées relèvent essentiellement de l'immaturation des fonctions cognitives. On pourrait donc en conclure que les capacités de jugement du temps sont toutes établies dès la naissance. Ce serait toutefois une vision réductrice du jugement du temps et de son rôle. La perception du temps ne peut se résumer à un traitement automatique des intervalles ! Tout d'abord, il n'y a pas une forme mais plusieurs formes de jugement du temps qui varient selon la complexité de la tâche et des situations rencontrées. Ensuite, il y a plusieurs niveaux de traitement du temps (Coull & Nobre, 2008, Coull et al., 2013).

La prise de conscience du temps ou sa perception explicite est ce qui nous permet en fait de mieux appréhender notre environnement et ses contraintes temporelles dans des contextes multiples et variés, et de réguler en conséquence nos comportements. Quand on est conscient d'être sujet à des distorsions dans nos jugements temporels, on peut aussi lutter contre nos biais temporels (Lamotte, Chakroun, Droit-Volet et Izaute, 2014 ; Lamotte, Izaute & Droit-Volet, 2012). On peut par exemple se raisonner si l'on trouve le temps long dans une salle d'attente alors qu'il n'y a qu'une minute qu'on attend. Si possible, un adolescent peut aussi arrêter de jouer aux jeux vidéo, pensant qu'il n'est pas raisonnable de continuer à jouer si longtemps car il a conscience que le temps passe vite quand il joue. Une régulation temporelle est donc possible car grâce à notre conscience du temps, à la possibilité de se projeter dans le temps et

d'imaginer un après. Ainsi même si de façon automatique notre « horloge » est fonctionnelle dès le plus jeune âge, cela ne signifie pas que notre habileté à juger le temps soit pleinement développée (Pouthas, 1985).

Pour s'en convaincre, il suffit de regarder le manque de régulation temporelle des jeunes enfants dont la conscience est dans l'instant. Ceci amène à s'interroger sur les conditions qui permettent à l'enfant de mieux appréhender la durée, d'en prendre conscience et de contrôler son comportement en conséquence. Droit-Volet, Pouthas et Jacquet, (1991) ont montré que sans consigne explicite relative au temps, l'apport dans l'environnement d'une horloge externe, un sablier, permet à l'enfant d'améliorer ses jugements temporels. En l'absence de cette horloge externe, les enfants ont des difficultés à comprendre par eux-mêmes les exigences temporelles de la tâche à laquelle ils sont soumis. Ils éprouvent également plus de difficultés à reproduire une durée vide, une durée entre deux appuis, qu'une durée pleine (Droit-Volet & Clément, 2005 ; Droit-Volet, 2008). Des consignes verbales temporelles sont souvent sans efficacité chez les jeunes âgés de 3 ans (Pouthas, Droit, Jacquet, Wearden, 1990). En fait, les jeunes enfants parviennent mieux à reproduire la durée lorsqu'ils reçoivent une démonstration de la durée à reproduire que lorsqu'ils reçoivent une consigne temporelle verbale. Leur performance temporelle est encore meilleure lorsqu'ils produisent cette durée d'action en même temps que l'expérimentateur (imitation simultanée) que lorsqu'ils voient cette durée d'action produite par l'expérimentateur (imitation différée) (Droit-Volet et Rattat, 1999). Cette étude révèle que l'action joue un rôle déterminant dans l'apprentissage des durées chez le jeune enfant. Ce dernier, fait mieux l'expérience de la durée à travers ses propres actions qu'à travers la perception de la durée d'action des autres. On retrouve ici le rôle important de la motricité dans les jugements temporels suggéré dans les études d'imagerie montrant l'activation de la SMA dans les tâches temporelles. Toutefois, son rôle semble plus important chez le jeune enfant. On peut donc se demander si l'action joue un rôle essentiellement « attentionnel », en permettant à

l'enfant de mieux concentrer son attention sur la durée à traiter ou si l'action joue un rôle au-delà des processus attentionnels dans l'appréhension initiale du temps. Lorsque le sujet est dépourvu de concept de temps, la perception temporelle se ferait dans le sentiment interne de « durer », à travers la durée dans l'action. On pourrait donc parler d'un temps agi avant d'être un temps représenté. Ceci renvoie à la théorie de l'embodiment du temps, ou temps incarné, développée par Droit-Volet, (Droit-Volet, 2014) et Marc Wittmann (2013). Toutefois nous ne développerons pas cette théorie, l'objet de ma thèse n'étant pas de tester les effets attentionnels au niveau développemental, mais modestement de tester le rôle de l'action dans les conduites temporelles.

Cependant, concernant le rôle de l'action dans le développement des capacités de jugement temporel, il y a très peu d'études, voire aucune si ce n'est 3 ou 4 études réalisées il y a maintenant plus de 15 ans (Droit, 1995 ; Droit-Volet, 1998 ; Droit-Volet et Rattat, 1999 ; Rattat & Droit-Volet en 2002). En 1998, Droit-Volet (Figure 22) a montré que lorsqu'on demande à des enfants âgés de trois ans d'apprendre une durée en appuyant sur un bouton assez fort, ils parviennent beaucoup mieux à reproduire cette durée que si on leur demande d'appuyer assez longtemps !

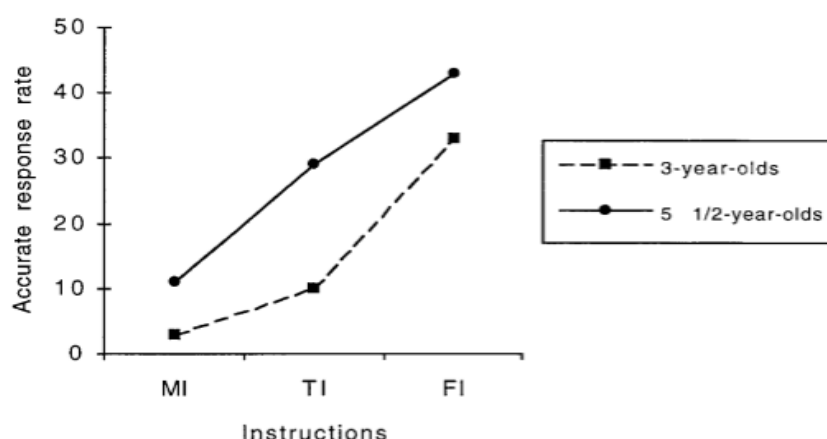


Figure 22 : performance des enfants de 3 et 5 ans en reproduction de durée suivant la condition : Imitation (MI), consigne Temporelle (TI), consigne motrice (FI) d'après Droit-Volet, (1998)

Ceci confirme l'idée que l'enfant appréhende la durée dans le déploiement de son activité. Autrement dit, le temps de l'action est confondu avec les propriétés de l'action. En 1999, Droit-Volet et Rattat ont montré que les enfants âgés de 3 et 5 ans parviennent à bien reproduire la durée d'une action d'appui sur un bouton (4 et 6 s) quand l'expérimentateur les oblige à en faire l'expérience à travers leur propre action, c'est-à-dire à apprendre en imitant l'expérimentateur, en appuyant sur le bouton en même temps que lui. Cependant, dès que l'action change dans la phase test, bien que la durée à reproduire reste la même, les jeunes enfants n'y parviennent plus. Seuls les enfants de 5 ans ont pu transférer la durée apprise à cette nouvelle tâche motrice. Ces résultats sont présentés figure 23. Ainsi avant l'âge de 5 ans, la durée reste liée à l'expérience motrice et ne semble pas pouvoir en être extraite facilement.

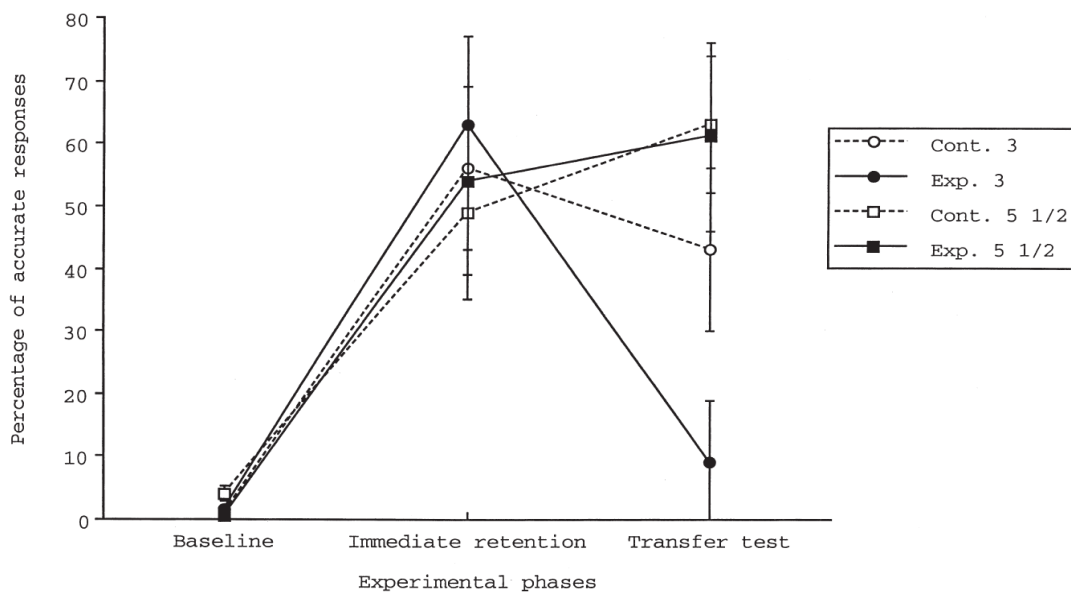


Figure 23 : performance des enfants en reproduction avec la tâche motrice apprise lors de la phase de rétention immédiate, puis lors de la phase test de transfert de tâche en utilisant soit la tâche apprise (Cont) soit une autre tâche (Exp) (d'après Droit-Volet & Rattat, 1999).

En l'absence d'un concept de temps, d'un temps abstrait de l'action, les jeunes enfants ne seraient pas capables de considérer le temps indépendamment de son contenu. Autrement dit,

ils intègrent le temps de façon implicite comme caractéristique intrinsèque de l'action ou de l'objet perçu mais ne dirigent pas volontairement leur attention vers le temps (Coull, 2004). Droit et Rattat parlent alors de temps initial pluriel propre à chaque action que l'enfant apprend au cours de ses expériences de la vie quotidienne qu'elle différencie d'une notion de temps unique abstraite de son contenu. Cette notion de temps unique émergerait donc de temps pluriels agis

En conclusion, il semble bien que nous découvriions le temps à travers nos expériences perceptivo-motrices parce que le temps est une propriété intrinsèque de chaque événement vécu. Ainsi, la construction du concept de temps pourrait être basée sur l'intégration implicite des aspects dynamiques de l'action se structurant au fil des expériences pour former des représentations plus cognitives d'intervalles (Piras & Coull, 2011). Le rôle de l'expérience motrice peut toutefois changer selon la longueur des durées à appréhender, comme le suggèrent les travaux sur la spécificité du cervelet dans le traitement des durées courtes, dont la fonction motrice n'est plus à discuter. On peut penser que l'expérience motrice joue un rôle tout particulier dans l'apprentissage des durées courtes. Ces intervalles perçus seraient donc d'abord courts, toujours attachés à l'action, puis ils seraient dissociés de l'action, ce qui permettrait enfin de construire des représentations d'une gamme plus large de durées, dont des durées longues. Droit-Volet et Coull (2018). La durée d'actions longues serait alors peut-être la somme des durées des actions constituant l'activité. C'est pourquoi, dans cette thèse, nous examinerons cette hypothèse en nous intéressant particulièrement aux durées courtes qui impliquent par essence de l'action et du temps. Ainsi, comme nous le verrons, pour Wing et Kristofferson (1973), l'activité de synchronisation est la somme de deux composantes, une composante « d'horloge interne » et une composante d'action. Comme nous avons plus particulièrement étudié l'activité de synchronisation, j'ai décidé de consacrer un chapitre entier à cette activité, dans lequel je vais définir l'activité de synchronisation et présenter les méthodes qui permettent

d'examiner les performances dans cette activité. Puis, je détaillerai le développement de capacités de synchronisation ainsi que les modèles plus spécifiques à cette activité.

Chapitre 4 : La synchronisation temporelle

1. Définition

Qu'est-ce que la synchronisation? La synchronisation est la capacité de coordonner des événements entre eux en fonction du temps. Deux horloges sont synchronisées quand elles sonnent à la même heure. Deux danseurs sont synchronisés quand le porté s'effectue avec grâce. Une personne est bien synchronisée à un son présenté de façon rythmique quand elle tape sur un clavier en même temps que le son. Quelle que soit l'activité de synchronisation, celle-ci dépend de l'harmonisation temporelle d'événements présentés à intervalles réguliers, avec au moins 3 intervalles pour pouvoir parler de rythme (Drake & Botte, 1993 ; Hary & Moore, 1987). Toutefois, ces intervalles peuvent être très variés, allant d'une centaine de millisecondes à environ 1.8 s. Au-delà de 1,8 s d'intervalle, les événements sont perçus comme isolés, et non plus comme faisant partie d'une même séquence rythmique (Fraisse, 1948, 1974, 1982). Lors du traitement d'une séquence rythmique, en perception ou en production, nous avons tendance à accentuer certains temps, en d'autres termes à rendre plus saillants certains temps que l'on qualifie de « temps forts ». La prédominance des temps forts ou accentuation (Large & Snyder, 2009 ; Mc Auley, 2010 ; Schulze, 1989), conduit à l'émergence d'une structure rythmique. Celle-ci permet la décomposition du rythme en intervalles plus petits (harmoniques rythmiques). La structure rythmique peut être « binaire », lorsque le rythme est décomposé en deux, ou « ternaire », lorsque le rythme est décomposé en trois. La structure du rythme forme ce que l'on appelle la **métrique** (Drake et al. 2000; Kotz et al., 2018 ; Abecasis et al., 2005 ; Mc Auley, 2010). Ces différents niveaux de traitement du rythme sont illustrés figure 24.

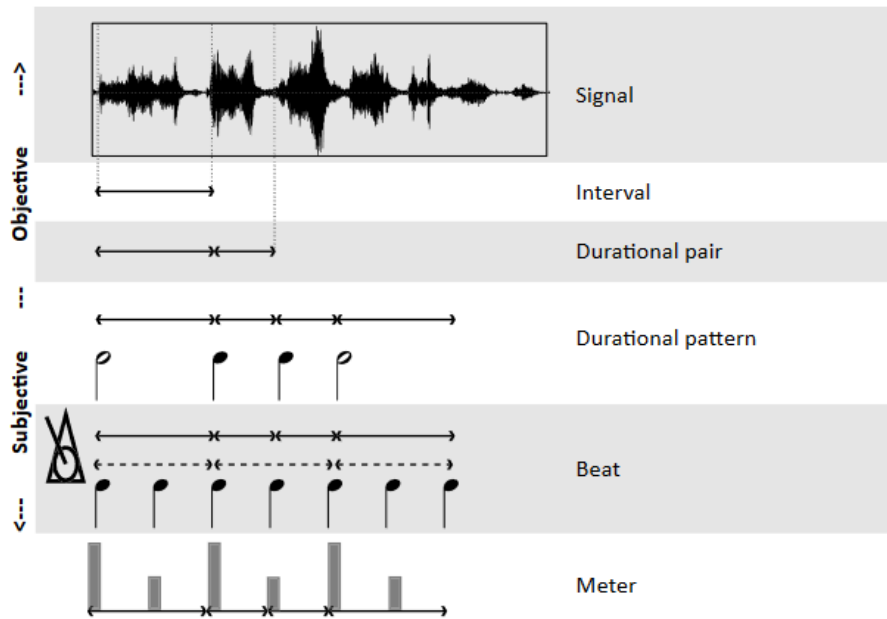


Figure 24 : Les différents niveaux de traitement du rythme (d'après Kötz et al, 2018)

Comme nous l'avons entrevu, à l'heure actuelle, la plupart des auteurs considèrent que chez l'humain, la production et la perception de rythmes comme celle des durées dépendent de l'activité dynamique des groupes de neurones, de ce qu'ils appellent des oscillateurs internes (Fujioka et al, 2012 ; Large & Snyder, 2009). Notre traitement du rythme est donc en partie régi par l'activité de base des neurones qui constitue notre rythme interne. Pour rendre compte de ce rythme interne, les chercheurs enregistrent un « **tempo moteur spontané** » (**TMS**) (Fraisse 1966; Fraisse, Chambon & Oléron, 1954 ; Delevoye-Turrell et al., 2014 ; Delevoye-Turrell & Wing, 2004). Pour produire ce TMS, le sujet doit frapper un rythme régulier, généralement avec la main dominante, à sa propre vitesse, celle qui lui semble la plus confortable. Cette activité de TMS est alors considérée comme l'expression motrice du rythme interne.

Cependant, comme le montre l'activité de synchronisation, le rythme de ces groupes de neurones est flexible et peut être modulé de manière à se synchroniser avec un **rythme** différent d'origine externe. Il s'agit là du processus d'entraînement des oscillateurs (Nozaradan et al.,

2011 ; Schachner, 2010 ; Tierney & Kraus, 2015). Ainsi, lorsque nous dansons, ou jouons de la musique avec d'autres personnes, nous synchronisons notre rythme interne à ce rythme externe en faisant coïncider nos mouvements avec lui, en suivant par exemple les battements d'un métronome (Brown et al., 2006 ; Honing, 2012, Honing et al., 2015). Le rythme externe sert alors de base à la programmation temporelle de nos propres gestes.

La capacité à utiliser un rythme d'origine externe pour coordonner nos propres mouvements est une habileté fondamentale (Fitch, 2013; Kotz & Schwartz, 2016 ; Patel, 2006). Elle nous permet de nous synchroniser avec autrui, comme le font par exemple les musiciens d'un orchestre ou les danseurs d'un ballet. Cette capacité de synchronisation serait automatique, échappant à notre conscience. Dans le cas d'une situation de communication, nous intégrons le rythme de l'autre. Nous sommes capables d'attendre notre tour de parole et de modifier notre vitesse d'élocution afin de nous adapter au rythme de communication de notre interlocuteur. Cette capacité de synchronisation a été observée, y compris chez le jeune enfant lors des relations parents-enfants (Morelen & Suveg, 2012).

Comme l'activité temporelle en générale, l'activité de synchronisation est plus complexe qu'on peut l'imaginer. Elle résulte de l'interaction entre différents composants, certains pouvant être établis dès la naissance alors que d'autres évoluent au cours de l'enfance avec le développement moteur et cognitif. Par exemple, le bébé est capable dès le plus jeune âge de traiter l'accentuation syllabique (Ramus, Nespors & Melher, 1999 ; Rosen, 1992 ; ...) et donc d'extraire la structure rythmique des sons de la parole. Autrement dit, le bébé est capable de traiter la **métrique** du langage (Trehub, Trainor & Unyk, 1993). En revanche, d'autres aspects de la synchronisation, et notamment tout ce qui touche à la production motrice, comme ralentir le rythme des mouvements pour s'adapter à autrui, se développent beaucoup plus tardivement. Ce développement est lié à la maturation des processus cognitifs et moteurs sous-jacents à la production de rythmes. Aussi, dans ce chapitre sur la synchronisation, je vais maintenant

présenter plus spécifiquement les activités de synchronisation, puis je ferai un point sur ce que peuvent apporter les méthodes d'étude comportementale. Nous verrons ensuite le développement des compétences en synchronisation chez l'enfant, ce qui nous permettra de discuter les modèles de la synchronisation. Nous verrons qu'il reste encore de nombreuses questions concernant la synchronisation qui constituent, de mon point de vue, un enjeu majeur de la recherche en psychologie du développement, trop souvent négligée.

2. Méthodes d'étude comportementale de la synchronisation chez l'adulte et l'enfant

Etudier la synchronisation, c'est s'intéresser à la production des rythmes, mais aussi à leur perception. Il s'agit en effet de la coordination entre un rythme perçu et un rythme moteur. Au siècle dernier, Fraisse (1966) a proposé d'appréhender la synchronisation sensorimotrice chez l'adulte et l'enfant à travers la tâche de « tapping », simple d'un point de vue moteur. Il s'agit simplement pour le sujet de coordonner un tapotement rythmique du doigt de la main dominante avec un stimulus régulier. Cela reste la méthode d'étude expérimentale la plus courante (pour une revue voir Repp & Su, 2013 ; Repp, 2005). Au moyen de cette tâche, on examine le **tempo-moteur spontané**, la **synchronisation**, lorsque l'on demande au sujet de taper en coïncidence avec un rythme externe, et la **continuation**, lorsque celui-ci doit maintenir le rythme après le retrait du rythme externe. Dans cette tâche, il est possible d'utiliser des stimuli auditifs ou visuels (Repp & Su, 2005, 2013) bien que la synchronisation soit meilleure avec des stimuli auditifs (Repp & Pernel, 2004). La plupart des auteurs utilisent des essais de 30 frappes avec le retrait des trois premières frappes qui correspondent à l'établissement du rythme.

Dans cette tâche de tapping, on examine généralement trois indices de performance temporelle. Le premier est la moyenne des intervalles produits pendant l'essai que l'on appelle **Inter-Tap-Interval** (ITI). L'ITI permet d'évaluer si l'intervalle produit correspond bien à

l'Intervalle-Inter-Stimuli / **Inter-Stimulus-Interval** (ISI), autrement dit si les participants ont bien intégré l'intervalle demandé. Pour la phase de synchronisation, on peut également examiner le calage de phase: anticipation ou retard par rapport au stimulus (Repp, 2005). Quand la synchronisation est bonne, et le rythme suffisamment familier, on note une légère anticipation des frappes. Ceci est le signe que le sujet a bien intégré le rythme et anticipe alors l'apparition du prochain stimulus. Il ne se contente pas de taper juste après avoir entendu le stimulus. Le second indice, que l'on peut calculer, est une mesure de la précision des frappes à travers l'erreur moyenne ou Absolute Error : $Abs(error)$ (Jones et al, 2011). On calcule alors, pour chaque frappe, la déviation par rapport à l'Inter-Stimulus-Intervalle (ISI), et on fait la moyenne de toutes ces déviations. Le troisième indice caractéristique de la synchronisation est sa variabilité. On examine ici la variabilité des frappes au cours de l'essai, c'est-à-dire la déviation standard (SD) des ITI. Toutefois quand on travaille chez l'enfant, il est important de regarder le profil de leurs frappes au cours de l'essai, afin de vérifier que l'on n'ait pas une accélération du rythme, qui résulterait de l'oubli de l'intervalle cible. Par ailleurs, comme nous le verrons à travers les modèles de synchronisation, on peut dissocier dans la performance de synchronisation ce qui relève de la variabilité d'origine motrice, périphérique, de ce qui relève de la variabilité temporelle, d'origine plus centrale. On peut pour cela utiliser la procédure de Wing et Kristofferson (1973) décrite par Ivry & Hazeltine, (1995). Toutefois, ce calcul s'avère difficile d'utilisation pour les études chez l'enfant, à cause de la variabilité de leurs frappes. Par ailleurs, des tâches de perception peuvent être utilisées de façon explicite ou implicite, comme pour la perception des durées. Dans le premier cas, on donne clairement aux participants la consigne de prêter attention au rythme et de l'apprendre. Dans le second cas, les sujets voient ou entendent un rythme, mais ne reçoivent aucune consigne temporelle. Ils ne sont pas informés que l'on examine leurs compétences de synchronisation. Toutefois, cette méthode n'est pas forcément idéale dans le cas de la synchronisation car il faut pouvoir détecter le moment où le

sujet se synchronise au rythme externe. Or parfois, certains enfants ne se synchronisent jamais au rythme externe. Il faut donc utiliser des méthodes d'enregistrement fines des mouvements, avec des vidéos ou systèmes d'eye-tracker. Les chercheurs ont donc utilisé ces méthodes chez les jeunes enfants, âgés de moins de 2 ans (Provasi et al., 2017). Dans le cadre de cette thèse, comme nous avons travaillé avec des enfants d'âge verbal, âgés de 3 ans et plus, nous avons utilisé des méthodes classiques, explicites, de production et de discrimination de rythmes.

3. Développement des compétences rythmiques

3.1. La synchronisation chez le bébé

Dès la naissance, les bébés produisent différentes activités rythmiques (Droit, Provasi & Pouthas, 1993). Parmi ces activités rythmiques, on trouve de nombreuses stéréotypies motrices. En 1979, Esther Thelen, a relevé plus de 47 mouvements rythmiques implicites de la tête, du corps ou des pieds, comme l'activité de pédalage (Kicking). Des études récentes (Provasi, Anderson & Barbu-Roth, 2014 ; Tartas, 2016) ont montré que dès les premiers jours de vie, les bébés bougent spontanément en rythme quand ils entendent de la musique. Ceci suggère que la capacité à intégrer des rythmes externes est innée, ou du moins, fait partie des habiletés précoces. (Honing, 2012 ; Hannon & Trehub, 2005 ; Hannon, et al., 2018 ; Ilari, 2015 ; Winkler et al, 2009 ; pour une revue, Provasi et al., 2014). Dans son travail de thèse, Joëlle Provasi (1988) a montré comment les nouveaux nés et les nourrissons âgés de 2 mois parviennent à modifier le rythme de leurs actions pour obtenir quelque chose de plaisant (musique) Dans son étude, elle a enregistré dans une phase de ligne de base la succion non nutritive qui a pour propriété d'être un mouvement d'une grande régularité très comparable au tempo-moteur-spontané. Les bébés ont rapidement appris à réduire leur pause inter-succion de 15% par rapport à la médiane de leur rythme de succion de base pour entendre plus souvent la musique. Cette

capacité précoce à moduler le rythme de l'activité de succion non nutritive a depuis été confirmée par Bobin-Bègue, et ses collègues (2006).

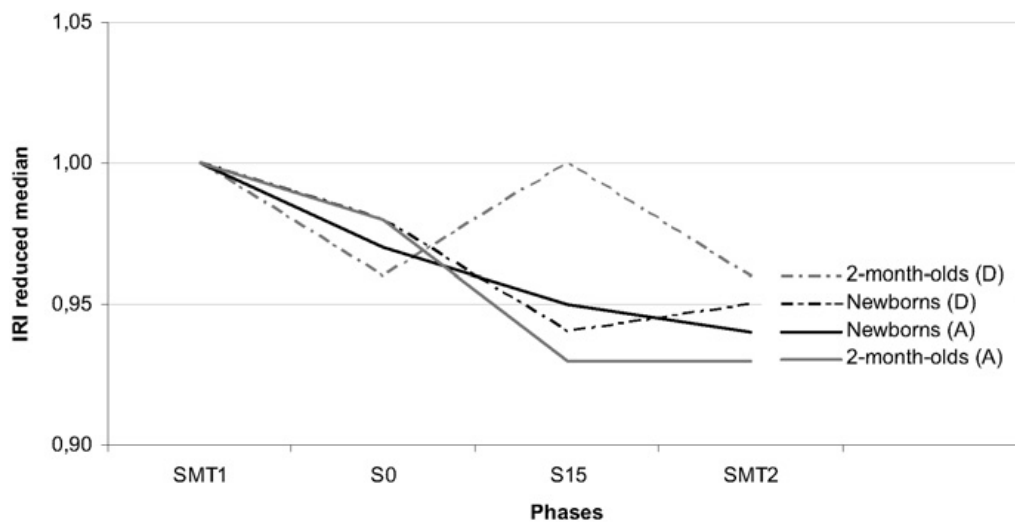


Figure 25 : Médianes des Intervalles-inter-réponses des nourrissons (rythme de succion) en phase de ligne de base (SMT1), en phase de synchronisation avec un rythme identique TMS (SO), Avec un rythme déviant de 15% du TMS (S15) et enfin à l'arrêt du rythme (continuation SMT2) en accélération (A) et en décélération (D) (d'après Bobin-Bègue, Provasi & Pouthas, 2006).

Dans cette étude elles ont montré que les nourrissons de deux mois sont capables d'accélérer leur rythme interne de succion pour le synchroniser avec un rythme externe, mais seulement si ce rythme externe reste proche de leur tempo moteur spontané. Avec une méthode sophistiquée d'analyse du regard, Provasi et al. (2017) ont montré que les nourrissons de 2 mois sont même capables d'anticiper l'occurrence simultanée de deux événements. Dans cette étude, les nourrissons étaient placés devant un écran, sur lequel défilait de haut en bas un rond bleu. Lorsque le rond atteignait le bas de l'écran, un bip sonore retentissait créant ainsi une synchronie perceptive. Les nourrissons regardaient alors significativement plus longtemps la zone de l'écran où avait lieu la synchronisation perceptive. Ceci révèle leur capacité à détecter la simultanéité de deux événements. En résumé, les bébés sont capables non seulement de produire des rythmes réguliers, mais aussi de moduler leurs rythmes pour répondre aux

exigences de l'environnement et de détecter voire d'anticiper la synchronisation temporelle entre deux stimuli.

Certains auteurs sont cependant allés encore plus loin en examinant dans les détails les capacités des bébés à percevoir la métrique d'un rythme (Hannon & Trehub, 2005 ; Bergson & Trehub, 2006). A l'aide de la méthode de l'attention préférentielle, Hannon et Johnson (2005) ont montré que les bébés de 7 mois sont capables de différencier des structures rythmiques binaires ou ternaires. Dans leur étude, les bébés étaient placés devant un écran d'ordinateur, assis sur les genoux de leurs parents. Les stimuli rythmiques (ISI, 200, 400 et 600 ms), étaient présentés de façon audio-visuelle, c'est-à-dire que le rythme audio était associé à une alternance de damiers noirs et blancs. La métrique binaire ou ternaire du rythme était alors générée par l'accentuation (intensité plus forte) de certains sons. Lors d'une phase d'apprentissage, les bébés observaient et entendaient la métrique, soit binaire soit ternaire d'un rythme. Puis quand leur temps de fixation de l'écran diminuait de façon significative, (apprentissage contrôlé par l'habituation) la phase test débutait. Les bébés étaient alors exposés à des rythmes de métrique identique ou différente. Les résultats ont montré que les bébés regardaient plus longtemps les rythmes de métrique différente, cette réaction à la nouveauté rendant compte de leur capacité de discrimination.

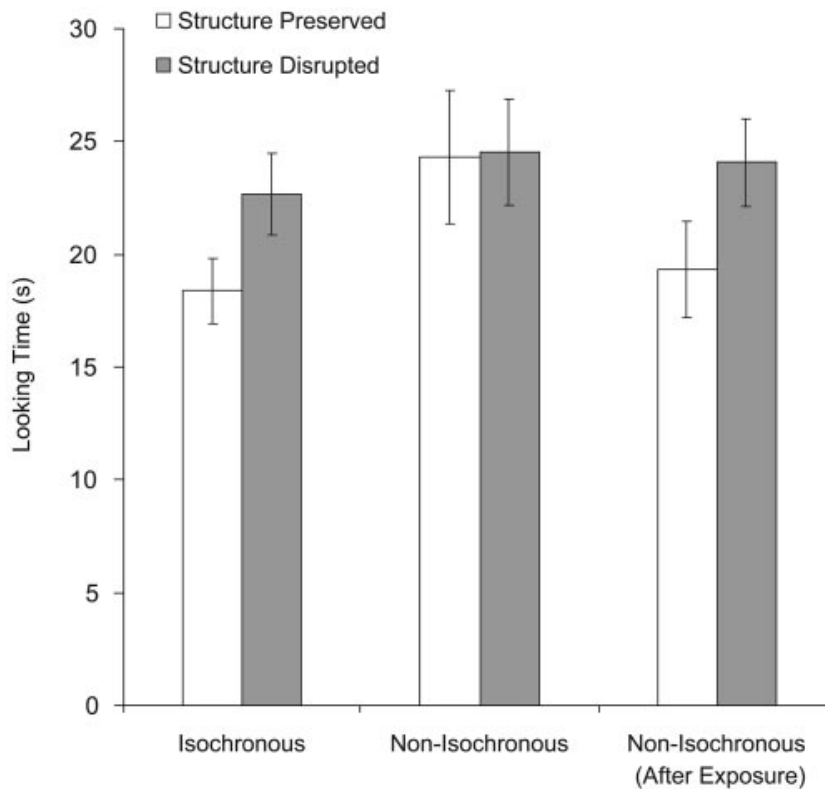


Figure 26: Temps de fixation des enfants de 11 mois à l'écoute de rythmes dont la structure est perturbée ou non, à l'écoutes de rythmes typiques de leur culture (isochronous) de rythmes atypiques (non-isochronous ou syncopés) et atypiques mais après familiarisation (d'après Hannon & Trehub, 2005).

Dans une autre étude, Hannon et Trehub (2005) ont montré que des enfants de 11 mois peuvent également faire la différence entre une musique dont les notes tombent sur l'intervalle, ou bien une de ses harmoniques rythmiques, telles que l'on en rencontre habituellement en occident, et une musique avec un rythme syncopé où la décomposition du rythme n'est pas classique. Ainsi, les nourrissons sont capables de catégoriser des mélodies selon leur type de structure, ainsi que de percevoir une altération de la structure rythmique pour peu qu'elle soit connue, comme cela est illustré sur la figure 25. En résumé dès le plus jeune âge, l'enfant perçoit et produit différents rythmes, même des rythmes complexes. Il fait également preuve de plasticité rythmique dans le sens où il est capable de modifier son rythme interne (ex : succion non nutritive) pour produire un effet sur ses mouvements.

On peut comprendre cette plasticité rythmique précoce car elle est fondamentale dans le cadre de la communication mère-enfant. Ceci a été montré dans différentes recherches notamment celles menées par Feldman (2006) et Feldman et al, (2011). Ces auteurs ont montré que les rythmes physiologiques, notamment le rythme cardiaque, des mères et des nourrissons sont synchronisés (Brazelton et al., 1974). Toutefois, dans ces études, il est difficile de savoir qui s'adapte au rythme de l'autre, si c'est l'enfant ou la mère, ou encore, s'il s'agit d'une adaptation mutuelle. Berniéri et ses collègues (1998) ont montré que ce sont principalement les mères qui ralentissent le rythme de leur communication lorsqu'elles s'adressent à leur bébé pour assurer une bonne de relation mère-enfant. En effet, même si l'enfant est capable de modifier son rythme interne pour s'adapter à un rythme externe, il n'y parvient que si ce rythme externe ne s'éloigne pas trop de son rythme interne. Le développement des compétences rythmiques consiste donc notamment en l'élargissement des possibilités d'adaptation à des rythmes de fréquence plus variées. La question est de savoir à quoi est due cette difficulté d'adaptation. Les travaux avec les enfants plus âgés et avec des tâches plus complexes permettent de répondre en partie à cette question.

3.2 le développement de la synchronisation chez l'enfant

A partir de 2ans ½ -3 ans, les capacités motrices des enfants évoluent de sorte qu'ils peuvent réaliser de nombreuses tâches de synchronisation, notamment la tâche de tapping utilisée chez l'adulte. Avec cette tâche, on observe que l'évolution de l'activité rythmique, de la petite enfance à l'âge adulte, se caractérise par 4 éléments : un **allongement du tempo moteur**, une **plus grande flexibilité** dans la production de rythmes, une **amélioration de la précision** et de la **régularité temporelle** (Drake et al., 2000 ; McAuley et al., 2006 ; Fraise, 1966 ; Provasi et Bobin-Bègue, 2003, 2008 ; Graff & El Methni, 2011).

Tempo moteur spontané

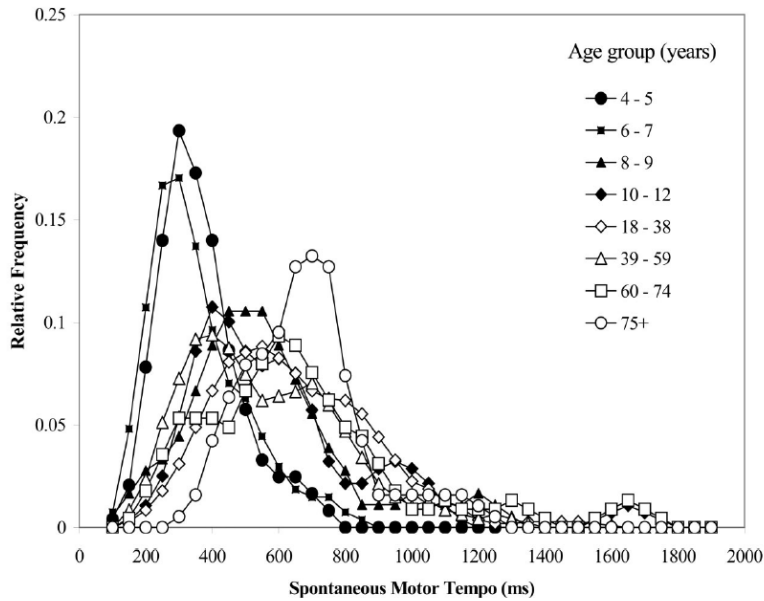


Figure 27 : Distribution de la fréquence du TMS en fonction de l'âge (d'après McAuley et al., 2006).

Concernant le tempo moteur spontané, la plupart des chercheurs s'accordent pour dire qu'il varie au cours du développement, les enfants produisant un TMS plus rapide que les adultes (figure 27). Selon Provasi et Bobin-Bègue (2003), Bobin-Bègue et ses collègues (2006) et Getchell (2006), l'ITI du TMS serait de 400 ms à l'âge de 2 ans $\frac{1}{2}$ et de 450 ms à l'âge de 3 ans. Il atteindrait 500 ms vers 5 ans, se rapprochant de l'ITI caractéristique du TMS des adultes qui se situe aux alentours de 600 ms. Ce ralentissement avec l'âge du TMS interroge les chercheurs. Pourquoi observe-t-on un ralentissement du TMS alors que la vitesse de traitement augmente avec l'âge (Kail, 1991). Aussi, certains auteurs comme McAuley et ses collègues, ont remis en cause cette idée d'évolution avec l'âge du TMS, considérant qu'il reste toujours de façon universelle autour de 500 ms. La différence dans la vitesse du TMS entre les âges serait alors due, soit à un effet confondu lié à la variabilité des frappes, plus importante chez le jeune enfant, soit à leur impulsivité motrice. En effet, comme pour les traitements des durées,

on voit que la variabilité dans les productions temporelles est beaucoup plus importante chez le jeune enfant tel qu'illustré sur la figure 28.

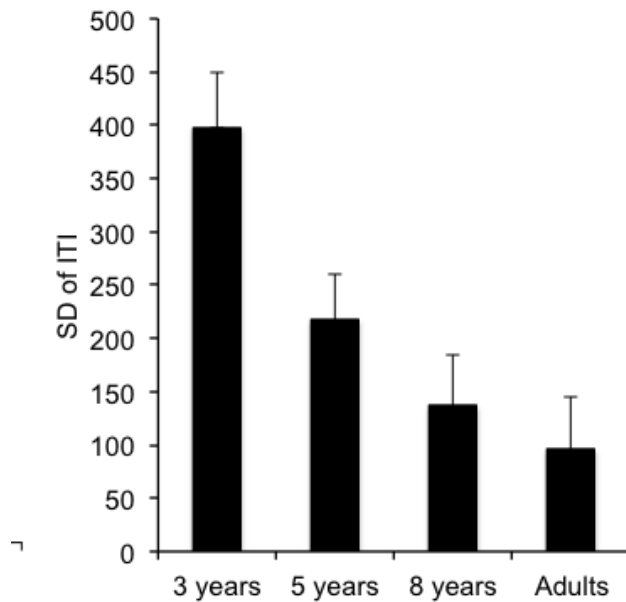


Figure 28 : Réduction de la Variabilité du TMS avec l'âge (d'après Monier & Doit-Volet, 2016)

L'impulsivité motrice, autrement dit le défaut d'inhibition, pourrait quant à elle conduire à une forme d'emballlement de la frappe. Certaines études ont mis en évidence une accélération transitoire du TMS vers 8 ans probablement liée à la maturation des capacités motrices (Fraisie, Chambon, & Oléron, 1954). On peut donc émettre l'hypothèse que le TMS plus rapide chez le jeune enfant est lié à ses difficultés sur le plan de la motricité et de l'inhibition motrice. Il est également possible que le tempo moteur spontané ne dépende tout simplement pas de la vitesse de traitement, mais soit sous la dépendance d'autres processus, ce que nous avons essayé de trancher dans l'une de nos études.

En conséquence, on pourrait remettre en cause l'utilisation de la tâche de tapping pour l'étude du TMS chez le jeune enfant du fait de ce risque d'effet confondu de la variabilité des ITI dans le calcul de leurs moyennes. Cependant, cette tâche reste encore une méthode de choix de par sa facilité de mise en œuvre et son utilisation possible auprès d'enfants très jeunes, âgés

de 2 ans ½. C'est du reste pour cette raison que je l'ai également utilisée dans mes propres recherches. Cependant j'ai pris la précaution d'évaluer les capacités des enfants sur le plan de la motricité, ainsi que leurs capacités attentionnelles, au moyen de tests neuropsychologiques.

Synchronisation

Concernant les performances de synchronisation des enfants âgés de 3 à 5 ans, leurs frappes ne sont pas toujours synchronisées avec le rythme externe. Cela se traduit par une moindre précision temporelle par rapport aux enfants de 8 ans et aux adultes (Drake et al. 2010 ; Provasi & Bobin-Bègue, 2008). Ce manque de précision est d'autant plus grand que l'intervalle-inter-stimulus diffère de leur intervalle naturel, de leur TMS. En fait, avant l'âge de 6-7 ans, les enfants produisent des ITI qui restent proches de celui de leur Tempo moteur spontané. Comme les adultes, ils peuvent se synchroniser sur une certaine gamme de fréquences (Repp & Su, 2013). Cependant la gamme de fréquences à laquelle ils peuvent se synchroniser est plus réduite comme cela est illustré sur la figure 29 (Provasi & Bobin-Bègue, 2008). Avant 4 ans, la synchronisation avec des stimuli auditifs n'est possible que pour des fréquences proches du TMS, c'est-à-dire comprises entre 400 et 600 ms. Dans cette gamme de fréquences, et en présence d'un rythme externe, l'enfant, même âgé de 3 ans réussit à accélérer ou à ralentir son propre rythme pour s'approcher du rythme externe. Au-delà de cette gamme de fréquences, le tempo de l'enfant n'est pas modifié par le rythme externe. A partir de 5- 6 ans, on note cependant une extension de la gamme de fréquences possibles avec une amélioration de la précision de l'intervalle. Cette plus grande précision temporelle s'observe d'abord lorsqu'il s'agit d'accélérer les frappes par rapport au TMS, puis, plus tard, lorsqu'il s'agit de les ralentir. Chez l'adulte, cette gamme de fréquences est plus étendue le sujet pouvant se synchroniser avec des ISI allant de 150 ms au minimum jusqu'à 1.8 s. Vers l'âge de 7-8 ans, la flexibilité des enfants en synchronisation, ou l'étendu de la gamme de fréquences que l'enfant peut produire, devient comparable à celle des adultes (Drewing, Aschersleben, & Li, 2006).

Concernant la régularité des frappes, comme pour la tâche de TMS, on observe chez l'enfant une variabilité très importante surtout chez les plus jeunes. Celle-ci se réduit de manière très progressive avec l'âge. Sur cette dimension, les compétences atteignent celles de l'adulte seulement à l'adolescence (Thompson et al., 2015). La variabilité des frappes est donc une des caractéristiques principales du développement des comportements de synchronisation.

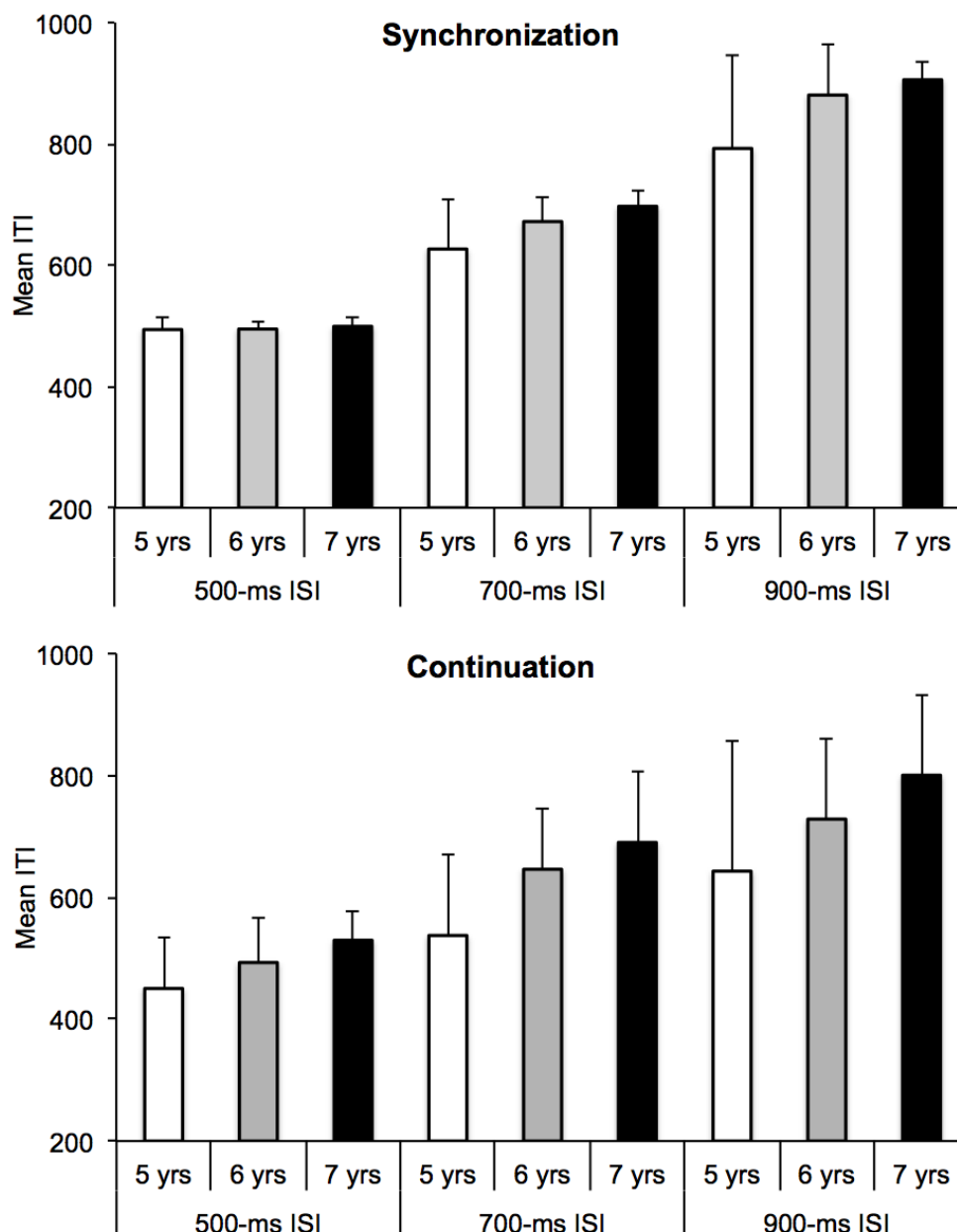


Figure 29 : Evolution des moyennes des ITI produits par les enfants avec l'âge, selon la tâche et l'intervalle demandé (d'après Monier & Droit-Volet, 2019).

Continuation

Pour la continuation, on note chez l'enfant une différence importante entre les phases de synchronisation et de continuation comme on peut le voir sur la figure 29. En effet, la capacité de maintenir le rythme chez l'enfant est plus transitoire que chez l'adulte (Provasi & Bobin-Bègue, 2008). Non seulement les jeunes enfants ont du mal à produire un rythme plus lent que leur TMS pendant la synchronisation, mais à l'arrêt du rythme externe à l'âge de 3 et 5 ans, ils perdent totalement le rythme demandé et frappent à nouveau à leur vitesse naturelle, celle du TMS. Les enfants âgés de 8 ans, par contre, parviennent à maintenir un rythme différent de leur tempo moteur spontané. Dès l'arrêt du rythme externe, ils accélèrent néanmoins par rapport à la phase de synchronisation. La variabilité durant la phase de continuation est plus élevée que pendant les autres phases, et ce d'autant plus que les enfants sont jeunes (Drewing et al., 2006). Ces observations sont intéressantes car elles confirment ce que nous avons vu au niveau des durées et des structures cérébrales, comme le cortex préfrontal dorso-latéral et de la SMA qui sont supposées être capables de maintenir les nouvelles oscillations corticales (Buonomano & Laje, 2011), et dont la maturation est tardive (Rubia, 2013 ; Rubia et al., 2000 ; Paus, 2005).

Ainsi, les différences dans les trajectoires de développement entre les différentes phases de la synchronisation (TMS, synchronisation, continuation) appuient l'idée selon laquelle l'activité de synchronisation ne correspond pas à une fonction unitaire. Il faut donc examiner ces différentes phases en isolant chaque composante que les chercheurs ont essayé de mettre en évidence dans leurs modèles.

4. les modèles spécifiques de la synchronisation

4.1. Le modèle de la synchronisation sensorimotrice de Wing et Kristofferson

L'idée même de synchronisation, ou de production de rythmes, implique celle de temps, de l'intervalle de temps constitutif du rythme. Parfaitement conscients de cette dimension temporelle du rythme, Wing et Kristofferson (1973) ont proposé un modèle basé sur les différentes sources de la variabilité lors de l'activité de synchronisation. Leur modèle reste le modèle de référence, il demeure la source d'inspiration principale pour les études sur le rythme (Ivry & Hazeltine 1995). Sur la base d'une série d'études qu'ils ont réalisées dans les années 70, ils ont proposé que la variabilité des frappes lors d'une tâche de synchronisation serait due à deux composantes de l'activité de synchronisation qui sont distinctes et indépendantes entre elles tel qu'illustré sur la figure 30.

$$C_j = R_j + W_j$$

Interval produced Duration independent Duration dependent

Motor component

Figure 30 : Les deux composantes du modèle de Wing et Kristofferson : la variabilité totale de l'intervalle produit C_j est égale à la somme de la variabilité due à la composante périphérique R_j et de la variabilité due à la composante temporelle W_j .

La première composante serait périphérique et associée au système moteur. Elle résulterait de l'imprécision causée par la réalisation du geste par le système musculo-squelettique et son innervation. La seconde serait une composante plus centrale. Elle correspondrait au traitement de l'intervalle de temps à implémenter dans le système moteur.

Ainsi, ce modèle est le premier à identifier, dans les activités rythmiques, des activités propres à la perception du temps et à son encodage. Le traitement du temps dans la synchronisation est donc tout à fait indépendant de la composante motrice. Ce modèle est fort intéressant car il permet de séparer la part de variabilité liée à de faibles habiletés motrices de celle liée aux difficultés de perception temporelle. On peut alors repérer les causes des changements dans les capacités de synchronisation avec l'âge. Ces causes peuvent être motrices, temporelles ou encore impliquer les deux composantes. Or l'évolution de ces deux composantes avec l'âge et l'influence de leur développement sur l'activité de synchronisation n'a pas été étudié jusqu'à présent. Comme nous le verrons, c'est ce que nous avons essayé de faire dans nos études sur le développement de la synchronisation en utilisant le modèle de Wing et Kristofferson (1973) et en évaluant les capacités motrices et cognitives des jeunes enfants au moyen de tests neuropsychologiques. Cependant revenons au modèle de Wing et Kristofferson qui a toutefois été remis partiellement en cause à la suite des résultats des études en imagerie qui ont souligné l'implication majeure des zones motrices dans les tâches de perception des durées (Wiener, Turkeltaub & Coslett, 2010 ; Coull, Cheng & Meck, 2011). En effet, il est possible que les compétences motrices soient impliquées non seulement dans la production du geste mais aussi dans la formation de la représentation de l'intervalle en lui-même. Par ailleurs, le modèle de Wing et Kristofferson ne dit rien de la relation entre le traitement des rythmiques et les capacités cognitives. Il ne permet donc pas d'expliquer le développement des habiletés de synchronisation si ce n'est à travers la progression des capacités motrices. Or le développement de la synchronisation ne se réduit pas à l'amélioration des capacités motrices. Aussi, en parallèle du modèle de Wing et Kristofferson, Large et Jones (1999) ont développé un modèle plus cognitif du rythme.

4.2. Le modèle du « **dynamic attending** »

Le modèle du « **dynamic attending** » est une extension des modèles d'oscillateurs neuronaux tels que nous les avons décrits au chapitre 1. Il suggère que le codage du temps se fait de façon automatique à travers l'activation dynamique des groupes de neurones. L'intérêt de ce modèle proposé par Large et Jones (1999), c'est qu'il offre un point de vue différent sur la relation rythmes-cognition en suggérant une régulation automatique de l'attention par les rythmes (voir aussi, Jones, 1976 ; Barnes et Jones, 2000 ; Jones et al., 2002 ; Drake et al., 2000). Les résultats d'une étude de Khalil et ses collègues (2013) sont en accord avec cette idée. Ces auteurs ont mesuré le comportement attentionnel d'enfants au moyen d'échelles standardisées diagnostiques des troubles de l'attention (échelle de Conners) remplies par les enseignants. Puis, pendant les cours de musique, ces auteurs ont utilisé des instruments permettant d'enregistrer et d'analyser les frappes de chacun des enfants lors d'exercices rythmiques collectifs. Ils ont ainsi mis en évidence une corrélation entre les compétences rythmiques des enfants, en particulier la précision des frappes et leur comportement attentionnel en classe.

Le modèle du « **dynamic attending** » explique ce lien entre les compétences rythmiques et les capacités attentionnelles en postulant que les oscillations neuronales, avec leur période et leur phase, ne serviraient pas uniquement au traitement des intervalles de temps (Large & Jones 1999) mais moduleraient les ressources cognitives disponibles, de manière oscillatoire via l'activation périodique des groupes de neurones corticaux (Chapin et al., 2010 ; Lakatos et al, 2008 ; Mento et al., 2018). En temps normal, la modulation périodique de l'attention se ferait suivant le rythme interne, mais, celui-ci serait modifié par le rythme d'un stimulus externe. De telles activations périodiques ont été observées dans le cortex somato-sensoriel de plusieurs espèces animales ce qui valide cette hypothèse (Kötz et al., 2018). Nous aurions donc une optimisation des ressources cognitives disponibles en synchronisation avec l'apparition périodique du stimulus (Lakatos et al., 2008).

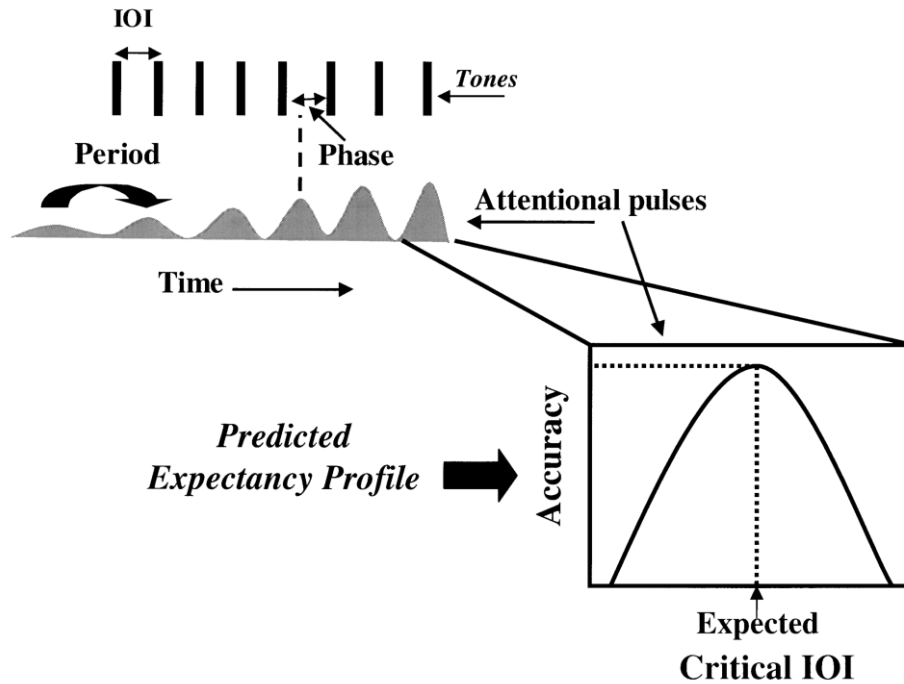


Figure 31 : Illustration du modèle du « dynamic attending », ou entraînement de l'attention, (d'après Jones et al., 2002)

Cette modulation oscillatoire de l'attention serait impliquée dans la perception de la métrique du langage (Kotz & Schwartz, 2016) et de la syllabe chez le jeune enfant (McAuley et al., 2006). Sur la base de ce modèle, McAuley et ses collègues (2006) proposent une hypothèse concernant le tempo moteur spontané. Selon eux, la raison pour laquelle le TMS des jeunes enfants est plus rapide que celui des adultes est liée à la modulation de l'attention lors de l'apprentissage du langage. Chez les moins de 1 an, comme tous les mots ne sont pas encore connus, le travail perceptif s'effectue au niveau de la syllabe (Ramus et al., 1999). L'attention doit donc être disponible à la fréquence correspondant au début des syllabes dans le flux perceptif, c'est-à-dire à moins de 200 ms d'intervalle. En revanche, comme les adultes, les enfants plus âgés portent leur attention sur les mots à une fréquence correspondant à environ 500 ms d'intervalle. Les nombreux travaux menés sur les liens entre aptitudes rythmiques et apprentissage du langage oral à défaut de confirmer directement cette hypothèse ont confirmé l'existence d'un lien étroit entre les compétences rythmiques et le développement du langage

(Tierney, & Kraus, 2013 ; Gordon, Jacobs, Schuele & McAuley, 2015 ; Gordon et al., 2015 ; Wieland et al., 2015). D'ailleurs les récents travaux sur les enfants souffrant de dyslexie évoquent un problème d'ordre temporel (Huss et al., 2011 ; Casini et al., 2018 ; Thomson, & Goswami, 2008).

Une telle conception de la modulation automatique de l'attention par le rythme permettrait d'expliquer ces capacités rythmiques précoces (Bobin-Bègue, Droit-Volet, & Provasi, 2014). Ainsi, le fait que le rythme puisse être traité plus précocement que la durée pourrait être due aux propriétés intrinsèques du stimulus rythmique. L'idée est qu'au moyen de l'activité dynamique des populations de neurones, le traitement du rythme dépendrait de l'entraînement des oscillateurs et se ferait de façon automatique (Tal et al., 2017 ; Lewis & Miall, 2003b). Ceci n'aboutissant pas forcément à une représentation cognitive des intervalles constitutifs du rythme. Les difficultés rythmiques des jeunes enfants relèvent donc plus de problèmes moteurs ou des écarts de fréquences entre leur rythme interne et les rythmes externes. En revanche, le traitement d'une durée isolée ne permettrait pas forcément de moduler l'attention de façon automatique. Ceci expliquerait des différences de trajectoire de développement entre le traitement du temps dans un rythme et du temps pour une durée isolée, le développement étant plus précoce dans le premier cas que dans le second. Etant donné le développement des fonctions exécutives, les jeunes enfants ne seraient donc peut-être pas en mesure de maintenir leur attention dirigée vers la durée pour l'intégrer, du moins selon la tâche et le contexte d'estimation du temps comme nous l'avons vu dans le chapitre 3 consacré au développement du jugement des durées isolées. Peut-être que l'extraction de la durée à partir des oscillations neuronales nécessite un effort cognitif supplémentaire voire un effort continu contrôlé associé au jugement explicite du temps.

Les modèles des oscillateurs, dont celui du dynamic attending expliquent comment, à partir d'un stimulus rythmique auditif ou visuel, nous sommes capables d'intégrer un rythme

externe, via nos aires sensorielles puis l'entraînement de nos oscillateurs neuronaux. A partir de là, nous pouvons utiliser ce rythme d'oscillation neuronale soit pour produire des mouvements, soit pour améliorer notre perception (Grahn, 2012). Toutefois, dans le modèle de Large et Jones, (1999), il n'est pas fait mention d'un rôle quelconque de la motricité dans la perception du rythme, et quand la motricité est envisagée, celle-ci est considérée comme indépendante du traitement temporel. Or même en ce qui concerne la perception du langage, certains auteurs ont observé une activation des aires motrices du langage (l'air de Brodmann) lors d'une simple tâche d'écoute de rythmes (pour une revue Zatorre, Chen & Penhune, 2007). Comme pour l'activation de la SMA dans la perception des intervalles de temps, cette activation repose la question du rôle des aires motrices et donc du rôle de l'action ou de la simulation de l'action dans la perception des intervalles temporels.

4.3 Un modèle alternatif : l'intégration sensorimotrice du rythme

L'activation constante des aires motrices lors des tâches rythmiques, y compris des tâches purement perceptives, ont conduit certains auteurs à envisager un codage **sensori-moteur** des intervalles temporels. Cette conception est défendue dans la théorie du codage commun, dite en anglais « common coding theory » (Prinz, 1990, 1997; Hommel et al., 2001). Selon cette théorie, nos actions, leur planification et leur exécution, sont codées en même temps que leurs conséquences sur l'environnement en une représentation unique partagée. Ce codage commun peut donc être influencé à la fois par les informations issues de la perception et par les informations issues de l'action. Ceci a pour conséquence que l'action aide la perception en permettant un codage plus complet de l'information. Cette idée se rapproche de celle d'une **incarnation du rythme** de Barsalou (2009) (Cox, 2011) que nous avons précédemment évoqué en parlant de la théorie du temps incarnée ou « time embodiment » (Droit-Volet et al., 2013; Wittmann, 2015 ; Wittmann, & van Wassenhove, 2009). Selon la théorie de l'incarnation du

rythme, le fait de vivre le rythme d'un point de vue moteur, par la réalisation de la synchronisation sensori-motrice ou sa simulation mentale, permettrait d'améliorer le codage de ce rythme (Haueisen, & Knösche, 2001; Chemin et al., 2014 ; Patel, & Iversen, 2014). En d'autres termes, il s'agirait là d'une forme d'apprentissage associatif (Heyes & Ray, 2000; Heyes, 2010) dans lequel l'intégration sensorimotrice se ferait au moyen d'un codage temporel de l'action (Leman, 2010; Cox, 2011; Maes, Leman, Palmer & Wanderley, 2014).

Cette conception d'un codage sensori-moteur du temps est en accord avec les résultats des études en imagerie montrant l'activation des aires motrices dans la plupart des tâches temporelles (Coull, Cheng & Meck ; 2011 ; Wiener, Turkeltaub & Coslett, 2010). Cette idée est particulièrement intéressante en ce qui concerne le traitement des durées courtes (<1 s) comme celles impliquées dans les séquences rythmiques. En effet, le temps est inhérent à l'action, il est intégré dans l'organisation des actions, la succession des gestes, la coordination sensorimotrice et le déclenchement de l'action au bon moment. Ainsi, l'idée d'un codage sensorimoteur, c'est-à-dire d'un codage directement utilisable par le système moteur pour s'adapter sans délai aux modifications de l'environnement semble assez séduisante bien qu'il soit difficile avec mes études expérimentales de trancher entre ces modèles. Nous reviendrons donc sur cette idée à la fin de notre introduction. Cependant, nous terminerons ce chapitre sur le rythme en examinant les travaux sur les émotions et le rythme. En effet, nous nous sommes aussi intéressés à cette question car il s'agit d'un contexte dans lequel on peut clairement observer une modification des rythmes internes en réponse aux modifications de l'environnement.

5. Rythmes et tendance d'action : l'effet des émotions

Nous avons vu que le rythme interne peut être entraîné par un rythme externe. Une modification du rythme interne s'observe aussi dans un contexte émotionnel. En l'occurrence, la qualité de la synchronisation interpersonnelle dépend de notre capacité à détecter l'état émotionnel de l'autre. Si la mère d'un enfant se met en colère, il est préférable pour celui-ci d'accélérer pour ne pas accentuer sa colère. Toutefois, les mécanismes qui nous permettent de moduler notre rythme en fonction de celui d'autrui ne sont pas tout à fait élucidés. On peut supposer que cette synchronisation se base essentiellement sur la perception du rythme de la parole de l'autre. Nous parlons en effet plus vite lorsque nous sommes en colère ou stressés. Mais le son du langage est-il le seul indice pertinent pour la synchronisation sociale interpersonnelle? Cela semble peu probable. Nous savons qu'il existe de nombreux indices non verbaux de communication qui peuvent être utilisés pour la synchronisation interpersonnelle. En accord avec Pineda et Hecht (2009) qui suggèrent une simulation des rythmes d'autrui en situation de communication, nous émettons l'hypothèse que le partage de certaines émotions influence notre rythme et favorise la synchronisation interpersonnelle (Xavier et al., 2013). En lien avec la théorie de l'embodiment du rythme, les études menées sur les émotions montrent qu'en situation de communication, nous avons tendance à intégrer les émotions d'autrui au moyen d'une simulation motrice de ces émotions, par ce qui s'appelle le mimétisme des expressions faciales (Niedenthal et al., 2006 ;). Quand on empêche ce mimétisme, en mettant par exemple un stylo entre les lèvres des sujets (Oberman et al., 2007), la reconnaissance des émotions de l'autre et leur intensité diminue.

Récemment, Droit-Volet et Provasi (2015) ont montré que les expressions faciales émotionnelles ont un effet sur les rythmes chez l'adulte comme sur la perception des durées. Dans cette étude, les sujets devaient se synchroniser (durant 30 frappes) au rythme externe généré par la présentation du stimulus émotionnel, en l'occurrence des visages exprimant la

peur, la colère ou la joie, puis, ils devaient maintenir le rythme des frappes durant une phase de continuation de 33 frappes. Les résultats de l'étude, ont montré que les participants ont accéléré leurs frappes en face d'un visage présentant une émotion négative et fortement activatrice. Toutefois, ceci n'apparaît qu'après la phase de synchronisation, à l'arrêt du stimulus rythmique, c'est-à-dire uniquement en phase de continuation. Ainsi, il semble que pendant la synchronisation, les sujets soient restés en synchronie avec le rythme externe dont la présence a limité les effets de distorsion temporelle

En revanche, en phase de continuation, privé du repère du rythme externe, l'activation physiologique engendrée par les expressions faciales émotionnelles a produit une accélération du rythme de la frappe. Ainsi, il semble que pour les rythmes, comme pour les durées, les émotions soient à l'origine de diverses distorsions temporelles automatiques (Droit-Volet & Meck, 2007). Les émotions négatives fortement activatrices, comme la colère ou la peur, auraient donc pour effet de générer une forme d'accélération de notre « horloge » interne conduisant à des ITI plus courts. Cette distorsion, révèle le caractère fortement adaptatif de la flexibilité de nos rythmes moteurs. Tout ceci permet une programmation rapide des mouvements réduisant le temps de réaction en cas de menace. Agir vite permet en effet d'assurer sa survie. Nous suggérons donc que l'intégration des émotions d'autrui et du rythme d'autrui modulerait notre propre rythme de manière automatique, comme nous l'avons vu dans les études sur émotion et durées. Ainsi un vécu émotionnel commun pourrait favoriser la synchronisation interpersonnelle, le partage des rythmes.

Conclusion et Synthèse de la problématique de thèse

L'objectif de mon travail de thèse était de mieux comprendre comment se construisent les compétences temporelles au cours du développement. Comme le suggèrent Droit-Volet et Coull (2018), les enfants pourraient apprendre la durée à travers l'association des expériences perceptives ou motrices au fur et à mesure de leurs expériences temporelles. Il existe comme nous l'avons vu de nombreux arguments en faveur d'un rôle prépondérant de l'action dans l'acquisition des connaissances temporelles. Etant donné la difficulté rencontrée par les plus jeunes enfants à traiter des durées isolées, c'est à travers des tâches temporelles motrices, peu exigeantes du point de vue cognitif, que l'on peut parvenir à mieux examiner le lien précoce entre action et temps, et l'évolution de ce lien au cours du développement. C'est pourquoi nous avons décidé dans ce travail de thèse d'utiliser essentiellement des tâches rythmiques basées sur des intervalles courts.

Les modèles des oscillateurs que nous avons évoqués suggèrent que ces durées courtes sont entraînées par des rythmes externes. Ainsi, chez l'adulte, si l'on modifie légèrement le rythme d'un stimulus externe, ce changement sans qu'il soit accessible à la conscience, modifie le rythme de la frappe des sujets (Repp 2005). Peut-on pour autant considérer que les performances rythmiques sont dénuées de toute activité cognitive ? La réponse est bien évidemment non. En utilisant un test de QI (le QI non verbal de l'échelle de Weschler), Troche et Rammsayer (2009) ont montré que les performances rythmiques sont systématiquement liées à l'intelligence. De même, Madison et al., (2009) ont mis en évidence une corrélation significative entre le score aux matrices de Raven et les performances rythmiques. Ces auteurs suggèrent en accord avec Troche et Rammsayer (2009) (voir aussi Helmbold et al., 2006 ; Tierney & Kraus, 2013) que les fonctions cognitives sont nécessairement impliquées dans le traitement des rythmes, parce qu'intelligence et compétences rythmiques découlent d'un fonctionnement neuronal harmonieux, d'une bonne synchronisation des oscillateurs corticaux.

De plus, l'activité de synchronisation ne se réduit pas au calage d'un rythme interne sur un rythme externe. Il faut aussi pouvoir maintenir ce même rythme en phase de continuation voire le rappeler ultérieurement. Aussi le rôle des fonctions cognitives peut varier selon le type de traitement du rythme (TMS, synchronisation, continuation). Pour cette raison nous avons étudié les performances d'enfants d'âges différents dans chacune des phases de l'activité de synchronisation.

L'âge très précoce d'acquisition de certains processus rythmiques, suggère en effet qu'il s'agit de processus innés reposant sur un traitement automatique (Kotz et al., 2018; Lewis & Miall, 2003). Toutefois, le développement cognitif peut concourir à une amélioration des compétences rythmiques. Comme l'élargissement avec l'âge de la gamme de fréquences à laquelle l'enfant peut s'adapter. Il est donc possible que le développement des fonctions attentionnelles, en lien avec la maturation lente du cortex préfrontal, favorise le calage du rythme interne avec des rythmes externes de plus en plus différents. De plus le développement des capacités cognitives, notamment l'attention, pourrait aider à une meilleure détection des déviations temporelles, et donc à la correction des erreurs de frappes. Enfin, comme nous l'avons dit, l'attention et la mémoire de travail sont indispensables aux traitements temporels, à leur encodage au fur et à mesure de l'écoulement du temps et à leur maintien en mémoire (Droit-Volet, 2013). Même s'il s'agit de durées courtes, celles-ci doivent être mémorisées et manipulées en mémoire de travail sous la forme de représentations cognitives (Rattat & Droit-Volet, 2005 ; Fortin & Couture, 2002). Aussi peut-on supposer que les fonctions cognitives et leur développement jouent un rôle non négligeable dans les activités de synchronisation. Or jusqu'à présent, aucune étude n'a examiné quelles fonctions cognitives précisément sont impliquées dans la performance des diverses tâches de synchronisation. Ainsi, nous ignorons si l'amélioration des compétences rythmiques au cours du développement est due au développement des capacités motrices fines, ou bien à l'amélioration de fonctions cognitives

spécifiques. En effet avec le développement on assiste à une évolution aussi bien des capacités de coordination motrice que d'attention et de mémoire de travail (Gathercole, et al, 2004 ; Pickering, 2001 ; Rubia, 2013). Par ailleurs, aucune étude n'a comparé l'influence de ces capacités motrices et cognitives lors de la phase de synchronisation avec leur influence en phase de continuation. Cela constitue un manque important dans la mesure où comme nous l'avons évoqué ces deux phases ne sollicitent pas ces fonctions de la même façon. Durant cette phase de continuation, l'enfant doit maintenir le rythme en l'absence du stimulus. Or, nous ignorons si le maintien du rythme se fait d'une manière automatique, par le système moteur en lui-même, ce qui semble peu probable, ou bien si les fonctions cognitives sont sollicitées durant la tâche pour le maintien en mémoire d'une représentation cognitive de l'intervalle.

Aussi, pour clarifier le rôle des fonctions cognitives et motrices dans les activités de synchronisation avons-nous décidé de mener une première étude avec des enfants âgés de 5 à 7 ans (Monier & Droit-Volet, 2019). Dans cette **étude 1**, nous avons soumis ces enfants à des tâches de synchronisation de difficulté variée en manipulant le rythme externe. De plus, nous avons évalué les capacités à la fois motrices et cognitives de chaque enfant au moyen de tests neuropsychologiques validés à cet effet. Enfin, nous avons utilisé la procédure de Wing et Kristofferson, pour dissocier la composante motrice de la composante temporelle dans leur activité rythmique.

Ensuite, comme nous l'avons suggéré au chapitre 2, l'apprentissage des durées chez l'enfant pourrait s'effectuer, au commencement, à travers l'intégration à la fois sensorielle et motrice des expériences temporelles (Piaget, 1946 ; Droit-Volet & Rattat, 1999, Coull & Droit-Volet, 2018). Cela suggère que chez les plus jeunes il existe bien un codage sensorimoteur de la durée. Une étude de Phillips-Silver et Trainor (2005) a montré que le fait de « vivre » un rythme aide les bébés à le reconnaître par la suite. Dans cette étude, les nourrissons écoutaient un rythme à la métrique ambiguë. Un groupe de nourrissons écoutait simplement le rythme,

tandis que l'autre groupe était bercé suivant ce rythme tout en l'écouter. Les bébés bercés sont parvenus à mieux discriminer les deux métriques par la suite comme on peut le voir sur la figure 32.

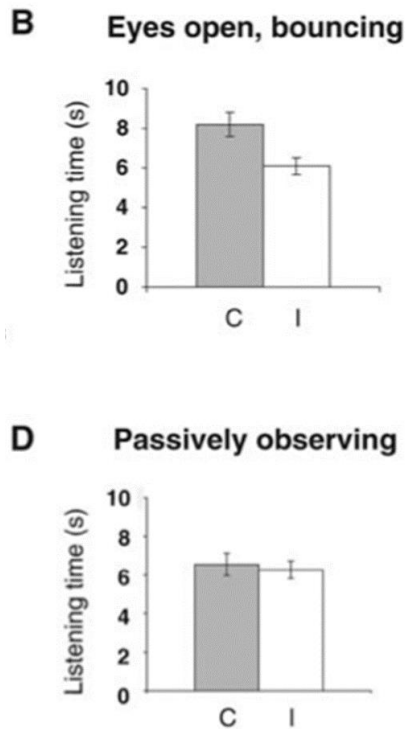


Figure 32 : Performance des bébés en discrimination de rythme ambigu lorsqu'ils ont été bercés pendant l'apprentissage B et lorsqu'ils ont simplement écouté D (Phillips-Silver & Trainor, 2005).

Ainsi, le mouvement a amélioré les performances perceptives des bébés comme nous le défendons dans cette thèse. Chez l'enfant l'action aide donc à la perception du rythme comme de la durée. La question toutefois est de savoir si l'action est encore utile pour le codage temporel à l'âge adulte, ou si les adultes ont accumulé suffisamment de connaissances temporelles pour se passer du recours à l'action étant capables d'un codage direct du temps. Quelques études ont cependant mis en évidence que la synchronisation sensorimotrice pendant l'apprentissage d'un rythme permet aussi chez l'adulte de rendre les stimuli rythmiques moins ambiguës (Su & Poppel, 2012), ils reconnaissent aussi mieux l'intervalle appris dans les tâches postérieures de discrimination temporelles (Iordanescu, et al., 2013; Manning & Schutz, 2013,

2016; Manning, Harris & Schutz, 2017). Une étude réalisée par Fautrelle et al. (2015) a également montré que le fait de s'imaginer réalisant les gestes de la synchronisation durant l'apprentissage permettait aux adultes d'améliorer leurs performances temporelles. Ceci suggère qu'une simulation du mouvement pourrait être suffisante chez les adultes pour améliorer l'apprentissage des rythmes. Enfin, Morillon et al., (2014) ont montré que le fait d'avoir réalisé la synchronisation sensorimotrice favorise la perception d'événements survenant en synchronie avec le rythme du stimulus. L'ensemble de ces résultats confirment donc l'idée que l'action joue un rôle dans l'apprentissage d'un rythme même chez l'adulte. C'est pourquoi nous avons réalisé une série de 3 études (**Etude 2, Etude 3 et Etude 4 de cette thèse**) (Monier, Droit-Volet & Coull, 2019) concernant l'effet bénéfique de l'action dans l'apprentissage d'un rythme sur les capacités de reproduction et de discrimination de ce rythme. Nous avons comparé l'apprentissage de stimuli temporels en perception simple, c'est à dire en regardant le stimulus rythmique, avec un apprentissage sensorimoteur : en tapant en coïncidence avec le rythme. En d'autres termes, nous avons examinés les bénéfices liés au fait de produire les mouvements rythmiques de synchronisation sur l'apprentissage temporel et examinés ces bénéfices à travers des tâches de difficulté croissante (reproduction du rythme, discrimination du rythme, et discrimination de l'intervalle isolé, ou durée constitutive du rythme). Dans ces trois études nous avons travaillé avec des enfants de 5 et 8 ans, et nous avons inclus des groupes de sujets adultes afin de mettre en évidence d'éventuels changements développementaux.

Nous avons par la suite réalisé une étude en reproduction différée de rythmes, plus difficile, avec des adultes uniquement (**Etude 5 de la cette thèse**) (Monier, Coull & Droit-Volet, en préparation) afin de tenter de faire la distinction entre une amélioration de performance due à un codage plus précis dans le cas d'un apprentissage sensori-moteur et une amélioration due à un meilleur maintien en mémoire. (Flach, 2005). Nous avons donc rajouté une tâche interférente soit durant l'encodage du rythme, soit durant le maintien en mémoire,

soit durant la reproduction, afin d'évaluer si l'action permettait de mieux résister à l'interférence, et à quel moment du processus d'apprentissage le bénéfice de l'action s'avérait le plus important.

Pour compléter notre travail et examiner si l'action joue le même rôle dans l'apprentissage des durées que des rythmes, nous avons mené une dernière étude avec des enfants de 5 ans et des adultes sur le thème du rôle de l'action dans les traitements temporels (**Etude 6**) qui fait l'objet d'un article en cours de rédaction. Nous avons demandé aux participants d'apprendre une durée en condition d'action, en suivant du doigt la durée d'un cercle en construction, et en condition de perception, en regardant simplement le cercle se construire.

Enfin, comme nous l'avons évoqué au tout début de ce travail, notre « horloge interne » nous permet de nous adapter à notre environnement en intégrant des informations socio-émotionnelles. Les émotions produisent alors des distorsions automatiques de la perception du temps. L'effet de ces émotions a été assez peu étudié sur les rythmes, alors même que les émotions sont d'une grande pertinence pour réguler le rythme de l'action (Droit-Volet & Provasi, 2015). Nous avons donc décidé d'étudier cette question chez l'enfant. Ainsi, nous avons mené une étude avec des participants de 3 ans, 5 ans, 8 ans et des adultes (**Etude 7 de la thèse**). (Monier & Droit-Volet, 2016). Cependant nous n'avons pas étudié question avec des expressions faciales émotionnelles mais avec des images émotionnelles, de l'IAPS, dont les images ont été standardisées et validées pour provoquer des émotions suffisamment internes. Nous avons donc utilisé des images générant une activation physiologique significative en induisant la peur (« high arousal »), que nous avons comparé avec des images induisant l'émotion de tristesse, et des images neutres, connues pour générer un niveau plus bas d'activation physiologique (« low arousal »).

En résumé, dans ce travail consacré à l'étude du lien entre le développement et les compétences temporelles, dans la perception et la production de rythmes, mais aussi de durées

isolées, nous avons réalisé 7 études qui ont fait l'objet de 3 articles publiés et de 2 articles en préparation que nous allons présenter et qui sont réparties de la façon suivante :

Etude 1 : Article 1 : Monier, F., & Droit-Volet, S. (2019). Development of sensorimotor synchronization abilities: motor and cognitive components. *Child Neuropsychology*. DOI :10.1080/09297049.2019.1569607

Etude 2, 3 et 4 : Article 2 : Monier, F., Droit-Volet, S., & Coull, J.T. (2019). The beneficial effect of synchronized action on motor and perceptual timing in children. *Developmental Science*, e12821

Etude 5: Action helps to maintain rhythms in memory (in preparation)

Etude 6: Effet d'un apprentissage moteur « dynamique » de la durée, (non publié)

Etude 7: Article 3 : Monier, F., & Droit-Volet, S. (2018). Synchrony and emotion in children and adults. *International Journal of Psychology*, 53, 3, 184-193.

II Partie expérimentale

Chapitre 5

Etude expérimentale sur

Le développement de la synchronisation

sensorimotrice : composant moteur et cognitif

Etude 1

Résumé

Objectif

Une étude qui a fait l'objet d'une publication dans *Child Neuropsychology* a, en premier lieu, été réalisée sur le développement de la synchronisation. Son objectif était de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans les tâches de synchronisation et leur développement, plus précisément dans les tâches de tempo moteur spontané, de synchronisation, et de continuation. Nous avons examiné sur quelles fonctions motrices ou cognitives repose chacune de ces tâches de synchronisation ainsi que leurs trajectoires de développement.

Méthode

Comme nous l'avons décrit au chapitre 3, les capacités de synchronisation connaissent une progression importante entre 5 ans et 8 ans passant d'une synchronisation immature, peu flexible et très variable, à une synchronisation proche de celle de l'adulte (Provasi et Bobin-Bègue, 2008 ; Mc Auley, 2006). Dans le but de comprendre les mécanismes développementaux qui sous-tendent cette amélioration des performances de synchronisation avec l'âge, nous avons travaillé avec des enfants de 5, 6 et 7 ans, dont nous avons mesuré les compétences motrices et cognitives au moyen de différents tests neuropsychologiques. Nous leur avons d'abord demandé de réaliser une tâche de tempo moteur spontané (3 sessions successives de TMS de

33 frappes chacune). Ensuite, pour évaluer la flexibilité des frappes en synchronisation, nous les avons soumis à une phase de synchronisation avec trois intervalles inter stimuli (ISI) (500 ms, 700 ms et 900 ms) et à une phase de continuation où ils devaient reproduire le rythme appris.

Résultats

Les résultats de notre étude confirment les différences développementales que nous avons évoquées au chapitre 3. Pour la tâche de TMS, les enfants âgés de 5 et 8 ans produisent des ITI de même valeur, Les ITI ne s'avèrent donc pas plus rapides chez les jeunes enfants, comme le suggèrent certaines études (Frasse Chambon & Oléron 1954 ; Drake et al., 2000) En revanche la variabilité de l'ITI diminue avec l'âge. Les analyses de corrélations révèlent que cette différence avec l'âge dans la variabilité des ITI est uniquement liée aux différences interindividuelles dans les capacités motrices : plus les enfants ont des difficultés de coordination motrice plus ils sont variables. Ceci révèle le caractère automatique de la production de ce rythme naturel.

Les différences développementales apparaissent en fait dans les phases de synchronisation et de continuation, En effet plus les enfants sont jeunes, et plus ils ont de difficulté à produire des intervalles longs, éloignés de leur TMS. Cela est particulièrement marqué en phase de continuation. Dans cette phase, le rythme des ITI s'accélère peu chez les enfants les plus âgés et davantage chez les enfants les plus jeunes. En effet, les plus jeunes enfants tendent à retourner à leur TMS initial. L'examen des corrélations entre les performances temporelles et les compétences motrices et cognitives révèle que les performances en phase de synchronisation sont essentiellement liées aux habiletés motrices, tandis qu'en phase de continuation, elles sont liées aux capacités de mémoire de travail.

Conclusion

En conclusion, cette étude a révélé que les différences avec l'âge dans le TMS et les ITI en synchronisation sont principalement liées au développement moteur. En revanche les différences avec l'âge dans les ITI dans la phase continuation sont liées aux capacités de mémoire de travail. Plus les capacités de mémoire de travail sont élevées et plus l'enfant tend à être précis dans sa reproduction. Ainsi le processus sous-jacent aux performances de synchronisation chez le jeune enfant dépend de la tâche de synchronisation. Comme le suggèrent nos résultats, les processus de production de l'ITI en TMS et en synchronisation seraient automatiques de sorte que seules les différences sur le plan de la coordination motrice affecteraient les performances. Les performances de reproduction du rythme en continuation relèvent quant à elles de processus plus contrôlés. En effet, les différences sur le plan des capacités de mémoire de travail rendent compte des différences avec l'âge des ITI en continuation.

Etude 1

Development of sensorimotor synchronization abilities: motor and cognitive components.

Référence : Monier, F., & Droit-Volet, S. (2019). Development of sensorimotor synchronization abilities: motor and cognitive components. *Child Neuropsychology*, e12821.

Abstract

The aim of the present study was to examine the development of sensorimotor synchronization in children in the age range from 5 to 7 years as well as the involvement of motor and cognitive capacities. Children performed a synchronization-continuation task with an external auditory stimulus presented at three different inter-stimulus intervals (ISI): 500ms, 700ms and 900ms. Their motor and cognitive abilities (short-term, working memory) were also assessed with various neuropsychological tests. The results showed some developmental changes in synchronization capacities, with the regularity of tapping and the ability to slow down the tapping rate improving with increasing ISI. The age-related differences in tapping were nevertheless higher in the continuation phase than in the synchronization phase. In addition, motor capacities appeared to be the best predictor of individual differences for the synchronization phase, and working memory capacities for the continuation phase. The continuation phase is thus more cognitively demanding than the synchronization phase. Consequently, sensorimotor synchronization improvement during childhood is related to motor development for synchronization and cognitive development for both the reproduction and maintenance of the rhythm in memory.

Keywords: Synchronization; Timing; Motor; Working memory; Development

1. Introduction

Sensorimotor synchronization, when participants synchronize their actions to external rhythm, is a timing activity fundamental for children (Kötz, Ravignani, & Fitch, 2018). It supports language learning (e.g., Gordon, Jacobs, Schuele, & McAuley, 2015; Gordon et al., 2015; Tierney & Kraus, 2013; Trehub, Trainor, & Unyk, 1993), the improvement of motor skills (Albaret & Chaix, 2011), and the development of social interaction, the child-mother communication depending on their ability to share a common communication rhythm (Bernieri, Reznick, & Rosenthal, 1988; Feldman, 2006; Feldman et al. 2011). However, surprisingly enough, very few recent studies have explored children's synchronization abilities. The aim of our study was thus to further examine these rhythmical abilities in young children.

In developmental psychology, rhythmical activities are mostly examined using a finger-tapping procedure in two tasks: a Spontaneous Motor Tempo (SMT) task, and a sensorimotor synchronization task (e.g., Fraise, 1948; Fraise, Chambon & Oléron, 1954; McAuley et al., 2006; Monier & Droit-Volet, 2016; Thompson et al., 2015). In the SMT task, children tap at a regular self-paced rhythm, i.e., at their preferred tempo. This internal tempo, as called by Fraise (1948), is assumed to reflect participants' oscillatory motor process (Reep, 2005; Reep & Su, 2013; Comstock, Hove & Balasubramaniam, 2018). In the synchronization task, children must tap in synchrony with an external tempo, an isochronous sequence of sounds (beep). This is "a form of entrainment of one oscillatory process (motor) by another (perceptual)" (Reep & Keller, 2004, p. 400). This synchronization task is often followed by a continuation phase without external tempo allowing us to assess the maintenance of tempo, when children must continue to produce the tempo developed during the synchronization phase.

In this tapping tasks, developmental studies have shown that the spontaneous motor tempo tended to slow down with age during childhood, although the value of spontaneous tempo differed between studies (Drake, Jones & Baruch, 2000; McAuley et al., 2016; Monier & Droit-Volet, 2016; Getchell, 2006; Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Children between 2 and 4 years produce a tempo with an interval-taps interval (ITI) of about 300-400 ms (McAuley et al., 2016; Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Then, a shift occurs at about the age of 5 years, children producing a slow rhythm of about 400-600 ms, that approach the adults' one, as suggested by the lack of significant age related difference in the length of ITI of SMT. From this age, it is the variability of ITI of spontaneous tempo rather than their length that changes with the age, with a greater variability in younger children who are more irregular in their tapping (McAuley et al., 2016; Drake, Jones & Baruch, 2000; Monier & Droit-Volet, 2016; Getchell, 2006).

In contrast to the spontaneous motor, the synchronization abilities clear improve with age to only reach an adult-like level at about 8-10 years (Bobin-Bègue & Provasi, 2008, Drake et al., 2000; Drewing, Aschersleben, & Li, 2006; Fraise, et al., 1954; McAuley et al., 2006; Monier & Droit-Volet, 2016; Thompson et al., 2015). Between 5 and 8 years, the development of synchronization is characterized by two major changes. First, children tend to tap faster than adults, especially when they have to slow down their tapping rate in presence of an external tempo slower than their preferred tempo. Like adults, they nevertheless succeed to slow down their taps with a slow tempo (i.e., 700-ms Inter-Stimulus Interval, ITI). However, as soon as the external tempo is removed (continuation phase), they accelerate their tempo, tending to return to their preferred tempo. Children's difficulty in slowing down their tapping rate thus indicates a lack of flexibility in their synchronization activity outside their spontaneous tempo. Second, the variability of ITI decreases with the increasing age. Although young children try to tap in synchrony with external stimulus, their ITI remains more variable in both synchronization and continuation phases. This indicates young children's difficulty in producing and maintaining a regular rhythm. In this age range, the temporal variability also increases when the length of ISI increases, but in a greater extent in young children than in adults.

There are thus age-related differences in rhythmic activities in a tapping task. This raises the question of the processes that underlie these developmental differences in rhythmic activities, especially with regard to the flexibility and variability of the synchronization–continuation activity. The sensorimotor synchronization task is a complex task that requires temporal abilities to process the duration of cognitive abilities to maintain and manipulate the rhythm in working memory, and visuomotor control capacities to synchronize manual action with the stimulus. The differences in synchronization performance in the age range from 5 to 8 years may thus result from the development of each of these three components. However, the development of motor abilities and cognitive abilities is a more reliable explanatory factor than that of timing skills. Indeed, studies on visuomotor actions such as pointing/reaching movements provide evidence of a progression in motor efficiency up until the age of 8 years related to maturation of brain areas involved in visuomotor control (Lenroot & Giedd, 2006; Serrien, Sovijärvi-Spapé, & Rana, 2014). Similarly, numerous studies have shown an improvement in working memory capacities during childhood associated with the lengthy maturation of the prefrontal cortex (Gathercole, 2002; Gathercole, Pickering, Ambridge, & Wearing, 2004; Sowell, Delis, Stiles, & Jernigan, 2001). By contrast, there is no difference between the ages of 5 and 8 years in the timing of intervals in the milliseconds range (<1.5 s), such as those used in rhythmic sequences. More precisely, an improvement in time perception of short durations has been observed in the explicit time judgment task but not in implicit tasks involving the temporal expectation of forthcoming events (Coull & Droit-Volet, 2018; Droit-Volet, 2013, 2016). The representation of temporal intervals is indeed as precise at 5 years as it is at adult age in reaction time tasks involving expected intervals (Droit-Volet & Coull, 2016).

No study in children has examined the role of the development of motor abilities in age-related differences in performance in a synchronization task. Only one study has been conducted in children aged from 8 to 14 years on the role of general intelligence in synchronization with two tempos (500-ms and 667-ms ISI) (Thompson et al., 2015). This study suggested a significant link between the Wechsler non-verbal IQ (WAIS) and the variability of tapping. However, one and the same intelligence score can hide a multitude of developmental trajectories in terms of cognitive abilities (memory, attention, processing speed). With a non-verbal IQ test, it is thus impossible to identify the respective roles of the development of different cognitive capacities in children’s rhythmic performance. The aim of our study was thus to explore the age-related changes in children’s performance in the SMS and the synchronization–continuation task and the contribution to these developmental changes of inter-individual differences in both motor and cognitive abilities, as assessed by specific neuropsychological tests.

A small number of adult studies have examined the role of cognitive capacities in the synchronization task (Bailey & Penhune, 2010; Madison et al., 2009; Grahn & Schuit, 2012). However, These studies have focused on only one phase of the synchronization task, namely, either the continuation (Grahn & Schuit, 2012; Madison et al., 2009) or the synchronization phase (Bailey & Penhune, 2010), and have not compared these two phases in a within-subject design, as we also attempt to do in our study. Nevertheless, the results of these studies suggest that different processes are involved in the synchronization and the continuation phase. Even if attention has to be directed toward the stimuli, the synchronization phase seems to involve automatic processes that are inaccessible to conscious control, i.e., “a straight sensorimotor integration out of the field of consciousness” (Grahn & Schuit, 2012; Honing, 2012; Madison et al., 2009). The external rhythm would simply drive the motor system by means of bottom-up mechanisms. The adjustment of motor rhythm to slight changes in ISI would thus be purely automatic (Hary & Moore, 1987; Madison & Merker, 2004).

However, the continuation phase appears to be more cognitively demanding than the synchronization phase (Grahn, 2012; Madison et al., 2009). Thus, in the continuation phase,

Madison et al. (2009) and Grahn and Schuit (2012) found a significant correlation between tapping performance and cognitive scores, i.e., the Raven intelligence scores and the memory span scores, respectively. The higher these cognitive scores, the more accurate and less variable the reproduced ISI is in the continuation phase. Working memory capacities would therefore appear to be involved in this continuation phase because participants must keep the previously presented tempo in memory. This is consistent with the results of imagery studies showing the activation, during synchronization tasks, of the prefrontal cortex, which is known to play a critical role in working memory (Chen, Penhune, & Zatorre, 2008; Coull, Davranche, Nazarian, & Vidal, 2013; Coull, Nazarian, & Vidal, 2008; Grahn, 2012; Lewis & Miall, 2003).

In our study, children aged from 5 to 8 years were therefore asked to perform a SMT task and a synchronization–continuation task. This age range was used because it is characterized by major inter-individual motor and cognitive differences, i.e., a number of different developmental trajectories (de Ribaupierre & Lecerf, 2018). In addition, we assessed the children’s individual motor and cognitive abilities (short-term memory, working memory, attention) by means of various neuropsychological tests in order to examine the link between the development of these abilities and the age-related differences in performance in each rhythmic activity. We thus assumed that, because these rhythmic activities are automatic, the age-related differences in the variability of ITI in the spontaneous tempo and the synchronization phases would be related to differences in motor abilities rather than to working memory and attentional capacities. However, as the continuation phase is cognitively demanding in terms of memory, we assumed that children’s working memory capacities might also account for developmental differences in ITI during the continuation phase.

In the present study, children’s performance in terms of mean ITI and variability of ITI was therefore measured in the spontaneous motor tempo, the synchronization phase, and the continuation phase. However, as described in the results below, to take account of the flexibility in synchronization performance, we also calculated a flexibility rate using the mean ITI in the SMT as a baseline. Furthermore, to examine the variability in ITI, we decided to use Ivry and Hazeltine’s (1995) procedure, which is based on Wing and Kristofferson’s (1973) model ($C_j = R_j + W_j$). This allowed us to isolate two components in the produced interval (C_j): (1) a motor duration-independent component (R_j) (motor component) and (2) a duration-dependent component (W_j) (timing component). The first corresponds to the response delay due to neuromuscular transmission and skeleto-muscular performance. The second corresponds to mechanisms involved in the representation of temporal intervals. Ivry and Hazeltine (1995) thus proposed the following equation: $\sigma^2_{\text{Total}} = K^2 D^2 + C^2$. σ^2_{Total} represents the total variability across the taps, $K^2 D^2$ represents the variability due to the duration-dependent component, and C^2 represents the duration-independent component. K is Weber’s constant and D is the square of the produced interval. Ivry and Hazeltine (1995) have shown that plotting variability against the square of the produced interval makes it possible to obtain a linear regression with an intercept parameter that represents the motor duration-independent component and a slope parameter that represents the duration-dependent component. We therefore used this equation in our study to extract these two parameters. Our hypothesis was that the developmental differences in the motor component in the synchronization–continuation task would be clearly related to the children’s motor abilities. As previously suggested, no developmental differences were expected for the duration component as the processing of short ISI is automatic.

In sum, in the present study, children aged from 5 to 8 years were given a SMT as well as a synchronization and continuation task. Three different ISI were tested: one close to the preferred tempo (500ms) and two longer ones (700ms and 900 ms). The children’s motor and cognitive abilities (short-term memory, working memory, attention) were also assessed using various neuropsychological tests. Finally, we examined the links between these motor and cognitive abilities, as assessed by the different neuropsychological tests, and the different

performance indexes measured, including flexibility and the intercept and slope parameters derived from Ivry and Hazeltine's procedure.

2. Method

2.1. Participants

The sample consisted of 57 French-speaking children: twenty 5-year-olds (13 girls and 7 boys, mean age = 5.38, SD = 0.40), eighteen 6-year-olds (7 girls and 11 boys, mean age = 6.17, SD = 0.46) and nineteen 7-year-olds (8 girls and 11 boys, mean age = 7.33, SD = 0.46). The children were recruited from nursery and primary schools. The children took part voluntarily and their parents signed a consent form for their participation in this experiment. This experiment was approved by both the director of the academy of the French National Education Ministry and the Clermont-Ferrand Sud-Est VI Statutory Ethics Committee (CPP, Sud-Est VI, France). At the end of the experiment, the children received cartoon cards to thank them for their participation.

2.2. Material

The children were tested individually in a quiet room in their school. They were seated in front of a PC computer that controlled the experimental stimuli and recorded the responses via E-prime software. The auditory stimuli used for the synchronization tasks were 100-ms beeps (60 dB, 440 Hz). The children responded by pressing on the spacebar of the computer keyboard with the index finger of their dominant hand.

2.3. Neuropsychological Assessment

To assess fine motor abilities, we used the Peg Moving Task (PMT-5) (Annett, 1992). In the PMT test, children insert pegs one-by-one in a row of holes as quickly as possible using their dominant and non-dominant hand. The raw score corresponds to the number of pegs that they insert in the board in 30 seconds. With regard to cognitive abilities, we assessed both short-term memory and working memory using subtests of the Children Memory Scale (CMS) (Cohen, 1997). Short-term memory was assessed with the forward digit span subtest. In this test, children repeat the sequence of digits stated by the experimenter and the number of digits increases from 2 to 8, with two trials per number of digits. The score is the total number of correct trials. Working memory capacities were measured with the backward digit span subtest. This test is similar to the forward digit test, except that the children have to recall the sequence of digits presented by the experimenter in the reverse order. Finally, we assessed sustained and selective attention using the "attention and associated responses" subtest from the Neuropsychological Assessment scale NEPSY II (Korkman, Kirk, & Kemp, 2007). In this test, children see three colored circles (red, blue, yellow). They listen to a long sequence of different words including color names, and when they hear the word red, blue, or yellow, they must touch the red circle, the yellow circle, and no circle, respectively. The final raw score is the number of correct responses minus the number of incorrect responses. The children performed these neuropsychological tests after the synchronization task and the order of presentation was random.

2.4. Synchronization task

The children performed a spontaneous motor tempo task. They were asked to produce a self-paced regular rhythm in three trials of 33 taps each (the first 3 taps of each trial was removed from our analyses). They then performed a synchronization task consisting of a synchronization phase followed by a continuation phase. In the synchronization phase, they heard a 33-beep rhythmical sequence and had to tap in time with the beeps. In the ensuing

continuation phase, they no longer heard this sequence of beeps but had to continue tapping at the same rhythm for 33 taps (for a similar procedure, see Monier & Droit-Volet, 2016). The continuation tapping thus occurs without audio prompts. For each phase, the first 3 taps were not included in our statistical analyses as for the SMT. Before briefly demonstrating how to tap, the experimenter told the child “First, you must tap at the same time as the beep. Then, you must continue to tap in the same way and at the same speed, even when you no longer hear the beep”. This synchronization-continuation task was performed under three different ISI conditions administered over 3 successive sessions (ISI): 500-ms, 700-ms, and 900-ms. There was thus one synchronization-continuation task per ISI. The inter-session interval was approximately 10 s. The experimenter pressed a button to start each session as soon as the child said he/she was ready. This caused the computer screen to turn green to indicate the start of the session. After the 33 taps of the continuation phase, the screen turned red to indicate that the child could stop tapping.

2.5. Statistical analyses

We examined the children’s performance in the SMT task and the synchronization–continuation task separately, as neither the instructions nor the underlying mechanisms were the same. For the SMT task, we run a linear regression with age (in months) as continuous variable. For the synchronization-continuation task, an ANCOVA was carried out on performance with the inter-stimulus interval (ISI) (500, 700, 900 ms) and the task-phase (synchronization vs. continuation) as within-subjects factors, and the age used as covariate. A Greenhouse-Geisser correction was performed when Mauchly test showed that sphericity was violated. Effect size was estimated with partial η^2 . Whenever the analysis of covariance found a significant interaction involving the age, linear regressions were performed to further examine the effect of age. In addition, to identify the factor underlying the link between age and the different performance indices, we decided to run partial correlation analyses, controlling for age, between each performance index and the raw scores of different neuropsychological tests. Then, in a second step, when two factors appeared to be significant, a hierarchical regression analysis was conducted to identify the best predictor of inter-individual differences in performance. Previous analyses showed a significant linear regression between age and scores on each neuropsychological test: short-term memory, $B = .08$, $SE = .02$, $\beta = .49$; working memory, $B = .07$, $ES = .02$, $\beta = .49$; attention, $B = .16$, $SE = .05$, $\beta = .41$; motor abilities, $B = .24$, $SE = .03$, $\beta = .73$, all $p < .001$ (Table 1).

Table 1. Mean raw scores (standard deviation) for short-term memory, working memory, attention, and motor abilities for the three age groups.

	5 years		6 years		7 years	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Short-term memory	4.45	1.70	5.61	0.78	6.53	1.58
Working memory	1.40	1.54	3.11	0.90	3.21	0.85
Attention	22.75	4.94	26.26	2.09	27.00	2.90
Motor abilities	16.63	2.56	20.88	2.50	22.74	1.82

3. Results

3.1. Spontaneous motor tempo

For the SMT, we calculated the mean of the ITIs and the coefficient of variation (CV) of ITI ($SD/mean$) produced by the children during the three successive trials (Figure 1). A first analysis of variance showed that the trial effect did not reach significance either for the mean of ITI ($M_{trial1} = 425.58$, $SD_{trial1} = 300.66$; $M_{trial2} = 397.90$, $SD_{trial2} = 271.56$; $M_{trial3} =$

403.87, $SD_{trial3} = 277.65$, $F(2, 112) = 3.01$, $p = .07$), or for the CV of ITI ($M_{trial1} = 0.19$, $SD_{trial1} = .17$; $M_{trial2} = 0.17$, $SD_{trial2} = .12$; $M_{trial3} = .16$, $SD_{trial3} = .12$, $F(2, 112) = 2.18$, $p = .13$). The SMT therefore remained stable across trials. We consequently performed a linear regression analysis between age (in months) and each performance index on the three trials averaged together. The regression analysis was not significant for the mean of ITI, $B = .69$, $SE = 2.67$, $\beta = .04$, $p = .80$, but was significant for the variability of ITI, $B = -.004$, $SE = 0.01$, $\beta = -.34$, $p = .009$. This means that the length of the ITIs in the SMT was similar among the children, even though there was great inter-individual variability ($M = 374.24$, $SD = 207.62$), whereas the variability of SMT tended to decrease with age in the age range tested, which extended from 5 to 8 years.

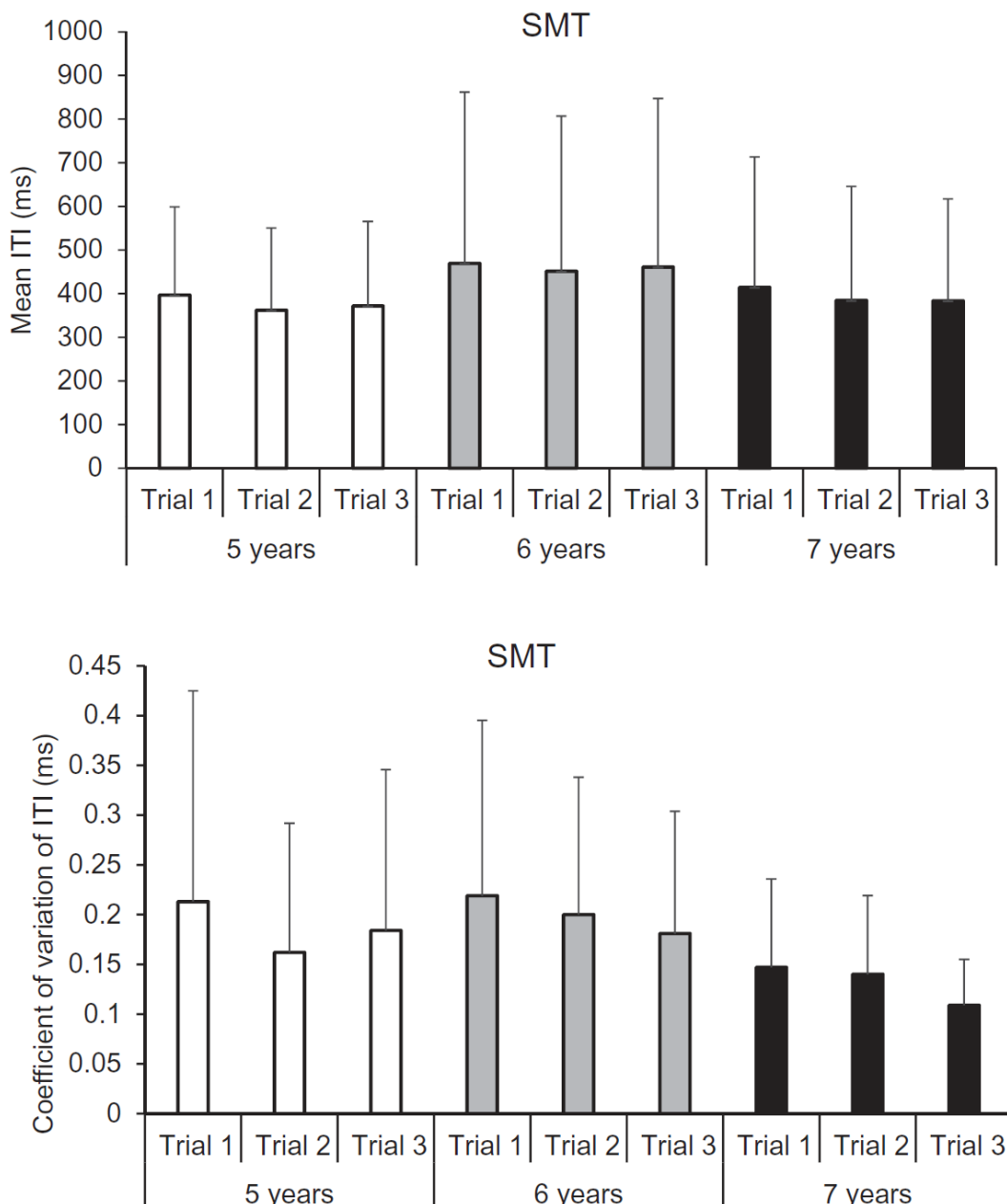


Figure 1. Mean and coefficient of variation (SD/mean) of inter-tap intervals (ITI) for the spontaneous motor tempo (SMT) across the three successive 30-tap trials for the three age groups.

To examine the factor underlying the link between age and the CV of ITI in the SMT condition, we analyzed the partial correlations, while controlling for age, between this CV and the scores on the different neuropsychological tests (short-term memory, working memory, attention, motor abilities) (Table 2).

For information, Table 2 also shows the data for the mean of ITI. The results showed a significant correlation between the scores for the motor abilities and the variability of the spontaneous tempo ($r = .27, p = .05$), especially in the case of the first trial ($r = .29, p = .03$).

3.2. Synchronization and continuation

Table 2. Partial correlation analyses controlling for age between the neuropsychological scores and performance in the spontaneous motor task and the synchronization–continuation task.

	Short-term memory	Working memory	Attention	Motor abilities
SMT – Mean of ITI				
Trial 1	-.10	-.11	-.13	-.23
Trial 2	-.05	.08	-.09	-.06
Trial 3	-.01	.08	-.11	-.08
Trials averaged	-.06	.01	-.11	-.13
SMT – Coefficient of variation of ITI				
Trial 1	-.04	-.15	-.01	-.29*
Trial 2	.01	.12	.02	-.15
Trial 3	.06	-.02	-.13	-.13
Trials averaged	-.01	-.05	-.03	-.27*
Synchronization – Mean of ITI				
500-ms ISI	-.15	.18	-.25 ^a	-.09
700-ms ISI	.01	.22	.15	.27*
900-ms ISI	-.03	.16	-.03	.04
Continuation – Mean of ITI				
500-ms ISI	-.11	.06	-.08	.18
700-ms ISI	.08	.13	.13	.02
900-ms ISI	.08	.17	.01	.12
Synchronization – Flexibility rate				
500-ms ISI	.06	.11	.09	.26 ^a
700-ms ISI	.07	.13	.15	.31*
900-ms ISI	.06	.14	.13	.27*
Continuation – Flexibility rate				
500-ms ISI	.04	.12	.11	.31*
700-ms ISI	.09	.15	.12	.29*
900-ms ISI	.10	.17	.11	.32*
Synchronization – Coefficient of variation of ITI				
500-ms ISI	-.02	-.09	.005	-.24 ^a
700-ms ISI	-.08	-.26 ^a	-.03	-.31*
900-ms ISI	.04	-.16	-.16	-.13
Continuation – Coefficient of variation of ITI				
500-ms ISI	-.35**	-.26 ^a	.01	-.16
700-ms ISI	.08	-.25 ^a	-.04	-.19
900-ms ISI	-.23	-.09	-.11	-.11
Slope				
Synchronization	-.01	-.15	-.17	.11
Continuation	-.03	.09	-.05	.13
Intercept				
Synchronization	.04	.06	.17	-.21 ^b
Continuation	-.01	-.33*	.12	-.30*

^a $p < .10$, ^{*} $p < .05$, ^{**} $p < .01$; ^b $r = .32, p = .02$ without controlled age.

3.2.1. Length of ITIs

An ANCOVA was performed on the mean of ITI with the ISI (500, 700, 900 ms) and the task phase (synchronization vs. continuations) as factors, and the age as covariate. The statistical analysis showed a significant main effect of age, $F(1, 55) = 27.78, p < .0001, \eta^2_p = .33$, indicating that the length of ITI increased with age in a synchronization-continuation task (Figure 2). However, there was a significant interaction between the age and the ISI, $F(2, 110) = 11.03, p < .0001, \eta^2_p = .17$, with no significant main effect of ISI, $F(2, 110) = 0.52, p = .60$, and no age x ISI x task-phase interaction, $F(2, 110) = .16, p = .85$. As illustrated in Figure 2, the regression analyses showed a significant effect of age at each level of ISI, indicating an increase in the length of ITI across ages (500ms: $B = 1.66, SE = 0.48, \beta = .42, p = .001$; 700 ms: $B = 4.56, SE = 0.95, \beta = .54, p < .0001$; 900 ms: $B = 6.66, SE = 1.42, \beta = .53, p < .0001$). Furthermore, the youngest children found it more difficult to synchronize with longer ISI, as suggested by the significant effect of age observed in the difference in ITI between the 500-ms condition and both the 700-ms and the 900-ms conditions ($B = 2.90, SE = 0.89, \beta = .40, p = .002$; $B = 4.99, SE = 1.30, \beta = .46, p < .0001$, respectively). Indeed, the magnitude of ITI differences between the ISI conditions [(ITI900ms – ITI500ms) – (ITI700ms – ITI500ms)] increased with age ($B = 2.10, SE = 0.98, \beta = .28, p = .036$).

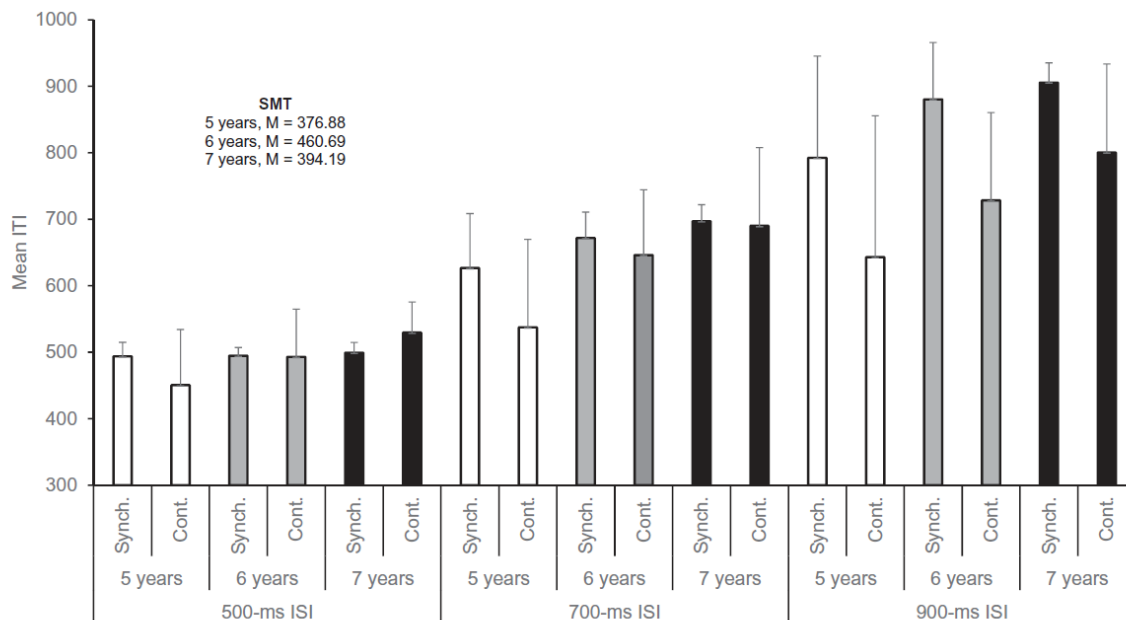


Figure 2. Mean of inter-tap intervals (ITI) for the three inter-stimulus intervals (ISI) and the three age groups in the synchronization and the continuation phase.

In addition, there was a significant main effect of task phase, $F(1, 55) = 13.87, p < .0001, \eta^2_p = .20$, as well as a significant age x task phase interaction, $F(1,55) = 8.55, p = .005, \eta^2_p = .14$. No other effect was significant. The regression analyses indicated that the length of ITI increased with age in both the synchronization and the continuation phases ($B = 2.86, SE = 0.61, \beta = .53$; $B = 5.73, SE = 1.20, \beta = .54$, respectively, both $p < .0001$). These results suggest that the older the children were, the better able they were to produce longer ITI in both the synchronization and the continuation tasks, despite the fact that there was no age-related difference in the length of ITI for the SMT in the age range tested. Moreover, the difference in the mean ITI between the continuation and the synchronization phase increased with age ($B = 31.15, SE = 11.56, \beta = .34, p = .009$), suggesting that the tapping rhythm accelerated more in the younger children when the external stimuli were removed. In other words, as children get

older, they are better able to produce and maintain a new tempo. The partial correlations (with age controlled for) did not reveal any significant correlation between the mean ITI and the neuropsychological scores (all $p > .05$), except in the case of the motor ability scores for the synchronization phase with the 700-ms ISI.

3.2.2. Flexibility rate

Given the age-related differences in temporal performance for the synchronization and the continuation phase, we decided to measure a flexibility index for each participant which takes into account his/her initial SMT, i.e., the ability to produce a rhythm distant from the SMT. This index is derived from the following equation based on the sum of the differences between each ITI and the SMT.

$$\frac{\sum_{i=1}^{30} (ITI_i - SMT)}{30}$$

The mean of this flexibility rate is presented in Figure 3 for the synchronization and the continuation phase. The ANCOVA carried out on this new index revealed a significant main effect of task-phase, $F(1, 53) = 9.70, p = .003, \eta^2_p = .16$, and the task-phase x age interaction also reached significance, $F(1, 53) = 4.9, p = .03, \eta^2_p = .09$. The regression analyses showed the effect of age reached significance for the continuation phase ($B = 0.03, ES = 0.10, \beta = .34, p = .01$) but not the synchronization phase ($B = 0.19, ES = 0.01, \beta = .24, p = .08$). This results thus suggested that the age-related differences in flexibility rate was more important in the continuation phase when the external tempo was removed. This finding is consistent with the results for the mean of ITI showing how difficult it is for younger children to maintain the tempo of the synchronization phase. There was also an significant main effect of age, $F(1, 53) = 4.86, p = .03, \eta^2_p = .08$, and a significant age x ISI interaction, $F(2, 106) = 8.32, p < .0001, \eta^2_p = .14$, subsumed no main effect of duration, $F(2, 106) = 0.92, p = .40$, consistently with the Weber’s law. The regression analyses revealed that the age-related differences in the flexibility rate did not reach significance for the 500-ISI ($B = .01, SE = .007, \beta = .23, p = .09$). This is probably due to the fact that the external tempo was close to the children’s spontaneous tempo. It was only for the longer ISI of 700 and 900 ms that the flexibility rate changed with age ($B = .02, ES = .01, \beta = .28, p = .04; B = .03, ES = .01, \beta = .32, p = .02$, respectively). Therefore, the older the children were, the better they succeeded in adjusting their motor tempo to a slow external rhythm.

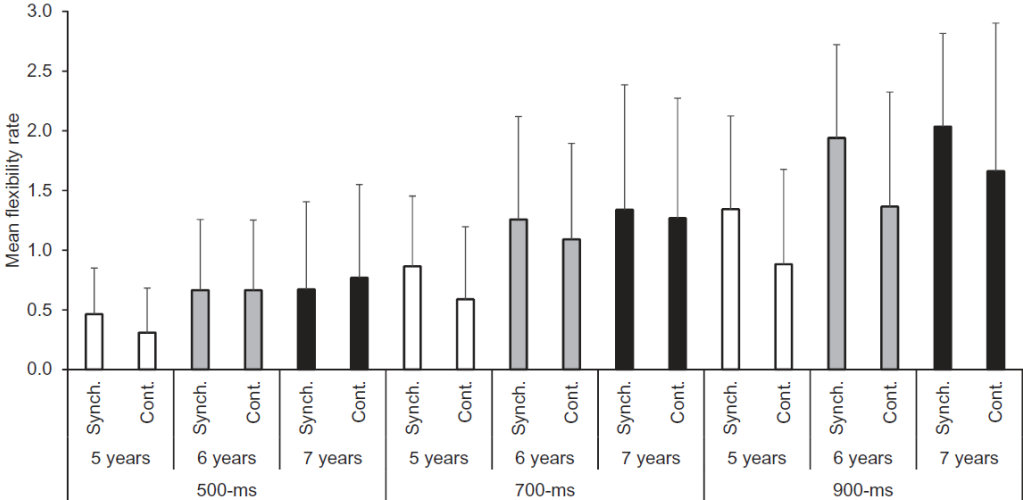


Figure 3. Flexibility rate for the three inter-stimulus intervals (ISI) and the three age groups in the synchronization and continuation phase.

Interestingly, the partial correlations presented in Table 2 (with age controlled for) do not indicate any significant link between the flexibility rate and cognitive capacities (short-term memory, working memory, attention). The flexibility rate was only significantly correlated with motor abilities and this was true in both the synchronization and the continuation phases (all $p > .05$). When we entered age and motor scores into the equation in a hierarchical regression analysis, age lost its predictive power (Table 3). The order of factors in the model did not change this result. The children's motor abilities were the only reliable predictor of inter-individual differences in the flexibility rate (ISI averaged), both for the synchronization phase ($r = .41, p < .05$) and for the continuation phase ($r = .44, p < .04$) (Table 3).

Table 3. Hierarchical regression analysis on the flexibility rate for synchronization and continuation with the age and the motor scores.

	B	SE B	β	R^2
Synchronization – Flexibility rate				
Model 1				
1. Age	.02	.01	.24	.07
Model 2				
1. Age	-.01	.02	-.06	
2. Motor abilities	.10	.05	.41*	
Overall significance				.13*
Continuation – Flexibility rate				
Model 1				
1. Age	.03	.01	.34	.11**
Model 2				
1. Age	.01	.01	.02	
2. Motor abilities	.10	.04	.44*	
Overall significance				.20**

3.3.2. Variability of Inter-Taps Intervals

A CV of ITI (SD/Mean) was calculated for each participant for both the synchronization and the continuation phases. The ANCOVA showed a significant main effect of age, $F(1, 52) = 20.52, p < .0001, \eta^2p = .28$. However, there was a three-way interaction between age, ISI, and task phase, $F(2, 104) = 4.40, p = .02, \eta^2p = .08$, with a significant ISI \times task phase interaction, $F(1, 104) = 4.43, p = .02, \eta^2p = .08$. No other significant effect was found. We therefore conducted a statistical analysis for each phase taken separately. For each phase (synchronization and continuation), there was a significant main effect of age ($F(1, 55) = 22.88, p < .0001, \eta^2p = .29, F(1, 52) = 13.25, p = .001, \eta^2p = .20$, respectively), indicating a greater variability in younger children's motor tempo during the synchronization–continuation task. However, there was no other significant result for the continuation phase (all $p > .10$), whereas the ISI \times age inter-action was significant, $F(2, 110) = 4.65, p = .04, \eta^2p = .08$, for the synchronization phase, with a significant main effect of ISI, $F(1, 55) = 4.73, p = .01, \eta^2p = .08$. As indicated by the linear regressions, the variability of ITI decreased with age for each ISI in the synchronization task (500-ms ISI, $B = -.01, SE = .001, \beta = -.53, p < .0001$; 700 ms ISI, $B = -.01, SE = .001, \beta = -.48, p < .001$; 900 ms ISI, $B = -.01, SE = .001, \beta = -.27, p = .04$), even though the inter-individual differences were greatest for the shortest ISI. The partial correlations presented in Table 2 suggest that the effect of age on the CV of ITI tended to be related to the motor scores for the synchronization phase, at least for the 500-ms and the 700-ms ISI ($r = -.24, p = .09, r = .31, p = .03$), and to be related to short-term memory (500-ms ISI, $r = -.35, p$

= .02) and working memory (500-ms ISI, $r = -.25$, $p = .07$, 700-ms ISI, $r = -.26$, $p = .08$) for the continuation phase.

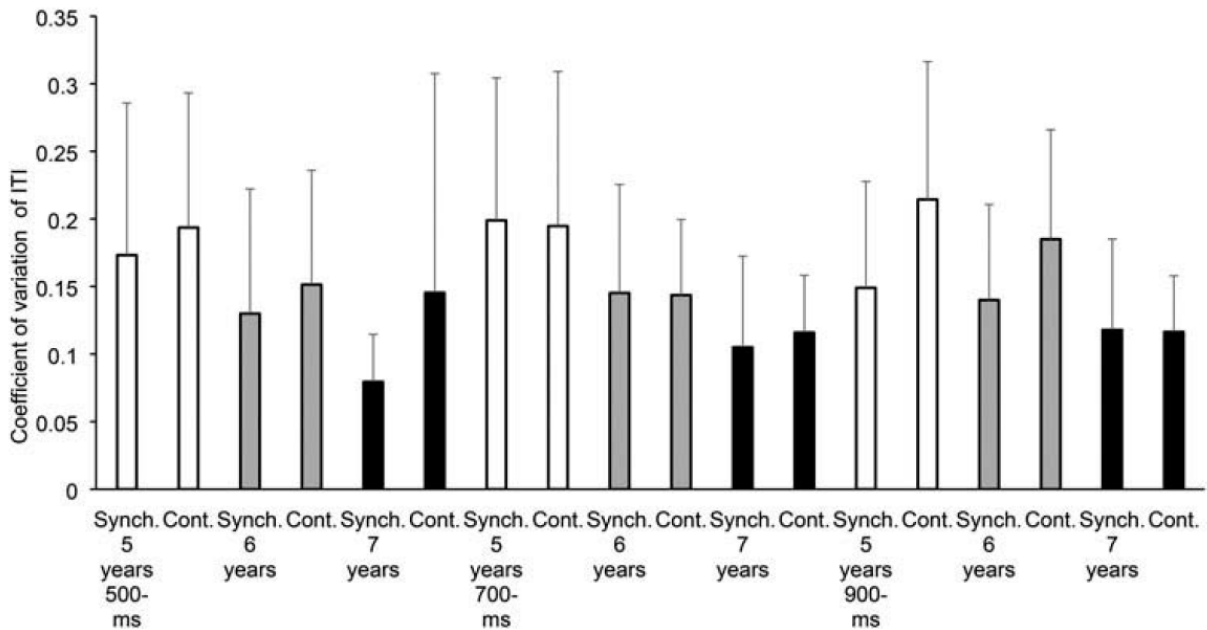


Figure 4. Mean coefficient of variation (SD/mean) of inter-tap intervals for the three inter-stimulus intervals (ISI) and the three age groups in the synchronization and the continuation phase.

3.3.2. Motor – duration component

To examine the different sources of variance (motor vs. duration component) in sensorimotor synchronization activity, we conducted a slope analysis following Ivry and Hazeltine’s procedure (1996). For each participant, we therefore ran a linear regression on the variability of ITI and the squared means of the ITI they produced. This individual-subject regression analysis provided a slope parameter which corresponds to the duration-dependent component, and an intercept parameter which corresponds to the duration-independent component. Table 4 shows the mean and the standard deviation of these two components. The positive value of the slope parameter suggests that the variability of ITI in the children increased linearly with the produced interval, in the same way as has been demonstrated in adults (Wing & Kristofferson, 1973). The ANCOVA performed on the slope parameter with task phase

Table 4. Mean (standard deviation) slope and intercept derived from the regression analysis proposed by Ivry and Hazeltine (1995).

	5 years		6 years		7 years	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Synchronization						
Slope	0.06	0.13	0.03	0.04	0.04	0.04
Intercept	2922	33,416	3375	20,320	-6854	13,884
Continuation						
Slope	0.06	0.10	0.03	0.05	0.01	0.01
Intercept	-5246	23,719	-1919	21,814	523	6716

and age as factors did not show any significant effect of either age, $F(1, 51) = 1.87$, $p = .18$, or task, $F(1, 51) = 1.95$, $p = .17$. There was also no interaction between these two variables, $F(1, 51) = 2.11$, $p = .15$. By contrast, the same analysis of covariance showed a significant task phase

effect, $F(1, 51) = 4.75, p = .03, \eta^2p = .09$, and a significant age \times task interaction, $F(1, 51) = 4.58, p = .04, \eta^2p = .08$, with no main effect of age, $F(1, 51) = 0.77, p = .38$. However, the regression analyses with age as factor only showed a marginal effect of age on the intercept for the synchronization phase ($B = -533.32, SE = 310.27, \beta = -.23, p = .09$), while this effect was not significant for the continuation phase ($B = 151.65, SE = 249.35, \beta = .08, p = .55$). As confirmed by the partial correlation analyses with age controlled for, only the motor scores tended to be significantly correlated with the intercept parameters in the synchronization phase ($r = -.21, p = .14$). However, the correlation with motor scores reached significance when age was not controlled for ($r = -.32, p = .02$). By contrast, no significant correlation was found with cognitive scores irrespective of whether age was controlled for or not (all $p > .05$). For the continuation phase, there was also a significant correlation between the intercept component and motor abilities ($r = -.30, p = .036$). The working memory scores also explained a proportion of variance for the continuation phase ($r = -.33, p = .02$), i.e., the phase that required the external tempo to be retained in memory.

4. Discussion

Our study examined developmental changes in temporal performance between the ages of 5 and 8 years in a tapping task and their links with the development of motor and cognitive abilities. When children aged from 5 to 8 years had to tap at their preferred tempo, our data showed that their SMT gave rise to an ITI of between 350 and 450 ms. This result is entirely consistent with the SMT values of between 350 and 550 ms found in the small number of studies on SMT conducted in children aged from 2 to 7 years (Bobin-Bègue & Provasi, 2008; McAuley et al., 2006; Monier & Droit-Volet, 2016; Provasi & Bobin-Bègue, 2003). In addition, our data demonstrated that the mean value of ITI did not change across this age range, despite the inter-individual differences in motor and cognitive abilities. There was nevertheless a developmental trend in the variability of SMT, with tapping activity being more irregular in the younger children. However, our findings revealed that this age-related difference in the variability of SMT was significantly linked to inter-individual differences in scores on motor tests but not to those obtained in any form of cognitive test. In other words, the variability of SMT was higher in younger children due to their poorer motor skills. Overall, our findings therefore support the assumption of an early SMT that probably reflects an innate endogenous motor rhythm, a “preferred tempo” as Fraisse (1982) termed it, or a preferred and natural pace for action (Delevoeye-Turrell, Dione, & Agneray, 2014; Delevoeye-Turrell & Wing, 2004). However, there is more noise – variability – in the production of this preferred tempo in younger children due to their limited motor skills. The motor test used in our studies was the PMT-5 test, which assesses fine motor abilities. We can thus conclude that the greater variability of SMT in younger children is due to the motor control of fine movements, which is not fully developed until adolescence (de Castelneau, Albaret, CHaix, Zanone, 2007; Serrien et al., 2014).

Our results showed that young children’s limited motor skills also explain their difficulties in adopting a new tempo, i.e., their lack of flexibility in synchronization activities. The young children in our study were able to slow down their taps in the presence of an external tempo. However, they found it more difficult to slow down their motor tempo. This difficulty was mainly observed for the rhythms that were distant from the spontaneous tempo. A significant effect of age on the flexibility rate was indeed obtained for the 700- and the 900-ms ISI, but not for the 500-ms ISI. This finding supports the results of studies showing that an external rhythm acts more efficiently on synchronization behavior when this rhythm is close to the intrinsic preferred tempo (Drake et al., 2000; Jones et al., 2011). The originality of our study was therefore to reveal that the young children’s lack of flexibility in synchronization activity was not linked to their limited cognitive capacities but to their poorer motor skills. Indeed, we did not find any significant correlation between synchronization performance and the scores on

various cognitive tests assessing short-term memory, working memory, and attention. In contrast, the higher the scores on the PMT-5 test, the better able the children were to increase their ITI in the synchronization phase compared to their spontaneous tempo (flexibility rate). This is consistent with our results on the intercept and slope parameters derived from the regression method suggested by Ivry and Hazeltine (1995). Indeed, for the synchronization phase, a significant trend effect of age was observed for the intercept parameter, which represents the “motor component” of produced intervals, but not for the slope parameter, which represents the “duration-dependent component.” In addition, the intercept parameter was significantly correlated with motor abilities, but not with cognitive abilities.

Our inter-individual approach therefore allows us to provide evidence in favor of Wing and Kristofferson’s (1973) model, which suggests that there are two sources of variance in synchronization performance (motor duration-independent vs. duration dependent component). Indeed, in accordance with Wing and Kristofferson’s model, the duration-independent component (intercept) measured in our study was linked to motor abilities rather than cognitive abilities. In addition, this approach allows us to demonstrate that the age-related changes in performance in the synchronization phase were mainly related to the development of motor abilities, at least when the participants had to produce regular rhythms such as those used in our study. Indeed, while there was a significant link between synchronization performance and motor abilities, no reliable link was observed between synchronization performance and cognitive abilities. This suggests that, during the synchronization phase, the duration-dependent source of variance is mainly controlled by an automatic scalar timing system (Gibbon, 1977). In other words, the timing of intervals during the regulation of a motor rhythm would seem to be automatically driven by an external tempo. This idea is supported by the adult studies reported in the introduction that suggest that synchronization with an isochronous rhythmic sequence of sounds is a stimulus-driven process (automatic process) that is largely independent of individual cognitive resources (Grahn & Schuit, 2012; Honing, 2012; Honing, Ten Cate, Peretz, & Trehub, 2015; Madison et al., 2009). The scalar property of timing, with a constant CV for different ISI, was also verified in our study (see Droit-Volet, 2013; 2016 for a review). Consequently, because the processes underlying synchronization are automatic, the age-related differences in synchronization activity observed in children aged between 5 and 8 years were due solely to differences in their motor abilities and not to changes in their cognitive capacities.

Our study also suggests that the continuation task, in which the external tempo is discontinued, is more cognitively demanding than the synchronization task. Indeed, our results showed that the effect of age on the flexibility rate was significant in the continuation phase, while it was not significant in the synchronization phase. This was due to the younger children, who exhibited difficulties in maintaining the tempo initiated in the synchronization phase. Indeed, when the perceived tempo was discontinued, they accelerated their tempo, producing shorter ITIs than the older children in all the ISI conditions. Our correlation analyses indicated that the development of motor abilities explained a large proportion of the developmental differences in rhythmic performance (flexibility rate, CV, and intercept) for both the continuation phase and the synchronization phase. However, our analyses also tended to show that, unlike in the synchronization phase, some of the performance indices in the continuation phase were or tended to be significantly related to individual memory capacities, at the level of both short-term memory (CV of ITI for 500-ms) and working memory (CV of ITI and Intercept parameter). As far as the attentional capacities assessed in our study are concerned, these were never significantly correlated with the children’s performance in our tapping task. Our results are thus consistent with those obtained from adults showing a significant correlation between their performances in the continuation phase and their cognitive scores (Grahn & Schuit, 2012; Madison et al., 2009). Our findings therefore confirm that the continuation phase requires memory capacities if subjects are to be able to reproduce the rhythm correctly. However, these

capacities are limited in young children (Cowan, 2016; Gathercole et al., 2004; Pickering, 2001), thus explaining their poorer performance in this phase.

Both the short-term and the working memory scores tended to be significantly correlated with the CV of ITI in the continuation phase. However, for short-term memory, the correlation was significant only for the faster tempo (500-ms ISI), while it tended to be significant for working memory for a slower tempo (700-ms ISI). Short-term and working memory capacities are closely related, as discussed by Baddeley in his working memory model (Baddeley, 2000; Baddeley & Hitch, 1974). Our results nevertheless suggest that the capacity to maintain a rhythm in short-term memory is not sufficient in itself to account for individual differences in continuation performance. Other operations involved in working memory activity are required, such as the updating of information in memory and/or the manipulation of information in memory. The continuation task therefore requires not only short-term mechanisms for the maintenance of rhythm in memory, but also working memory-specific mechanisms for the reproduction of this rhythm. However, our study, which used neuropsychological tests that have been standardized and validated for children, does not allow us to clearly identify what working memory components are involved in the reproduction of rhythm. Further investigations are needed to examine this question in greater detail.

In conclusion, our study examining synchronization performance in young children in an age range with great inter-individual differences in terms of motor and cognitive capacities clearly confirms that the temporal regulation of motor rhythm in a finger-tapping task in the presence of an isochronous sequence of sounds is automatic, or at least relatively undemanding at the cognitive level. Consequently, age-related differences in synchronization performance are mainly linked to the development of motor rather than cognitive abilities. In our study, the children with the poorest motor capacities did indeed experience more difficulties in modifying their SMT and produced shorter and more variable ITI in the synchronization phase. However, reproducing a rhythm places greater demands on the cognitive control processes because it requires the ability to maintain and manipulate the learned rhythm in memory. Consequently, the developmental trajectories are different between the two phases of the synchronization task, i.e., the synchronization phase involving stimulus-driven processes and the continuation phase, which relies more on cognitive control processes.

Acknowledgements

This study was funded by a grant (TIMESTORM) from the European Commission, Horizon 2020 research and innovation action (H2020-FETPROACT-2014) awarded to SD. We thank the teachers and head-teachers of the Aristide Briand School, the La Serre School, the Vercingetorix School, the school of Ceyrat-Boissejour, the school of Margeride, Saint Angel and Saint Jean d'Heur. We thank Stephanie Mailhot and Karine Bonnessagne for their help during the collection of data.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest

References

- Albaret, J. M., & Chaix, Y. (2012). Trouble de l'acquisition de la coordination: bases neurobiologiques et aspects neurophysiologiques. *Clinical Neurophysiology*, 42, 1-2, 11-17.
- Annett, M. (1992). Five tests of hand skill. *Cortex*, 28, 583-600.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-422.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. Bower (Ed.), *The Psychology of*

- Learning and Motivation*, (Vol. 8, pp. 47-90). New York: Academic Press.
- Bailey, J. A., & Penhune, V. B. (2010). Rhythm synchronization performance and auditory working memory in early- and late-trained musicians. *Experimental Brain Research*, 204, 91-101.
- Bernieri, F. J., Reznick, J. S., & Rosenthal, R. (1988). Synchrony, pseudosynchrony, and dissynchrony: Measuring the entrainment process in mother-infant interactions. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54, 2, 243.
- Bobin-Bègue, A., & Provasi, J. (2008). Régulation rythmique avant 4 ans: effet d'un tempo auditif sur le tempo moteur. *L'Année Psychologique*, 108, 631.
- Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008). Moving on time: brain network for auditory-motor synchronization is modulated by rhythm complexity and musical training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 226-239.
- Cohen, M. (1997). Children's memory scale (CMS). *San Antonio: The Psychological Corporation*.
- Comstock, D. C., Hove, M. J., & Balasubramaniam, R. (2018) Sensorimotor Synchronization With Auditory and Visual Modalities: Behavioral and Neural Differences. *Frontiers in Computational Neuroscience*. 12, 53. doi: 10.3389/fncom.2018.00053
- Coull, J., & Droit-Volet, S. (2018). Explicit understanding of duration develops implicitly through action. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(10), 923–937.
- Coull, J. T., Davranche, K., Nazarian, B., & Vidal, F. (2013). Functional anatomy of timing differs for production versus prediction of time intervals. *Neuropsychologia*, 51, 309-319.
- Coull, J. T., Nazarian, B., & Vidal, F. (2008). Timing, storage, and comparison of stimulus duration engage discrete anatomical components of a perceptual timing network. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 2185-2197.
- Cowan, N. (2016). Working Memory Maturation: Can We Get at the Essence of Cognitive Growth? Association for psychological science. *Perspectives on Psychological Science*, 11, 239-264.
- De Castelnau, P., Albaret, J. M., Chaix, Y., & Zanone, P. G. (2007). Developmental coordination disorder pertains to a deficit in perceptuo-motor synchronization independent of attentional capacities. *Human Movement Science*, 26, 3, 477-490
- De Ribaupierre, A., & Lecerf, T. (2018). On the Importance of Intraindividual Variability in Cognitive Development. *Journal of Intelligence*, 6, 2, 17.
- Delevoeye-Turrell, Y., & Wing, A. M. (2004). Action and motor skills: adaptive behaviour for intended goals. *Handbook of Cognition*, 130-157.
- Delevoeye-Turrell, Y., Dione, M., & Agneray, G. (2014). Spontaneous motor tempo is the easiest pace to act upon for both the emergent and the predictive timing modes. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 126, 121-122.
- Drake, C., Jones, M. R., & Baruch, C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences: attunement, referent period, focal attending. *Cognition*, 77, 251-288.
- Drewing, K., Aschersleben, G., & Li, S-H. (2006). Sensorimotor synchronization across the life span. *International Journal of Behavioral Development*, 30, 280-287.
- Droit-Volet, S. (2013). Time perception in children: A neurodevelopmental approach. *Neuropsychologia*, 51, 220–234.
- Droit-Volet, S., & Coull, J. T. (2016). Distinct developmental trajectories for explicit and implicit timing. *Journal of Experimental Child Psychology*, 150, 141-154.
- Droit-Volet, S. (2016). Development of time. *Current Opinion in Behavioural Sciences*, 8, 102-109.
- Feldman, R. (2006). From biological rhythms to social rhythms: Physiological precursors of mother-infant synchrony. *Developmental Psychology*, 42, 1, 175.

- Feldman, R., Magori-Cohen, R., Galili, G., Singer, M., & Louzoun, Y. (2011). Mother and infant coordinate heart rhythms through episodes of interaction synchrony. *Infant Behavior and Development*, 34, 4, 569-577.
- Fraisse, P. (1982). Rhythm and tempo. *The Psychology of Music*, 1, 149-180.
- Fraisse, P. (1948). II.-Rythmes auditifs et rythmes visuels. *L'Année Psychologique*, 49, 21- 42.
- Fraisse, P., Chambon, H., & Oléron, G. (1954). Note sur la constance et l'évolution génétique du tempo spontané moteur. *Enfance*, 7, 25-34.
- Gathercole, S. E. (2002). Memory development during the childhood year. In A. D. Baddeley, M. D. Kopelman, & B. A. Wilson (Eds.), *Handbook of memory disorders* (2nd ed., pp. 475–500). Chichester, England: Wiley
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology*, 40, 177-190.
- Getchell, N. (2006). Age and task-related differences in timing stability, consistency, and natural frequency of children's rhythmic, motor coordination. *Developmental Psychobiology: The Journal of the International Society for Developmental Psychobiology*, 48, 8, 675-685.
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theories and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, 84, 279-325.
- Gordon, R. L., Jacobs, M. S., Schuele, C. M., & McAuley, J. D. (2015). Perspectives on the rhythm–grammar link and its implications for typical and atypical language development. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1337, 1, 16-25.
- Gordon, R. L., Shivers, C. M., Wieland, E. A., Kotz, S. A., Yoder, P. J., & McAuley, J. D. (2015). Musical rhythm discrimination explains individual differences in grammar skills in children. *Developmental Science*, 18, 4, 635-644.
- Grahn, J. A. (2012). Neural mechanisms of rhythm perception: Current findings and future perspectives. *Topics in Cognitive Science*, 4, 585-606.
- Grahn, J. A., & Schuit, D. (2012). Individual Differences in Rhythmic Ability: Behavioral and Neuroimaging Investigations. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, 22, 105-121.
- Hary, D., & Moore, G. P. (1987). Synchronizing human movement with an external clock source. *Biological Cybernetics*, 56, 305-311.
- Honing, H. (2012). Without it no music: beat induction as a fundamental musical trait. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1252, 85-91.
- Honing, H., Ten Cate, C., Peretz, I., & Trehub, S. E. (2015). Without it no music: cognition, biology and evolution of musicality. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Sciences*, 370.
- Ivry, R. B., & Hazeltine, R. E. (1995). Perception and production of temporal intervals across a range of durations: Evidence for a common timing mechanism. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 3-18.
- Jones, C. R. G., Claassen, D., Yu, M., Spies, J. R., Malone, T., et al. (2011). Modeling accuracy and variability of motor timing in treated and untreated Parkinson's disease and healthy controls. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 5, 81.
- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (2007). *Nepsy-II*. San Antonio, TX: Pearson.
- Kötz, S. A., Ravignani, A., & Fitch, W. T. (2018). The evolution of rhythm processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(10), 896–910.
- Lenroot, R. K., & Giedd, J. N. (2006). Brain development in children and adolescents: Insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 30, 718–729.
- Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2003). Distinct systems for automatic and cognitively controlled time measurement: evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology*, 13, 250-255.

- Madison, G., & Merker, B. (2004). Human sensorimotor tracking of continuous subliminal deviations from isochrony. *Neuroscience Letters*, 370, 69-73.
- Madison, G., Forsman, L., Blom, Ö., Karabanov, A., & Ullén, F. (2009). Correlations between intelligence and components of serial timing variability. *Intelligence*, 37, 68-75.
- McAuley, J. D., Jones, M. R., Holub, S., Johnston, H. M., & Miller, N. S. (2006). The time of our lives: life span development of timing and event tracking. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135, 348.
- Monier, F., & Droit-Volet, S. (2016). Synchrony and Emotion in Children and Adults. *International Journal of Psychology*, 53, 3, 184-193.
- Pickering, S. J. (2001). The development of visuo-spatial working memory. *Memory*, 9, 423-432.
- Provasi, J., & Bobin-Bègue, A. (2003). Spontaneous motor tempo and rhythmical synchronization in 2 1/2- and 4-year-old children. *International Journal of Behavioral Development*, 27, 220-231.
- Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 969-992.
- Repp, B. H., & Keller, P. E., (2004) Adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization: effects of intention, attention, and awareness, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 57A, 499–521
- Repp, B. H., & Su, Y. H. (2013). Sensorimotor synchronization: a review of recent research (2006–2012). *Psychonomic Bulletin & Review*, 20, 403-452.
- Serrien, D. J., Sovijärvi-Spapé, M. M., & Rana, G. (2014). Developmental changes in motor control: Insights from bimanual coordination. *Developmental Psychology*, 50(1), 316–323.
- Sowell, E. R., Delis, D., Stiles, J., & Jernigan, T. L. (2001). Improved memory functioning and frontal lobe maturation between childhood and adolescence: A structural MRI study. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 7, 312–322.
- Thompson, E. C., White-Schwoch, T., Tierney, A., & Kraus, N. (2015). Beat synchronization across the lifespan: intersection of development and musical experience. *PloS one*, 10, 6.
- Tierney, A. T., & Kraus, N. (2013). The ability to tap to a beat relates to cognitive, linguistic, and perceptual skills. *Brain and Language*, 124, 225-231.
- Trehub, S. E., Trainor, L. J., & Unyk, A. M. (1993). Music and speech processing in the first year of life. *Advances in Child Development and Behavior*, 24, 1-35.
- Wing, A. M., & Kristofferson, A. B. (1973). Response delays and the timing of discrete motor responses. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 14, 5-12.

Acknowledgment

This study was funded by a grant (TIMESTORM) from the European Commission, Horizon 2020 research and innovation action (H2020-FETPROACT-2014). We thank the teachers and headteachers, Ms Besairie and Mr Auxerre, of the Jean Moulin School and the Aimé Rudel School.

Chapitre 6

Etude sur l'Effet bénéfique de l'action sur l'apprentissage temporel

Etude 2, 3 et 4

Résumé

Objectif

Dans ce cadre, 3 études ont été réalisées qui ont fait l'objet d'une publication dans *Developmental Science*. En effet, après avoir déterminé le lien entre le développement des habiletés motrices et la performance en synchronisation, nous avons décidé d'investiguer le rôle de la motricité dans les traitements temporels. Pour cela nous avons examiné si un apprentissage sensorimoteur améliore les performances temporelles des jeunes enfants et des adultes, comparé à un simple apprentissage visuel.

Méthode

Dans ces études sur le rôle de l'action dans les performances temporelles, la population étudiée était composée d'enfants âgés de 5 et 8 ans et d'adultes. Comme nous l'avons vu dans la première étude de cette thèse, il y a peu de différences développementales dans les performances de TMS. Aussi nous avons décidé de ne pas étudier le TMS dans ces nouvelles études. De plus, pour rendre la tâche de synchronisation plus difficile, nous avons choisi un ISI long de 800 ms.

Etant donné l'influence particulière de la motricité sur la synchronisation dans notre étude 1, nous avons, utilisé une tâche de synchronisation proche de celle de notre première étude. Dans cette tâche, les participants voient une séquence rythmique avec un stimulus visuel apparaissant toutes les 800 ms. Dans la condition « sensorimotrice », ils doivent taper en coïncidence avec le stimulus visuel. Dans la condition « visuelle », ils doivent simplement regarder cette séquence rythmique. Pour l'étude 2, dans les deux conditions d'apprentissage,

cette phase d'apprentissage du rythme est suivie d'une phase de reproduction (ou continuation) du rythme. Ensuite, dans notre étude 3, nous avons souhaité examiner si l'effet bénéfique de cet apprentissage sensorimoteur pouvait être généralisé à une tâche de perception, autrement dit de discrimination de rythme. C'est pourquoi, dans l'étude 3, après une phase d'apprentissage et des conditions similaires à celles utilisées dans l'étude 2, les participants devaient réaliser une tâche de discrimination de rythme au lieu de la tâche de reproduction de rythme. Enfin, dans l'étude 4, nous avons examiné si la connaissance d'un rythme pouvait être transférée à une tâche de perception de durée, c'est-à-dire à la perception d'une durée isolée et non incluse dans une séquence rythmique. Notre but était donc de voir si un apprentissage par l'action permettrait de mieux transférer l'ITI appris à un autre contexte. Nous avons donc conservé les mêmes conditions d'apprentissage, mais remplacé la tâche de discrimination de rythme par une tâche de discrimination de durée. Pour chaque étude, nous avons également évalué les capacités motrices et cognitives de chaque participant au moyen de tests neuropsychologiques (mémoire à court terme, mémoire de travail).

Résultats

Tout d'abord, nos résultats ont montré un effet bénéfique de l'action sur l'apprentissage temporel dans nos trois études. En effet, que l'on utilise une tâche motrice (reproduction) ou perceptive (discrimination) on constate que l'utilisation de l'action lors de la phase d'apprentissage améliore l'apprentissage de l'intervalle temporel en permettant une meilleure représentation de ce dernier. De plus, nos études ont montré une évolution de l'effet de l'action selon la difficulté des tâches et l'âge des participants. Dans l'étude 2 où il s'agit d'une tâche de reproduction de rythme, seules les performances des enfants de 5 ans ont été meilleures dans la condition d'apprentissage sensorimoteur que dans la condition d'apprentissage visuel. Chez les enfants âgés de 8 ans et les adultes les performances étaient bonnes quelle que soit la condition d'apprentissage. Dans les deux autres études, les enfants âgés de 5 ans ne sont pas parvenus à

réaliser les tâches de discrimination. Autrement dit, quand la tâche tests (discrimination de rythme, discrimination de durée) diffère de la tâche utilisée dans la phase d'apprentissage, les enfants de 5 ans obtiennent de mauvaises performances qui ne sont pas améliorées par l'apprentissage sensorimoteur. En revanche, les performances temporelles sont meilleures en condition d'apprentissage sensorimoteur qu'en condition d'apprentissage visuel chez les enfants âgés de 8 ans. L'action pendant la phase d'apprentissage les aide donc à encoder ou à maintenir l'intervalle temporel en mémoire. Enfin, les performances temporelles des adultes ont aussi été meilleures en condition d'apprentissage sensorimoteur qu'en condition d'apprentissage visuel, mais uniquement pour la tâche la plus difficile (étude 4), où il s'agissait de discriminer des durées isolées. Les adultes ont donc tiré bénéfice de l'action dans la tâche la plus difficile qui nécessitait d'extraire la durée à partir du rythme. Ainsi, chez l'adulte, l'action apporte toujours un bénéfice dans l'apprentissage de l'intervalle temporel dans une séquence rythmique mais uniquement quand la tâche est particulièrement coûteuse du point de vue cognitif. Par ailleurs, l'originalité de nos études est de mettre en évidence la difficulté chez les enfants à extraire et à isoler l'intervalle temporel du rythme de la séquence rythmique. Seuls les adultes parviennent à transférer leur représentation de l'ITI appris dans une séquence rythmique à une tâche de discrimination de durée. Ainsi isoler l'ITI de sa séquence rythmique demande un effort cognitif dont les jeunes enfants ne sont pas capables. Chez les jeunes enfants, le rythme est donc perçu dans sa globalité, dans son ensemble et non comme une suite d'intervalles isolés. D'autres expériences doivent être réalisées sur cette question intéressante. En outre, l'analyse des corrélations entre les performances temporelles et les capacités cognitives montre que les performances temporelles dans la condition d'apprentissage visuel sont liées à la fois aux capacités motrices et de mémoire de travail, alors que l'apprentissage moteur améliore les performances temporelles indépendamment des différences interindividuelles dans les

capacités motrices ou cognitives. Aussi l'action aide l'enfant à se construire une représentation du temps plus flexible qui favorise l'encodage du couplage temps-action.

Conclusion

Ces études nous ont permis de confirmer l'effet bénéfique d'un apprentissage sensorimoteur dans la représentation des intervalles temporels chez l'enfant et chez l'adulte quand la tâche est particulièrement difficile comme dans l'étude 4. Toutefois, le mécanisme par lequel les performances temporelles sont améliorées n'est pas encore clair et d'autres travaux sont nécessaires. C'est pourquoi, nous avons conduit l'étude 5 présentée au chapitre 6.

The beneficial effect of synchronized action on motor and perceptual timing in children

Monier, F., Droit-Volet, S., & Coull, J.T. (2019). The beneficial effect of synchronized action on motor and perceptual timing in children. *Developmental Science*.

Abstract

We examined the role of action in motor and perceptual timing across development. Adults and children aged 5 or 8 years old learned the duration of a rhythmic interval with or without concurrent action. We compared the effects of visuomotor versus visual learning on subsequent timing behavior in 3 different tasks: rhythm reproduction (Experiment 1), rhythm discrimination (Experiment 2) and interval discrimination (Experiment 3). Visuo-motor learning consisted of sensorimotor synchronization (tapping) to an isochronous visual rhythmic stimulus (ISI = 800ms), whereas visual learning consisted of simply observing this rhythmic stimulus. Results confirmed our hypothesis that synchronized action during learning systematically benefitted subsequent timing performance, particularly for younger children. Action-related improvements in accuracy were observed for both motor and perceptual timing in 5-years olds, and for perceptual timing in the two older age groups. Benefits on perceptual timing tasks indicate that action shapes the cognitive representation of interval duration. Moreover, correlations with neuropsychological scores indicated that while timing performance in the visual learning condition depended on motor and memory capacity, visuomotor learning facilitated an accurate representation of time independently of individual differences in motor and memory skill. Overall, our findings support the idea that action helps children to construct an independent and flexible representation of time, which leads to coupled sensorimotor coding for action and time.

Keywords: Synchronization; Timing; Development; Action; Associative learning

1. Introduction

Time elapses incessantly. It has no intrinsic characteristics that can be processed directly by human senses. Consequently, our representation of duration is linked to what we experience, and what we feel, during this duration (Michon & Jackson, 1985; Droit-Volet & Meck, 2007; Droit-Volet, 2016; Droit-Volet, submitted; McCormack & Hoerl, 2017). Nevertheless, adults can keep precise representations of duration in mind, especially when duration are relatively short (ie. In the range of a few hundred milliseconds to seconds). So how do we learn about time? How are such representations of time constructed in the mind? Our hypothesis is that the construction of a representation of duration is grounded in a coupled integration between elapsing time and movement, i.e. action.

For many years, the sense of time was described as an independent cognitive process, depending upon a system in the brain (“internal clock”) dedicated to processing time (Gibbon, 1977; Gibbon, Church, & Meck, 1984; Treisman, 1963). However, for the last few years this point of view has begun to change. Indeed, attempts to locate the internal clock in the brain revealed that a brain structure devoted solely to time does not exist. Instead, timing is processed by many brain areas, especially those traditionally dedicated to motor processing, and involves a complex cortico-striatal circuit (Matell & Meck, 2000; Wiener, Turkeltaub, & Coslett, 2010; Coull, Cheng & Meck, 2011; Harrington & Jahanshahi, 2016; Kononowicz, Van Rijn & Meck, 2017). Moreover, “timing” does not refer to one, but to a set of complex processes, each of which is recruited as a function of the task in hand (Grondin, 2001; Coull & Nobre, 2008; Buonomano & Laje, 2010). “Motor timing” tasks correspond to the production of timed motor actions, encompassing the production of single intervals or durations, the production of a rhythmic sequence and the complex coordination of motor acts (playing an instrument or catching a ball). “Perceptual timing” tasks refer to tasks in which no movement is needed, whether it concerns discrimination of the durations of single stimuli or the speed of rhythmic sequences.

Interestingly, brain structures involved in motor function, such as the striatum or Supplementary Motor Area (SMA), have been shown to be implicated in both motor and perceptual timing in functional neuroimaging studies (Chen, Penhune & Zatorre, 2008; Weiner, et al. 2010; Coull, et al., 2011; Coull, Vidal & Burle, 2016; Schwartz, Rothermich & Kotz, 2012) and in studies of patients with Parkinson’s Disease (Grahn & Brett, 2009; Dalla-Bella et al., 2015). Moreover, neural oscillations in the beta band frequency, which index motor function (Hari & Salmelin, 1997; Baker, 2007), vary as a function of temporal processing (Cravo et al., 2011; Kononowicz & Van Rijn, 2015; Mento et al, 2017), even when no motor responses are produced (Fujioka et al., 2012; Cirelli et al., 2014). Together, these results indicate that motor networks are recruited to process timing even in the absence of movement and suggest a strong relationship between the perception of duration and action (Cassenti, 2011).

The idea that action can influence perception is not new. It is central to theories of embodied cognition (Barsalou, 2009) and mirror neurons (Gallese et al., 1996). For example, in the field of emotion, participants’ understanding of another person’s emotions was attenuated when they could not move the muscles of their faces (Niedenthal, Krauth-Gruber & Ric, 2006; Oberman, Winkielman & Ramachandran, 2007). The common coding theory (Prinz, 1990, 1997; Hommel et al., 2001) also proposes that an action (planning and execution) and its sensory consequences are coded together in the brain. This shared representation could therefore be influenced by information from both perception (inverse models) and action (forward models). Such sensorimotor integration might be linked to associative learning processes (Heyes & Ray, 2000; Heyes, 2010). According to some authors (Leman, 2010; Cox,

2011; Maes, Leman, Palmer & Wanderley, 2014), sensorimotor integration also encompasses temporal representation of action. Movement execution during music, for example, could contribute to a more precise representation of temporal intervals by this process of associative learning. In adult, several studies have shown that, compared to mere listening, moving to a beat improves perceptual discrimination of stimuli occurring on the beat (Morillon et al., 2014), improves the perception of intervals that composed a rhythm in a subsequent discrimination task (Iordanescu, et al., 2013; Manning & Schutz, 2013, 2016; Manning, Harris & Schutz, 2017), and helps participants to find the beat in ambiguous rhythms (Phillips-Silver & Trainor, 2007; Su & Poppel, 2012). The effect of synchronized movement is particularly beneficial for non-musicians, improving their beat-finding skill to that of musicians (Su & Poppel, 2012). Even the mere imagination of timed movement improves subsequent timing performance (Fautrelle et al., 2015).

Few studies have examined the effect of action on timing performance in children. Nevertheless, several findings support a strong link between timing and action throughout development. In infancy, the beat with which babies were bounced to an ambiguous rhythm influenced their later identification of rhythm sequences (Phillips-Silver & Trainor, 2005). Later in development, children learn to discriminate the duration of single intervals and 3-year-olds are more accurate in estimating durations if these intervals are filled by a coupled action than if they are unfilled/empty Droit-Volet (2008). In addition, when 3-year-olds were asked to press a button “longer than before” they were unable to do so but when asked to press a button “harder than before”, they consistently produced longer durations (Droit-Volet, 1998). In other words, they represented duration in terms of force. Moreover, 3-year-olds were unable to extract the temporal information from one motor act and transfer it to another one (Droit-Volet & Rattat, 1999). At this age, each duration remains intrinsically associated to the action with which it was experienced. Young children’s representation of duration is therefore confounded with a motor one.

Taken as a whole, results in infants, children and adults suggest that the beneficial effects of action on timing generalize across age and temporal contexts (single stimuli or rhythmic sequences). Nevertheless, the temporal benefits of action might be particularly useful when representations of time are rather fragile, for example in young children whose estimates of time are very variable (Droit-Volet, 2016). Therefore, in the present study, we examined the effect of action on timing performance across development in children. Therefore, in the present study, we examined the effect of action on timing performance across development: in children aged 5 and 8 years, as well as in adults. In each of our experiments, participants had to learn the duration of visual inter-stimulus intervals (ISI) by either tapping in synchrony to an isochronous sequence (sensorimotor learning) or by simply observing the sequence (visual learning). We then tested the potentially beneficial effects of action (i.e. tapping) on temporal learning by measuring performance in three different timing tasks. First, we tested the effects of action on rhythmic motor timing in a rhythm reproduction task, in which participants had to reproduce the tempo of the isochronous sequence they had previously learned (Experiment 1). Then, we tested its effects on rhythm *perception* in a rhythm discrimination task, to examine whether the effects of action on learning would transfer to a sensory representation of rhythm (Experiment 2). Finally, we explored the effect of action in a more cognitively demanding interval discrimination task, in which participants had to extract the duration of the ISI that had defined the learned sequence and compare it to presentations of single intervals (Experiment 3). We used sequential presentation of intervals for the learning phase of each experiment because temporal intervals are learnt more easily when presented in an isochronous sequence of stimuli than as an isolated event (Drake & Botte, 1993; Grondin, 2012; Merchant, Zarco, & Prado, 2008; Schulze, 1989), especially in children (Johnson, Bryan, Polonowita, Decroupet,

& Coull, 2016). We deliberately chose an ISI (800 ms) that was longer than the typical spontaneous motor tempo (SMT; around 500–600 ms) to ensure that participants' performance was the result of having learnt a specific ISI and not a simple expression of their SMT. In the same vein, we chose to present isochronous sequences in the visual, rather than the more usual auditory, modality, to induce an additional degree of temporal variability into task performance (Grondin et al, 1998; Drake & Botte, 1993; Repp & Penel, 2004). If performance had been at ceiling, as it might have been with auditory rhythms around the SMT, it would have been impossible to demonstrate action-induced improvements in temporal performance. Our hypothesis was that, compared to visual learning, sensorimotor learning (action) would improve both motor and perceptual timing, especially in younger children aged 5 years old.

2. Experiment 1

In this first experiment, we compared the effect of visuo-motor learning (action) to that of visual learning on motor timing, using a rhythm reproduction task. The rhythm reproduction task consisted of 2 phases: a learning phase (rhythm presentation) and a reproduction phase (Fraisse, 1948; Repp, 2005; Repp & Su, 2013). This task is similar to the classic synchronization-continuation task (Wing and Kristofferson, 1973), but with the addition of a short pause between the learning and reproduction phases. We measured accuracy and variability of reproduction performance after participants had either to synchronize their movements to the rhythm (visuo-motor learning) or simply watched the rhythm (visual learning).

During reproduction of auditory rhythm, it has been shown that age-related differences mainly occur with ISIs that are slower (> 700 ms) than children's preferred tempo (from 350 to 500-ms inter-tap intervals, ITIs) (Fraisse et al., 1954; Drake et al., 2000; Provasi & Bobin-Bègue, 2003; McAuley et al., 2006; Bobin-Bègue & Provasi, 2005; Provasi et al., 2014; Monier & Droit-Volet, 2016). Although young children aged from 3 to 5 years old are able to tap in synchrony with a slow external ISI, their tapping rate accelerates when this external rhythm is removed in the reproduction phase, returning towards their preferred tempo. Their ITIs in the reproduction phase are also more variable than those of older participants. Consequently, we hypothesized that ITIs in the reproduction phase would be longer and less variable in the visuo-motor condition than the visual learning one, particularly in the youngest children who produce faster and more variable ITIs.

2.1. Method

2.1.1. Participants

The sample was composed of 139 participants: Fifty-one 5-year-olds ($M = 5.38$, $SE = 0.29$), forty-eight 8-year-olds ($M = 8.07$, $SE = 0.89$) and forty adults ($M = 19.5$, $SE = 0.40$). The children were recruited from nursery and primary schools and their parents signed a consent form for their voluntary participation in this experiment. The adults were students at Clermont Auvergne University, and also signed a consent form. The experiment was carried out in accordance with the Declaration of Helsinki, and was approved by both the inspector of the academy of the French National Education Ministry and the Clermont-Ferrand Sud-Est VI Statutory Ethics Committee (CPP, Sud-Est VI, France).

2.1.2. Material

The participants were tested individually in a quiet room of their school (children) or university (adults). They were seated in front of a PC computer that controlled the experimental stimuli and recorded responses via E-prime II software. Their eyes were at a distance of approximately 50 cm from the computer screen. The visual stimuli used for the rhythm reproduction task were white dots (5 cm in diameter) that appeared for 100 ms. The participants responded by pressing on the spacebar of the computer keyboard with the index finger of their dominant hand.

2.1.3. Procedure

Rhythm reproduction task

All participants performed a rhythm reproduction task composed of a learning phase and a reproduction phase. In the learning phase, participants were presented with the target interval of 800-ms presented in a regular sequence of 33-dots (800-ms ISI). Then, after a 2-s interval, the participants had to reproduce the ISI by tapping on the space bar of the computer for 33 taps (reproduction phase). There were 3 successive trials of the reproduction phase (each trial comprised 33 taps), with a 2-s inter-trial interval. Importantly, participants were randomly assigned to one of two learning conditions: visuo-motor learning or visual learning. The procedure was similar in these two conditions. However, in the visual condition, the participants simply had to watch the sequence of dots and were explicitly asked not to move. In the visuo-motor learning condition, they had to watch the sequence of dots and were required to tap coincidentally with each dot onset.

Neuropsychological assessment

After the temporal task, participants' motor and cognitive abilities were assessed with three different neuropsychological tests presented in random order. The "Peg Moving Task" (PMT-5) (Annett, 1992) measures fine motor ability. We used the first part of the PMT, in which participants insert pegs one-by-one in a row of holes as quickly as possible using their dominant and non-dominant hand. The raw score corresponds to the number of pegs they inserted in the row of holes in 30 seconds. Subtests of the CMS (Children's Memory Scale, Cohen, 1997) were used to assess memory. Short-term memory was measured by the forward digit span subtest, in which participants had to immediately repeat a sequence of digits given by the experimenter. There were two trials per digit sequence, starting from a sequence of 3 up to a maximum of 8 digits. The test was stopped when the participant made two consecutive errors, with a maximum score of 16. Working memory was indexed by the "Sequences" subtest. In this test, participants had to mentally manipulate a sequence of verbal material as quickly as possible. The test consisted of 12 items. For each item, the score ranged from 0 to 4 points and depended on the number of errors made and speed of execution. The final raw score was obtained by adding scores on the 12 items.

Table 1. Mean raw scores (standard deviation) for neuropsychological tests of motor ability, short-term memory and working memory in the three age groups for the three experiments.

<i>Experiment 1</i>			
	5-years	8-years	Adults
Motor ability	18.90 (5.6)	25 (3.6)	30.3 (3.3)
Short-term memory	5.7 (1.6)	7.6 (2)	9 (1.6)
Working memory	15.5 (8)	39.1 (9.6)	70.6 (7)
<i>Experiment 2</i>			
	5-years	8-years	Adults
Motor ability	19.70 (3.4)	25.88 (3.1)	30.46 (3.2)
Short-term memory	5.09 (3.1)	6.7 (1.3)	8.9 (1.8)
Working memory	17.08 (4.8)	46.14 (10.8)	68.8 (8.4)
<i>Experiment 3</i>			
	5-years	8-years	Adults
Motor ability	19.2 (2.2)	25.7 (3.4)	29.2 (3.4)
Short-term memory	6.7 (1.6)	7.55 (2,8)	8.5 (2,4)
Working memory	24 (14.9)	41.8 (27)	50.7 (23)

2.2. Results

We calculated the mean and the variability (SD) of inter-tap intervals (ITI) produced by participants over the 3 reproduction trials. The results for the 3 age groups are presented in Fig.1.

2.2.1. Accuracy

The ANOVA of mean ITI, with age and learning condition as between-subjects factors, revealed a significant main effect of age, $F(2, 133) = 27.1, p < .001, \eta^2_p = .29$. Bonferroni post-hoc tests showed that intervals produced by the adults ($M = 807, SE = 24$) and the 8-year-olds ($M = 769, SE = 22$) were similar ($p = .81$) and were close to the 800ms target interval. However, the mean ITI was significantly shorter in the 5-year-olds ($M = 584, SE = 24.96$) than in the two older age groups (all $p < .001$). Although the effect of learning was not significant, $F(1, 133) = 1.05, p = .30$, the learning x age interaction just reached significance, $F(2, 133) = 2.99, p = .05, \eta^2_p = .04$. The visuo-motor learning condition improved 5 year-olds' performance by helping them to produce longer and more accurate ITIs than in the visual learning condition, $F(1, 49) = 3.88, p = .05, \eta^2_p = .04$. By contrast, the type of learning had no effect on ITIs in the older age groups (8 years, $F(1, 46) = 0.049, p = .49$; adults, $F(1, 38) = 0.28, p = .59$).

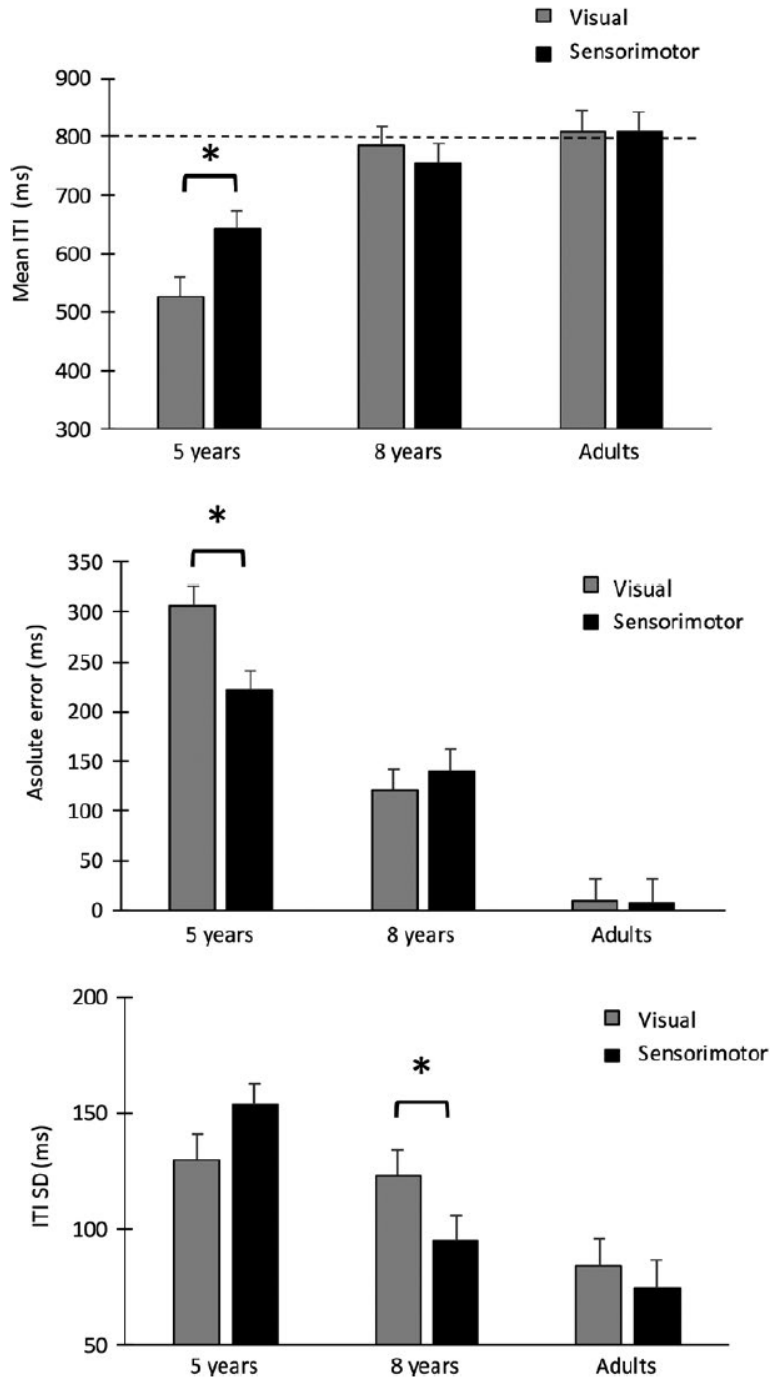


Figure 1. Mean, absolute error and variability of reproduced inter-tap intervals (ITI) in the rhythm reproduction task following either visual or sensorimotor learning in the three age groups. The dotted line indicates the learned 800 ms ITI

To confirm these results, we calculated for all participants an index of absolute deviation (Absolute error) from the requested interval across the three reproduction trials ($Abs(error) = |800 - ITI|$) (Fig. 1). An ANOVA of $Abs(error)$ revealed a significant main effect of age, $F(2, 133) = 67.80, p < .001, \eta^2_p = .50$. $Abs(error)$ was smaller for adults than for the two groups of children (Bonferroni, both $p < .001$) and was smaller for 8-year-olds than for 5-year-olds ($p < .001$). Similar to the results of mean ITI, no main effect of learning was observed, $F(1, 133) =$

1.54, $p = .21$, but the interaction between learning and age was significant, $F(2, 133) = 3.31$, $p < .04$, $\eta^2_p = .05$. Post-hoc analysis revealed that adults and 8-year-old children performed equally well in both learning conditions ($F(1, 36) = .047$, $p = .63$; $F(1, 46) = .05$, $p = .83$, respectively). Crucially, 5-year-olds reproduced the interval more accurately in the visuo-motor learning condition ($M = 222$, $SE = 28$) than the visual learning one ($M = 305$, $SE = 29$), $F(1, 49) = 4.15$, $p = .05$, $\eta^2_p = .08$.

In sum, action had no effect on the length of reproduced intervals in the 8-year-olds and adults, who were able to produce accurate ITIs even in the visual learning condition. By contrast, synchronized motor activity during the temporal learning phase helped younger children obtain more accurate temporal performance.

2.2.2. Variability

An ANOVA of the standard deviation (SD) of ITIs showed a significant main effect of age $F(2, 133) = 16.07$, $p < .001$, $\eta^2_p = .19$, with temporal variability decreasing with age. The adults ($M = 79.72$, $SE = 7.00$) were less variable in their temporal reproductions than the 8-year-olds ($M = 109.24$, $SE = 7.5$, $p = .023$) or the 5-year-olds ($M = 141$, $SE = 7.28$), and the 8-year-olds were less variable than the 5-year-olds (Bonferroni, all $p < .01$). Although analysis revealed no significant main effect of learning, $F(1, 133) = 0.3$, $p = .57$, there was a significant learning x age interaction, $F(1, 133) = 3.07$, $p = .05$, $\eta^2_p = .04$. Examining this interaction, we observed that there was no effect of learning for adults or 5-year-olds ($p = .35$ and $p = .23$, respectively). By contrast, the 8-year-olds' performance was less variable in the visuo-motor learning condition ($M = 95$, $SE = 9.5$) than the visual learning one ($M = 123$, $SE = 9.2$), $F(1, 46) = 4.52$, $p = .04$, $\eta^2_p = .09$.

2.2.3. Correlation with neuropsychological scores

Table 1 shows raw scores of the neuropsychological tests for the 3 age groups. ANOVAs with age as a between-subjects factor showed a significant main effect of age for all neuropsychological scores: motor ability, $F(2, 136) = 72.84$, short-term memory, $F(2, 133) = 37.96$, and working memory, $F(2, 131) = 470.17$, all $p < .001$. Neuropsychological scores increased with increasing age (Bonferroni, all $p < .05$).

For each of the two learning conditions, we ran correlational analyses between neuropsychological scores and the different temporal measures obtained in the rhythm reproduction task: Mean ITI, ITI Abs(error) and ITI SD (Table 2). Both measures of accuracy (mean ITI and ITI Abs(error)) were significantly correlated to short-term and working memory (all $p < .01$) in both learning conditions. Consequently, the higher the memory capacity, the more accurate were the produced intervals. On the other hand, short-term memory capacity correlated with variability (ITI SD) in the visual, but not visuo-motor, learning condition. After visual learning, the better a participant's short-term memory, the lower was their reproduction variability. By contrast, variability was no longer dependent on individual memory capacity after the participant had undergone visuo-motor learning. Similarly, individual differences in motor ability significantly correlated with ITI Abs(error) in the visual, but not visuo-motor, learning condition. While lower error was linked to better motor ability in the visual learning group, this measure of performance accuracy no longer depended upon individual motor ability in the visuo-motor group. Our results suggest that motor timing in the rhythm reproduction phase was less dependent on individual short-term memory and motor abilities when the learning phase incorporated a motor component.

Table 2. Correlations between neuropsychological test scores and mean inter-tap interval (ITI), ITI Absolute error (Abs(error)) and ITI standard deviation (*SD*) in the visual learning and the sensorimotor learning conditions of the rhythm reproduction task (Experiment 1)

<i>Visual Learning</i>			
	1	2	3
1. Mean ITI	1		
2. Abs(error)	.83**	1	
3. SD of ITI	.01	.05	1
Motor abilities	.08	-.27*	-.14
Short-term memory	.46**	-.54**	-.40**
Working memory	.51**	-.66**	-.28**

<i>Sensorimotor learning</i>			
	1	2	3
1. Mean ITI	1		
2. Abs(error)	.68**	1	
3. SD of ITI	.14	.37**	1
Motor abilities	-.04	-.22	-.06
Short-term memory	.39**	-.43**	-.21
Working memory	.39**	-.50**	-.60**

2.3. Discussion

In this first experiment, we examined to what extent visuo-motor learning improved subsequent temporal performance in a rhythm reproduction task in children and adults, as compared to visual learning alone. Our results confirmed age-related differences in rhythm reproduction ability that have been observed in previous studies (Fraisse, Chambon, & Oleron, 1954; Provasi & Bobin-Bègue, 2003; McAuley et al., 2006; Monier & Droit-Volet, 2016). We found that temporal reproduction was less accurate and more variable in the youngest children compared to 8 year-olds or adults. Although rhythm reproduction improved by the age of 8, these older children were still more variable than the adults.

More interestingly, we found age-related differences in the improvement in timing conferred by action. Visuomotor learning did not improve reproduction performance in adults who already had very good temporal reproduction performance in the visual learning condition. Watching a regular sequence of 33 ISIs was enough for them to be able to build an internal representation of rhythm and to accurately reproduce it afterwards. However, action clearly helped improve timing performance in the younger children, who generally produced much shorter ITIs in the reproduction phase. In the visual learning condition, the 5-year-olds produced ITIs close to 500ms, i.e. their spontaneous motor tempo (McAuley et al., 2006). They therefore had difficulty learning, and holding in memory, a novel temporal rhythm from mere visual perception of that rhythm. By contrast, in the visuo-motor learning condition, the 5-year-olds succeeded in producing longer ITIs that were closer to the 800ms ISI. Moreover, visuo-motor learning also helped 8 year-olds reduce their reproduction variability. Motor synchronization to a visual rhythm was therefore greatly beneficial for temporal learning in children.

Our results suggest that, in young children, whose timing ability is not yet fully developed, sensori-motor integration is greatly beneficial in learning a new temporal rhythm. However, the measure of timing ability that we used in this study depended itself upon a motor

act (rhythm reproduction). Therefore, the benefits of action during learning might have simply been due to better learning of the repetitive action that was to be subsequently reproduced. With such motor timing tasks, it is therefore difficult to distinguish whether the improvement in children's temporal performance was due to an action-induced enhancement in the mental representation of the temporal interval or to a more straightforward effect on motor execution (Wing & Kristofferson, 1973; Ivry & Hazeltine, 1995; Merchant et al., 2008). To clarify whether action sharpens mental representations of time, we examined the effect of visuo-motor learning on perceptual timing performance in Experiment 2, using a rhythm discrimination task for which no action was required.

3. Experiment 2

To measure the effect of action on the sensory representation of rhythm, children and adults performed a rhythm discrimination task. To match the structure of the task as closely as possible to that used in Experiment 1, we used a temporal generalization paradigm. As in Experiment 1, the initial learning phase required participants either to synchronize their movements to a visual rhythm (sensorimotor learning) or to simply watch the rhythm (visual learning). In the testing phase, participants had to judge whether comparison rhythms were similar, or not, to the rhythm presented in the learning phase. Rather than presenting a standard rhythm prior to each comparison rhythm, as in previous rhythm discrimination studies (e.g. Drake & Botte, 1993), the temporal generalization paradigm puts greater demand on memorized representations of time, thereby affording a greater opportunity to test for potential action-induced improvements in performance. We hypothesized that synchronized action during the learning phase would help participants to build a more accurate representation of timed intervals even for this perceptual timing task. Nevertheless, we hypothesized that action-induced improvement should be greater for younger children, given their relatively poor timing abilities

3.1. Method

3.1.1. Participants

The sample was composed of 126 new participants: forty-three 5-year-olds ($M = 5.46$, $SE = .25$), forty-three 8-year-olds ($M = 8.52$, $SE = .33$), and forty adults ($M = 20.2$; $SE = 1.75$). The participants were recruited in the same way as in Experiment 1. Adult participants and childrens' parents signed informed consent for participation in this experiment, which was carried out in accordance with the Declaration of Helsinki, and approved by the inspectoral committee of the French Education Ministry and the Clermont-Ferrand Sud-Est VI Statutory Ethics Committee (CPP, Sud-Est VI, France).

3.1.2. Material and neuropsychological assessment

The material used to generate stimuli was the same as that used in Experiment 1. Adults gave their response by pressing the "1" key on the computer keyboard for a "yes" response and the "2" key for a "no" response. Children gave their responses orally and the experimenter pressed the corresponding computer keys. After the rhythm discrimination task, we used the same neuropsychological tests as Experiment 1 to assess motor, short-term memory and working memory abilities.

3.1.3. Procedure

The participants performed a rhythm discrimination task composed of a learning phase and a testing phase. In the learning phase, as in Experiment 1, they were presented with a regular sequence of 33 dots (800ms ISI). Participants were randomly assigned to one of the two learning conditions in which they had to either watch this sequence of dots (visual learning condition)

or tap in synchrony with the dots (visuo-motor learning condition). The learning phase was followed after a 2s interval by the testing phase. To assess rhythm discrimination, we used a temporal generalization paradigm in which participants had to judge whether or not a comparison rhythm was the same as a learned rhythm. In the testing phase, participants were presented with 5 different rhythmic sequences of five dots each. These comparison rhythms had ISIs of 400ms, 600ms, 800ms, 1000ms or 1200ms. The 800ms ISI rhythm was presented 12 times and the other four rhythms were presented 4 times each. This made a total of 28 trials presented in random order. Each trial began with a white cross appearing at the center of the screen followed, after the trial-specific ISI, by the sequence of five dots. During the testing phase, participants were asked not to move. At the end of each rhythmic sequence, the participants had to respond whether the comparison rhythm was the same (“yes”) or not (“no”) as the learned rhythm. This discrimination task (learning and testing phases) was performed twice. This made a total of 56 trials.

3.2. Results

For each individual participant, we plotted the proportion of “yes” responses [$p(\text{yes})$] against the comparison ISI to obtain a generalization curve. Generalization curves typically peak around the learned interval (Wearden, 1992; Droit-Volet et al, 2001). We measured the Gaussian fit of individual generalization curves using Prism 7.0 software and excluded participants whose fit (R^2) was inferior to 0.70. Nine 5-year-olds, eight 8-year-olds and one adult did not meet this criterion and were therefore excluded from our statistical analyses. Fig. 2 shows the mean generalization curves for each of the three age groups, for both visuo-motor and visual learning conditions.

3.2.1. Rhythm discrimination performance

Examination of Fig. 2 suggests that the steepness of the generalization curves increased with age, consistent with an improvement in temporal sensitivity (for similar results see MacCormack et al., 1999; Droit-Volet, Clément & Wearden, 2001; Droit-Volet, 2002). The ANOVA of $p(\text{yes})$, with ISI as a within-subjects factor and age and learning as between-subjects factors, confirmed a significant main effect of both age, $F(2, 104) = 8.37, p < .001, \eta^2_p = .14$, and ISI, $F(4, 101) = 154, p < .001, \eta^2_p = .60$, and a significant age x ISI interaction, $F(8, 204) = 6.14, p < .001, \eta^2_p = .11$, indicating that the steepness of the generalization curve did indeed increase with age.

More interestingly, the ANOVA revealed a three-way interaction between age, ISI and learning, $F(8, 416) = 2.02, p = .043, \eta^2_p = .037$. We therefore examined performance in each of the three age groups separately. We obtained significant main effects of ISI for the 5-year olds, $F(4, 29) = 23.46$, the 8-year-olds, $F(4, 30) = 62.6$, and the adults, $F(4, 36) = 86.55$ (all $p < .001$), confirming that all age groups could successfully discriminate the comparison ISIs. However, the learning x ISI interaction reached significance only in the intermediate age group of 8 years old, $F(4, 132) = 2.56, p = .04$, but not in the younger or older age groups (5 years, $F(8, 128) = .92, p = .45$; adults, $F(4, 156) = 1.56, p = .18$).

To verify this differential effect of visuo-motor learning across age groups, we calculated the peak time and the standard deviation (SD) of individual generalization curves using the Gaussian function of Prism software. The peak time is the ISI yielding the highest proportion of “yes” responses, and provides a measure of temporal accuracy. It corresponds to the participant’s subjectively perceived ISI. The SD reflects the width of the curve, and provides a measure of temporal precision. Fig. 3 shows the mean peak time and SD for both learning conditions, in each of the three age groups.

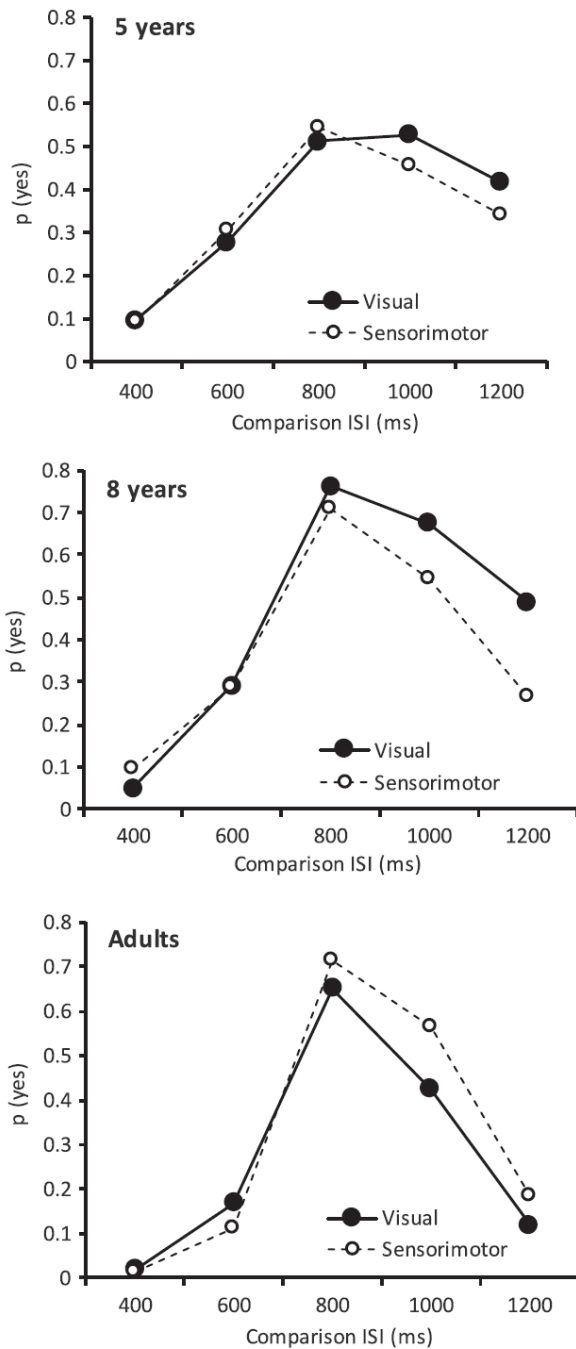


Figure 2. Mean proportion of ‘yes’ responses ($p(\text{yes})$) for each comparison inter-stimulus interval (ISI) in the rhythm discrimination task following either visual or sensorimotor learning in the three age groups

An ANOVA of the peak time, with age and learning as between-subject factors, showed no significant main effect of age, $F(2, 101) = 0.64$, $p = .47$. However, there was a significant main effect of learning, $F(1, 101) = 5.70$, $p = .019$, $\eta^2_p = .053$, and a significant learning \times age interaction, $F(2, 101) = 3.49$, $p = .034$, $\eta^2_p = .065$. Indeed, as can be seen in Fig. 3, both the 5-year-olds and the 8-year-olds better identified the target ISI in the visuo-motor learning condition than in the visual learning one, with a peak time closer to the 800-ms target ISI (5 year olds, 865 vs. 968 respectively, $F(1, 29) = 3.98$, $p = .055$, $\eta^2_p = .12$; 8 year olds, 868.59 vs. 941.77 respectively, $F(1, 33) = 4.79$, $p = .036$, $\eta^2_p = .13$). By contrast, adults performed equally well in both visuo-motor and visual learning conditions (897.97 vs. 873, $F(1, 39) = 0.88$, $p =$

.35).

An ANOVA of the generalization curve SD (temporal precision) showed neither an effect of learning, $F(1, 103) = 0.006, p = .93$, nor a learning \times age interaction, $F(1, 13) = 0.15, p = .85$. There was only a main effect of age, $F(2, 103) = 27.04, p < .001, \eta^2_p = .34$, indicating that temporal precision was higher in adults ($M = 126, SE = 14.6$) than in either 8-year-olds ($M = 231.7, SE = 15.8$) or 5-year-olds ($M = 283.4, SE = 16.4$) (Bonferroni, both $p < .05$), and similar in the two groups of children ($p = .08$).

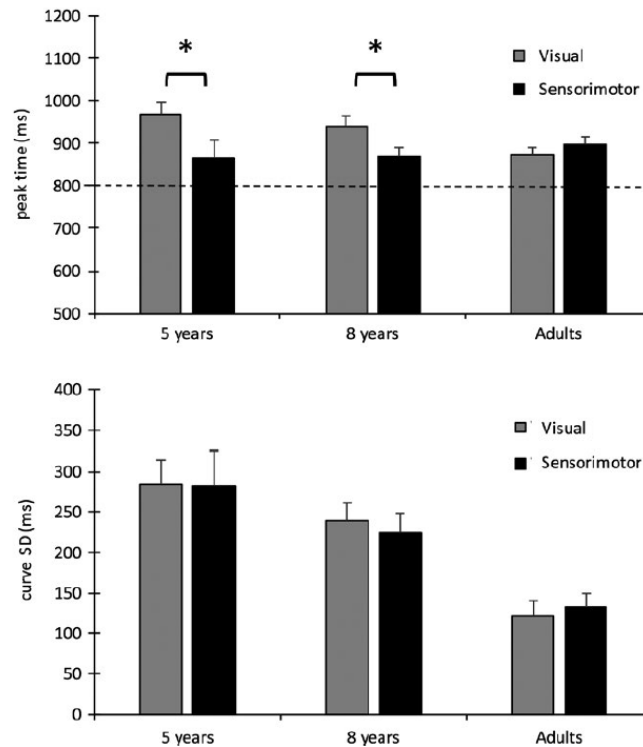


Figure 3. Mean peak time (temporal accuracy) and standard deviation (temporal precision) of generalization curves in the rhythm discrimination task following either visual or sensorimotor learning in the three age groups. The dotted line indicates the learned 800 ms rhythm

3.2.2. Correlations with neuropsychological scores

To try to identify the impact of individual differences in cognitive and motor abilities on rhythm discrimination performance, we conducted correlational analyses between neuropsychological test scores (Table 3) and both the temporal accuracy (curve peak time) and temporal precision (curve SD) of performance for each of the two learning conditions. As in Experiment 1, the effect of age was significant for all three neuropsychological scores (all $p < .05$), with scores improving with increasing age (Table 1).

Table 3 shows that inter-individual differences in temporal precision were related to motor and cognitive abilities in both learning conditions. Specifically, we found that the higher the motor ability or memory capacity, the higher the temporal precision. This result replicates that found in numerous developmental studies showing that temporal sensitivity depends on general cognitive capacity (Zélanti & Droit-Volet, 2011; Droit-Volet & Coull, 2016). More interestingly, however, peak time (which the ANOVA had shown to vary as a function of learning condition) correlated significantly with both motor ability and short-term memory capacity in the visual learning condition but, crucially, not the in visuo-motor condition. The

Fisher Z transformation test confirmed that correlations between peak time and either motor ability ($z = -1.75, p = .042$) or short-term memory ($z = -2.59, p = .005$) significantly differed between the two learning conditions. This difference, however, was not significant for the correlation with working memory ($z = 1.26, p = .10$).

Table 3. Correlations between neuropsychological test scores and the peak time (a measure of temporal accuracy) and standard deviation (*SD*; a measure of temporal precision) of Gaussian-fitted generalization curves, in the visual learning and sensorimotor learning conditions of the rhythm discrimination task (Experiment 2)

<i>Visual learning</i>		
	1	2
1. Peak time	1	
2. Temporal variability	.50**	1
Motor abilities	-.36**	-.65**
Short-term memory	-.31*	-.49**
Working memory	-.31	-.68**

<i>Sensorimotor learning</i>		
	1	2
1. Peak time	1	
2. Temporal variability	.50**	1
Motor abilities	-.03	-.41**
Short-term memory	-.20	-.44**
Working memory	-.13	-.54**

In summary, the accuracy of rhythm discrimination performance was less dependent on motor and memory skill when temporal intervals had previously been learnt with the aid of synchronized action.

3.3. Discussion

As in Experiment 1, the results of Experiment 2 showed strong developmental effects. Adults performed well in the discrimination task, whether the learning condition included action or not, as indicated by high accuracy and precision of perceived ISIs in both conditions. By contrast, the representation of ISI was less accurate and more variable in the two groups of children. Nevertheless, visuo-motor learning improved children's temporal discrimination performance: their generalization curve reached a maximum closer to the learned ISI in the visuo-motor learning condition than in the visual learning one. Since the discrimination task used in Experiment 2 measures perceptual timing, not motor timing as in Experiment 1, this result validates our hypothesis that timed action during learning improves the representation of the learned ISI, even when that representation is not measured by a timed motor response. Moreover, we found significant differences in the pattern of correlation between timing performance and neuropsychological test scores across the two learning conditions. Timing performance correlated with motor and short-term memory scores in the visual learning condition. By contrast, neither motor scores nor memory scores correlated with timing performance in the visuo-motor learning condition. This indicates that the rhythm

discrimination task was more memory-demanding after visual learning than visuo-motor learning. We suggest that action during the learning phase strengthened the representation of rhythm in memory, making performance less reliant on individual differences in motor and memory abilities.

Consequently, this second study suggests that the improvement in temporal accuracy measured during the reproduction phase of Experiment 1 was not simply due to a motor training of repetitive tapping during the learning phase. In other words, the benefits of action during temporal learning go beyond the motor nature of the response required by the task. The results of Experiment 2 indicate that the improvement in children's timing performance in the visuo-motor condition results from enhanced sensorimotor integration between visual stimuli and synchronized action, which hones the mental representation of the interval to be reproduced (Experiment 1) or estimated (Experiment 2).

4. Experiment 3

The results of Experiments 1 and 2 suggest that action improves the mental representation of rhythm through sensorimotor integration. To examine whether this action-related effect could be generalized to a non-rhythmic stimulus, i.e. the duration of a single interval, we conducted a third experiment using an interval discrimination task. We hypothesized that motor synchronization to an inter-stimulus interval during the learning phase would also improve the perception of temporal interval *per se*, isolated from the rhythmic structure in which it is presented. Moreover, since multiple, sequential presentations of an interval sharpen timing performance compared to single presentation, even in adults (Schulze, 1989; Drake & Botte, 1993; Merchant et al., 2008), we hypothesized that discrimination of a single interval would be more difficult than the rhythmic tasks used in Experiments 1 and 2, and so might allow us to identify a beneficial effect of action on temporal performance in adults, as well as in children.

4.1. Method

4.1.1. Participants

One hundred fifteen new subjects participated in this experiment: thirty-nine 5-year-olds ($M = 5.49$, $SE = .61$), thirty-six 8-year-olds ($M = 8.61$, $SE = .53$) and forty adults ($M = 20.4$, $SE = 1.23$), with the same recruitment method as the two previous experiments. The participants (or their parents) gave their consent to participate in this study, which was carried out in accordance with the Declaration of Helsinki, and approved by the inspectoral committee of the French Education Ministry and the Clermont-Ferrand Sud-Est VI Statutory Ethics Committee (CPP, Sud-Est VI, France).

4.1.2. Material and procedure

To facilitate comparison between the effects of action on discrimination of single or multiple (rhythmic) intervals, the material and procedure were very similar to those used in Experiments 1 and 2. We used the same E-prime software and white dots for the timing task and the same neuropsychological tests to assess motor and memory (short-term and working memory) capacities. The learning phase of the timing task was identical to that used in Experiments 1 and 2. The participants were presented with a sequence of dots with a 800 ms ISI, and had to either simply watch the sequence of dots (visual learning) or tap in synchrony with the dots (visuo-motor learning). After a 2 s interval, the learning phase was followed by the testing phase. During the testing phase, participants performed an interval discrimination

task. As in Experiment 2, we used a temporal generalization paradigm. Participants were presented with different comparison intervals, composed of two white dots separated by an ISI. Five different ISIs were tested: 400, 600, 800, 1000 and 1200 ms. After each comparison interval, the participants had to judge whether (“yes”) or not (“no”) the comparison ISI was the same as the learned ISI. The procedure and number of trials were exactly the same as in Experiment 2, i.e. a total of 56 trials, with 2 sessions of 28 comparison intervals preceded by a learning phase. The temporal task was followed by neuropsychological assessment.

4.2. Results

As in Experiment 2, we calculated the fit of the Gaussian function to individual generalization curves. Unfortunately, only eight of the thirty-nine 5-year-olds showed a Gaussian fit superior to 0.70 (Mean $R^2 = .36$, $SE = .35$). Indeed, the 5-year-olds’ generalization curves were particularly flat as shown in Fig 4. Interestingly, this indicates that the youngest children had difficulty isolating the temporal interval from a rhythmic sequence, even in the visuo-motor condition. Therefore, despite the fact that in Experiments 1 and 2 the effect of action on temporal performance was greater in this age group than in the others, we had to exclude the 5 year-old age group from statistical analyses. Seventeen 8-year-olds and three adults did not meet the fit criteria ($R^2 > .70$), and were excluded, leaving a total of nineteen 8-year-olds (8 in the visual and 11 in the visuo-motor learning condition) and thirty-seven adults (17 in the visual and 20 in the visuo-motor learning condition) in the final analyses.

4.2.1. Interval discrimination performance

Fig. 4 illustrates the generalization curves for the 8-year-olds and adults included in the statistical analyses. As in Experiment 2, we first conducted an ANOVA on the proportion of yes responses ($p(\text{yes})$) with interval as a within-subject factor, and age and learning as between-subject factors. Once again, we found a significant effect of age, $F(1, 52) = 29.11$, $p < .0001$, $\eta^2_p = .36$, and interval, $F(4, 49) = 31.40$, $p < .0001$, $\eta^2_p = .38$, and a marginally significant age x interval interaction, $F(4, 208) = 2.25$, $p = .065$. Both adults and 8-year-olds were able to discriminate the different comparison intervals, although the generalization curves tended to be flatter in children. There was no significant main effect of learning, $F(1, 52) = 0.46$, $p = .50$, but the learning x interval interaction was significant, $F(4, 49) = 3.76$, $p = .006$, $\eta^2_p = .06$. Participants better succeeded in discriminating comparison intervals when they had previously undergone visuo-motor, than visual, learning. The 3-way age x learning x interval interaction was not significant, $F(4, 208) = 1.39$, $p = .23$. Therefore, although the graphs in Fig. 4 suggest that learning type had little influence on timing in adults, visuo-motor learning improved the discrimination of temporal intervals in both age groups.

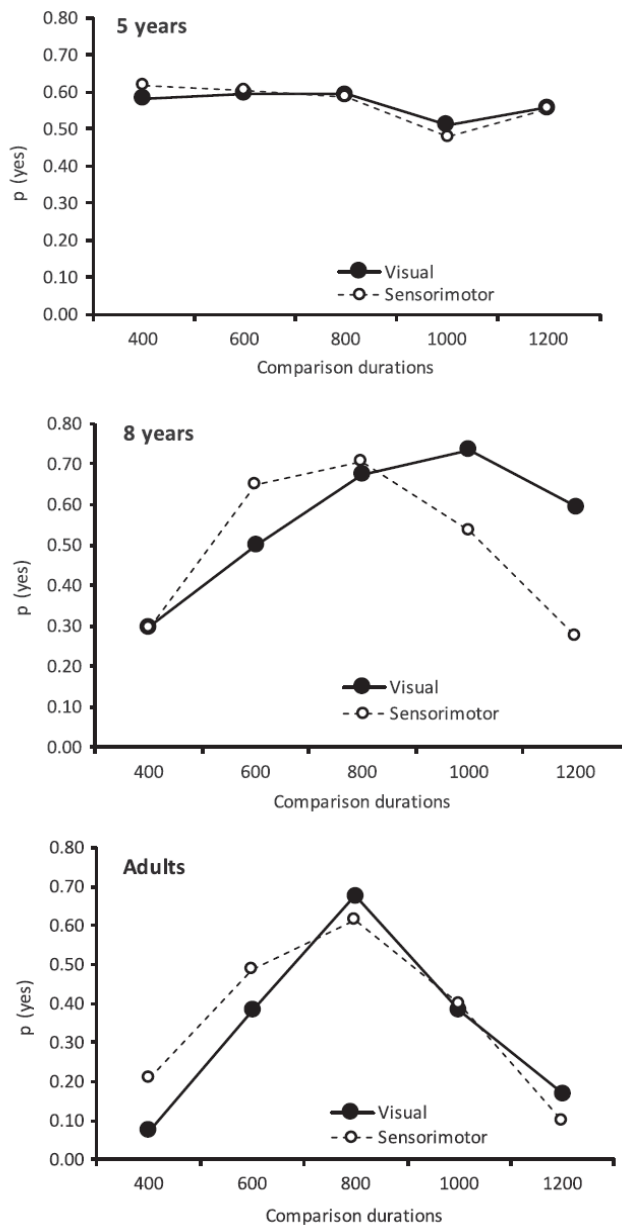


Figure 4. Mean proportion of ‘yes’ responses ($p(\text{yes})$) for each comparison inter-stimulus interval (ISI) in the interval discrimination task following either visual or sensorimotor learning in the three age groups

To further characterize timing performance, we calculated for each participant their peak time and standard deviation (SD) of generalization curves using the Gaussian function, as in Experiment 2. For measures of both temporal accuracy (peak time) and temporal precision (SD), ANOVAs with age and learning as between-subject factors, revealed a significant main effect of age ($F(1, 52) = 4.18, p = .046, \eta^2_p = .07$; $F(1, 52) = 44.55, p < .0001, \eta^2_p = .46$, respectively), indicating that temporal judgments in the interval discrimination task were less accurate and more variable in 8-year-olds than in adults (Figure 5).

Consistent with the results of $p(\text{yes})$, a significant main effect of learning was obtained both for peak time ($F(1, 52) = 12.53, p = .001, \eta^2_p = .19$) and SD ($F(1, 52) = 4.82, p = .033, \eta^2_p = .08$). This indicates more accurate and precise time judgments in the visuo-motor learning condition than in the visual learning one. However, age marginally interacted with learning for peak time, $F(1, 52) = 3.01, p = .08, \eta^2_p = .06$, with the difference in peak time between the two

learning conditions tending to be greater in children than in adults. Moreover, the age x learning interaction was clearly significant for SD, $F(1, 52) = 4.95, p = .03, \eta^2_p = .09$. Post-hoc analysis revealed that the temporal precision was equally good with visual or visuo-motor learning in adults (180 vs. 181, $F(1, 35) = .001, p = .97$), but was significantly better after visuo-motor learning than visual learning in 8-year-olds (300 vs. 428, $F(1, 17) = 4.93, p = .04, \eta^2_p = .23$). Therefore, we found an improvement in the precision of temporal interval judgements in children when they had previously learned the interval via rhythmic action.

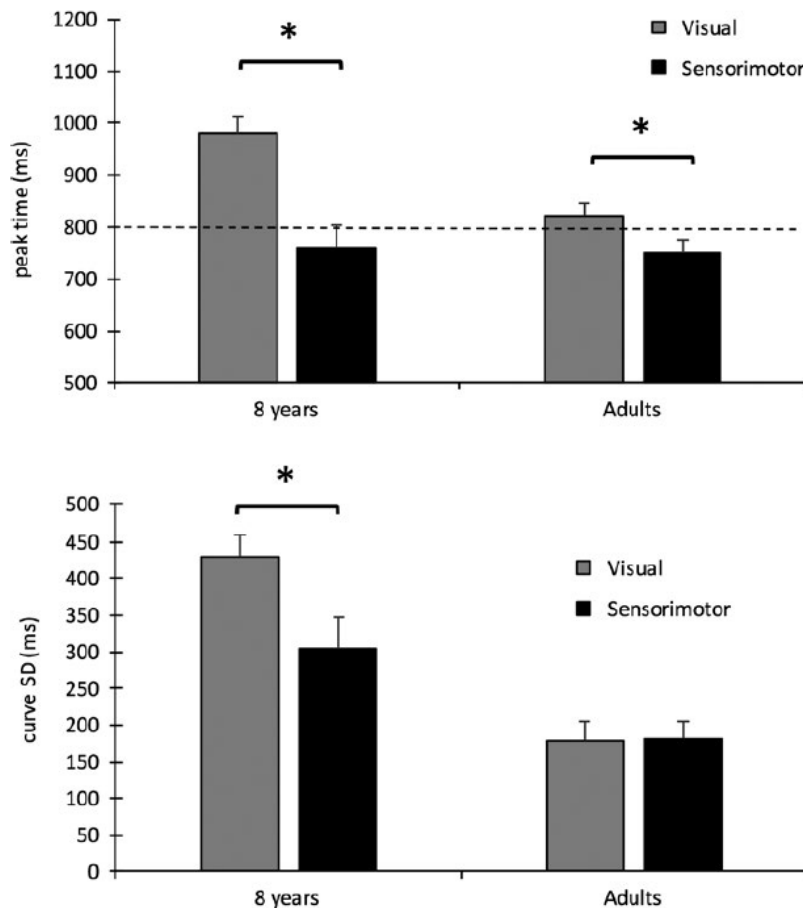


Figure 5. Mean peak time (temporal accuracy) and standard deviation (temporal precision) of generalization curves in the interval discrimination task following either visual or sensorimotor learning in the 8-year-olds and adults. The dotted line indicates the learned 800 ms interval

4.2.2. Correlation with neuropsychological scores

As in Experiments 1 and 2, scores on all neuropsychological tests improved with age (all $p < .05$, Table 1). We conducted correlational analyses between these neuropsychological scores and the peak time and SD of individual generalization curves (Table 4). There was no correlation between peak time and any of the neuropsychological scores in either of the learning conditions. By contrast, we found correlations between temporal precision (SD) and scores of short-term memory, working memory and motor ability in the visual learning condition. Interestingly, these correlations were no longer significant in the visuo-motor learning condition.

Table 4. Correlations between peak time and temporal variability (SD) of generalization curves, and scores on different neuropsychological tests, in the visual and sensorimotor learning conditions of the interval discrimination task (experiment 3). Asterisks indicated correlations significant at <0.01 (**) or $p<0.05$ (*).

<i>Visual learning</i>		
	1	2
1. Peak time	1	
2. Temporal variability	.57	1
Motor abilities	-.41	-.49*
Short-term memory	-.08	-.46*
Working memory	-.24	-.52*

<i>Sensorimotor learning</i>		
	1	2
1. Peak time	1	
2. Temporal variability	-.24	1
Motor abilities	-.15	-.34
Short-term memory	.14	-.30
Working memory	-.16	-.30

4.3. Discussion

In Experiment 3, participants had to learn the inter-stimulus interval of a regular rhythmic sequence in order to judge the similarity between this interval and comparison intervals. This task requires that the temporal information intrinsic to rhythm be extracted and directly compared to a single interval. Children's poor performance in this task demonstrated the difficulty of this type of temporal judgment. Indeed, the majority of 5-year-olds and almost half of the 8-year-olds were unable to identify the target interval among comparison intervals, producing totally flat generalization curves. This result differs from that in Experiment 2, in which most of the children were able to recognize the same target interval (800-ms ISI) when it was presented in a rhythmic sequence. It also differs from results obtained in young children in classical tasks of temporal generalization when a single duration is presented both in the training and the testing phase (McCormack, et al., 1999; Droit-Volet et al., 2001; Droit-Volet, 2002; Droit-Volet & Izaute, 2005). Nevertheless, even when a single duration is used in both the training and test phases, children' performance is poorer when judging the duration of an empty interval between two stimuli (unfilled durations) than the duration of a single stimulus (filled durations) (Droit-Volet, 2008). One possible explanation for 5 year-olds' difficulty with our task therefore is that comparing a single interval to that of an interval embedded within a rhythmic sequence of multiple intervals is difficult, and requires additional high-level cognitive processes that develop later in childhood. Alternatively, since rhythmic structure is processed more automatically than isolated intervals (Jones et al., 2002; Rohenkohl et al., 2011; Breska & Douell, 2014; Cutanda et al., 2015) young children, with their lower attentional capacity, may have had difficulty releasing their attention from the overall rhythmic structure in order to process the duration of single intervals. Our findings add to a body of literature demonstrating behavioural and neural differences in the coding of single versus multiple intervals. The

functional characteristics of timing performance, and its underlying brain systems, are known to vary as a function of the context in which the interval to be processed is presented (Lewis & Miall, 2003; Merchant et al., 2008; Trivino et al., 2011; Schwartze et al., 2012; Breska & Deouell, 2014, 2017). Our data demonstrate that there are also developmental differences in the ability to process single versus multiple intervals.

Finally, the results of Experiment 3 demonstrate that when the temporal task is particularly difficult, motor synchronization during learning modulates time perception in older children and even in adults. Time judgment was more accurate and precise after visuo-motor learning than visual learning across age groups, although to a greater extent in 8 year olds than adults. These data confirm that the beneficial effect of action on timing extends to a wide variety of motor and perceptual timing tasks, including interval discrimination.

5. General discussion

We examined the putative beneficial effects of action during rhythm learning on both motor and perceptual measures of timing, across development. Our results showed a significant improvement in timing performance when participants had previously produced a movement in synchrony with an external rhythm during learning, as compared to simply watching the rhythm. In contrast to previous studies conducted in adults (Iordanescu, et al., 2013; Manning and Schutz, 2013, 2015, 2016, Manning, Harris, & Schutz, 2017; Morillon et al., 2014), we used visual, rather than auditory, rhythms. We therefore extend previous findings by showing that action benefits timing in the visual, as well as auditory, modality. More importantly, the main contribution of our study was to show benefits of motor learning on timing in children, as well as adults. Indeed, the benefit was even stronger in young children, who have poor timing performance due to their limited cognitive and motor capacities. Our results also showed that the benefits of action can be seen not only for motor timing but also perceptual timing, of both single and multiple (rhythmic) intervals.

Our results therefore confirm that sensorimotor training improves performance in perceptual as well as motor timing tasks (see also, Iordanescu, et al., 2013; Manning & Schutz, 2013, 2016). This means that action-induced improvements in timing are not simply due to the similarity of timing contexts between the learning and test phase. The improvement in motor timing in the visuo-motor condition of Experiment 1 could be argued to be due to the “muscle memory” of the tapped rhythm simply being reproduced in the test phase. By the same line of reasoning, improvement in perceptual timing in Experiment 2 could be due to the “visual memory” of the rhythmic sequence simply being identified in the test phase. If this were the case, however, we would expect performance to be better after visuo-motor learning in Experiment 1, but after visual learning in Experiment 2. Instead, performance improved after visuo-motor learning in both experiments. This pattern of results indicates that the mental representation of an interval can be extracted from a motor sequence and applied to a purely perceptual sensory input.

Our results in three different timing tasks suggest that synchronizing action to an external rhythm during temporal learning leads to a more accurate and less fuzzy representation of the interval to be reproduced or judged. It is unsurprising, therefore, that sensorimotor training improved timing performance particularly in young children, for whom the processing of time is particularly noisy (Droit-Volet, 2016). In Experiment 1 for example, older children and adults were able to successfully construct an accurate representation of interval duration in the visual learning condition, and adding motor activity during learning did not further improve their temporal reproduction performance. Nevertheless, when the internal representation of duration had to be used to make perceptual discriminations in Experiment 2, sensorimotor learning

significantly improved performance in both young *and* older children. Indeed, when the ISI had to be extracted from a learned rhythm in order to discriminate single intervals in Experiment 3, sensorimotor learning affected accuracy in both children and adults. Moreover, children's representation of time was not only more accurate in the sensorimotor versus visual learning condition, but also more precise. This was observed for both motor and perceptual timing, and was especially apparent for the intermediate age group of 8 years old. At this age, there were neither floor effects as observed for the 5-year-olds in Experiment 3, nor ceiling effects as observed for the adults in Experiment 1. Consequently, the beneficial effect of action on timing depends not only on the cognitive demands of the task but also on the level of available individual cognitive resources (Manning & Schutz, 2013; Butler & Trainor, 2015).

These results highlight the importance of action in temporal learning particularly when the temporal task makes demands on cognitive resources. This raises an important question concerning the mechanisms that underpin the effects of action on temporal encoding during rhythm processing. Interestingly, our correlational analyses showed a stronger link between motor ability and rhythm discrimination in the visual learning condition than the sensorimotor one. This indicates that, when there had been no prior action training, temporal performance depended more upon underlying motor skills. In other words, the motor system had to be solicited to construct an accurate representation of the interval to be reproduced. This finding supports the role of action in the coding of time, i.e. sensorimotor coding of time intervals. Indeed, adults, who have better motor skills and a more robust sensorimotor experience, were better able to accomplish this sensorimotor coding without overt action. Children, by contrast, needed to move to accurately construct an internal representation of time. This suggests that learning about time is strongly linked to coupled sensorimotor experience during childhood, as proposed by the hypothesis of associative learning (Leman, 2007; Cox, 2011; Maes, et al., 2014). We therefore hypothesize that the representation of a learned interval recruits motor circuitry not only in young children, but also in adults. This hypothesis could explain the consistent activation of motor brain areas, such as SMA or basal ganglia, in adult timing, even during perceptual timing tasks (Weiner et al., 2010; Coull, Cheng & Meck, 2011; Schwartze et al., 2012). It may also explain why action biases temporal perception in adults (Yarrow et al., 2001; 2003; 2006).

Our correlational analyses also showed a stronger link between short-term memory capacity and timing performance in the visual learning condition than the sensorimotor learning one. Again, this indicates that an accurate representation of the learned interval requires greater memory capacity when motor activity had not been integrated into the learning phase. By contrast, sensorimotor training allowed an accurate representation of the learned interval to be achieved, whatever the individual memory capacity. Synchronized action during temporal learning therefore relieved the burden on memory. The results of our studies have important implications for rehabilitation programs for children (or indeed adults) with learning difficulties by demonstrating the effectiveness of motor training on cognitive processing.

It is possible that action might have improved timing simply by increasing the allocation of attention to the temporal stimulus features of the rhythm. However, rhythmic sequences induce strong and automatic capture of attention (Barnes & Jones, 2000; Large & Jones, 1999) as well as automatic phase-locking and error correction processes (Repp, 2005; Tal et al., 2017). We think it's therefore unlikely that action enhanced the level of attention towards temporal features more than that already induced by the rhythm itself. However, future studies should compare perceptual and motor learning phases that are equally attention demanding before this hypothesis can be definitively rejected. It would also be useful to repeat this experiment using a motor response that is entirely inaudible. The tapping of the computer key in the action

condition produced a slight sound, which might have inadvertently created a multisensory audiovisual rhythm. Since visual rhythms are less attention-grabbing than auditory ones (Bertelson & Aschersleben, 2003; Repp & Penel, 2004), the temporal characteristics of the rhythm might have been more salient in the action condition than the visual one simply due to the additional auditory information provided by key-tapping. In order to dissociate the temporal benefits of rhythmic action from those of rhythmic sounds, our experiment should be repeated either with silent responses in the action condition or, alternatively, with audiovisual stimuli in both conditions that would mask the sound of the key tap.

To conclude, our developmental findings indicate that temporal learning is bolstered by action throughout childhood and even, in difficult timing conditions, in adulthood. These findings suggest that representations of time arise from sensorimotor coding and update existing theories that the acquisition of a sense of time is grounded in action. This point of view was proposed by the philosopher Guyau (1890) more than one hundred years ago and, was developed by Piaget (1946) in his description of sensorimotor time. It has been explored again more recently by researchers working with children (e.g. Droit, 1995; Droit-Volet & Rattat, 1999; Rattat & Droit-Volet, 2002; McCormack & Hoerl, 2017) and adults (Cassenti, 2011; Fujioka et al, 2012; Manning and Schutz, 2013; Morillon et al, 2014; Kononowicz & Van Rijn, 2015). Nevertheless, further experiments will be necessary to clarify the role of action in encoding and maintaining the representation of the learned interval in memory.

References

- Annett, M. (1992). Five tests of hand skill. *Cortex*, 28, 583-600.
- Baker, S. N. (2007). Oscillatory interactions between sensorimotor cortex and the periphery. *Current Opinion in Neurobiology*, 17, 649-655.
- Barnes, R., & Jones, M. R. (2000). Expectancy, attention, and time. *Cognitive Psychology*, 41, 3, 254-311.
- Barsalou, L. W. (2009). Simulation, situated conceptualization, and prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364, 1521, 1281-1289.
- Bertelson, P., & Aschersleben, G. (2003). Temporal ventriloquism: crossmodal interaction on the time dimension: 1. evidence from auditory–visual temporal order judgment. *International Journal of Psychophysiology*, 50, 147-155.
- Breska, A., & Deouell, L. Y. (2014). Automatic bias of temporal expectations following temporally regular input independently of high-level temporal expectation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26, 1555-1571.
- Breska, A., & Deouell, L. Y. (2017). Neural mechanisms of rhythm-based temporal prediction: Delta phase-locking reflects temporal predictability but not rhythmic entrainment. *Plos ONE, Biology*, 15, 2, e2001665.
- Butler, B. E., & Trainor, L. J. (2015). The musician redefined: a behavioral assessment of rhythm perception in professional club DJs. *Timing & Time Perception*, 3, 116-132.

- Cassenti, D. N. (2011). The intrinsic link between motor behavior and temporal cognition. *New Ideas in Psychology*, 29, 2, 72-79.
- Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008). Listening to musical rhythms recruits motor regions of the brain. *Cerebral Cortex*, 18, 12, 2844-2854.
- Cirelli, L. K., Bosnyak, D., Manning, F. C., Spinelli, C., Marie, C., Fujioka, T., ... & Trainor, L. J. (2014). Beat-induced fluctuations in auditory cortical beta-band activity: using EEG to measure age-related changes. *Frontiers in psychology*, 5, 742.
- Cohen, M. (1997). Children's memory scale (CMS). *San Antonio: The Psychological Corporation*.
- Coull, J. T., Cheng, R. K., & Meck, W. H. (2011). Neuroanatomical and neurochemical substrates of timing. *Neuropsychopharmacology*, 36, 1, 3.
- Cox, A. (2011). Embodying music: Principles of the mimetic hypothesis. *Music Theory Online*, 17, 2.
- Cravo, A. M., Rohenkohl, G., Wyart, V., Nobre, A. C. (2011). Endogenous modulation of low frequency oscillations by temporal expectations. *Journal of Neurophysiology*, 106, 2964-2972.
- Cutanda, D., Correa, Á., & Sanabria, D. (2015). Auditory temporal preparation induced by rhythmic cues during concurrent auditory working memory tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 41, 790.
- Dalla Bella, S., Benoit, C. E., Farrugia, N., Schwartz, M., Kotz, S.A. (2015). Effects of musically cued gait training in Parkinson's disease: beyond a motor benefit. *Annals of New York Academy of Science*, 1337, 77-85.
- Drake, C., Jones, M. R., & Baruch, C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences: attunement, referent period, focal attending. *Cognition*, 77, 3, 251-288.
- Drake, C., & Botte, M. C. (1993). Tempo sensitivity in auditory sequences: Evidence for a multiple-look model. *Perception & Psychophysics*, 54, 3, 277-286.
- Droit, S. (1995). Learning by doing in 3- and 4½-year-old children: Adapting to time. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition*.
- Droit-Volet, S. (1998). Time estimation in young children: an initial force rule governing time production. *Journal of Experimental Child Psychology*, 68, 3, 236-249.
- Droit-Volet, S. (2002). Scalar timing in temporal generalization in children with short and long stimulus durations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 55, 4, 1193-1209.

- Droit-Volet, S., (2008) A further investigation of the filled duration illusion with the comparison between children and adults. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 34, 3, 400-414.
- Droit-Volet, S. (2016). Development of time. *Current Opinion in Behavioural Sciences*, 8, 102-109. DOI information: 10.1016/j.cobeha.2016.02.003.
- Droit-Volet, S. (2018). Intertwined facets of subjective time. *Current Directions in Psychological Science*.
- Droit-Volet, S., Clément, A., & Wearden, J. (2001). Temporal generalization in 3-to 8-year-old children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80, 3, 271-288.
- Droit-Volet, S., & Coull, J. T. (2016). Distinct developmental trajectories for explicit and implicit timing. *Journal of Experimental Child Psychology*, 150, 141-154.
- Droit-Volet, S., & Izaute, M. (2005). The effect of feedback on timing in children and adults: The temporal generalization task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 58, 3, 507-520.
- Droit-Volet, S., & Meck, W. H. (2007). How emotions colour our perception of time. *Trends in Cognitive Sciences*, 11, 12, 504-513.
- Droit-Volet, S. & Rattat, A. C. (1999). Are time and action dissociated in young children's time estimation? *Cognitive Development*, 14, 4, 573-595
- Fautrelle, L., Mareschal, D., French, R., Addyman, C., Thomas, E. (2015). Motor activity improves temporal expectancy. *PLoS ONE*, 10:e0119187.
- Fraisse, P. (1948). II.-Rythmes auditifs et rythmes visuels. *L'Année Psychologique*, 49, 1, 21-42.
- Fraisse, P., Chambon, H., & Oléron, G. (1954). Note sur la constance et l'évolution génétique du tempo spontané moteur. *Enfance*, 7, 25-34.
- Fujioka, T., Trainor, L. J., Large, E. W., Ross, B. (2012). Internalized timing of isochronous sounds is represented in neuromagnetic Beta oscillations. *Journal of Neurosciences*, 32, 1791-1802.
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 11, 9, 593-609.
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, 84, 3, 279.
- Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. H. (1984). Scalar timing in memory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 423, 52-77.
- Grahn, J. A., & Brett, M. (2009). Impairment of beat-based rhythm discrimination in Parkinson's disease. *Cortex*, 45, 1, 54-61.

- Grondin, S. (2001). From physical time to the first and second moments of psychological time. *Psychological Bulletin*, 127, 22-44.
- Grondin, S. (2012). Violation of the scalar property for time perception between 1 and 2 seconds: evidence from interval discrimination, reproduction, and categorization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38, 4, 880.
- Guyau, J. M. (1890). *La genèse de l'idée de temps*. Alcan.
- Hari, R., & Salmelin, R. (1997). Human cortical oscillations: a neuromagnetic view through the skull. *Trends in Neurosciences*, 20, 1, 44-49.
- Harrington, D.L., & Jahanshahi, M. (2016) Reconfiguration of striatal connectivity for timing and action. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 79-84.
- Heyes, C. (2010). Mesmerising mirror neurons. *Neuroimage*, 51, 2, 789-791.
- Heyes, C. M., & Ray, E. D. (2000). What is the significance of imitation in animals? *Advances in the Study of Behavior*, 29, 215-245.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). Codes and their vicissitudes. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 5, 910-926.
- Iordanescu, L., Grabowecky, M., & Suzuki, S. (2013). Action enhances auditory but not visual temporal sensitivity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20, 1, 108-114.
- Ivry, R. B., & Hazeltine, R. E. (1995). Perception and production of temporal intervals across a range of durations: Evidence for a common timing mechanism. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 3-18.
- Johnson, K. A., Bryan, M., Polonowita, K., Decroupet, D., & Coull, J. T. (2016). Isochronous sequential presentation helps children orient their attention in time. *Frontiers in psychology*, 7, 1417.
- Kononowicz, T. W., Van Rijn, H. (2015). Single trial beta oscillations index time estimation. *Neuropsychologia*, 75, 381-389.
- Kononowicz, T. W., Van Rijn, H., & Meck, W. H. (2017). Timing and time perception: A critical review of neural timing signatures before, during, and after the to-be-timed interval. *Sensation, Perception and Attention*, 2, 1-35.
- Large, E. W., & Jones, M. R. (1999). The dynamics of attending: How people track time-varying events. *Psychological Review*, 106, 1, 119.
- Leman, M. (2010). Music, gesture, and the formation of embodied meaning. *Musical Gestures: Sound, Movement, and Meaning*, 126-153

- Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2003). Distinct systems for automatic and cognitively controlled time measurement: evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology* 13:250-255.
- Maes, P. J., Leman, M., Palmer, C., & Wanderley, M. (2014). Action-based effects on music perception. *Frontiers in Psychology*, 4, 1008.
- Manning, F. C., Harris, J., & Schutz, M. (2017). Temporal prediction abilities are mediated by motor effector and rhythmic expertise. *Experimental Brain Research*, 235, 3, 861-871.
- Manning, F. C., & Schutz, M. (2016). Trained to keep a beat: movement-related enhancements to timing perception in percussionists and non-percussionists. *Psychological Research*, 80, 4, 532-542.
- Manning, F., & Schutz, M. (2013). "Moving to the beat" improves timing perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20, 6, 1133-1139.
- McAuley, J. D., Jones, M. R., Holub, S., Johnston, H. M., & Miller, N. S. (2006). The time of our lives: life span development of timing and event tracking. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135, 3, 348.
- McCormack, T., & Hoerl, C. (2017). The development of temporal concepts: Learning to locate events in time. *Timing and Time perception*, 4, 3-4, 297-327.
- McCormack, T., Brown, G. D., Maylor, E. A., Darby, R. J., & Green, D. (1999). Developmental changes in time estimation: Comparing childhood and old age. *Developmental Psychology*, 35, 4, 1143.
- Mento, G., Astle, D. E., Scerif, G. (2018). Cross-frequency phase-amplitude coupling as a mechanism for temporal orienting of attention in childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 30, 594-602.
- Merchant, H., Zarco, W., & Prado, L. (2008). Do we have a common mechanism for measuring time in the hundreds of millisecond range? Evidence from multiple-interval timing tasks. *Journal of Neurophysiology*, 99, 2, 939-949.
- Michon, J. A., & Jackson, J. L. (1985). *Time, mind, and behavior*. Berlin: Springer Verlag.
- Monier, F., & Droit-Volet, S. (2016). Synchrony and emotion in children and adults. *International Journal of Psychology*. DOI: 10.1002/ijop.12363
- Morillon, B., Schroeder, C. E., & Wyart, V. (2014). Motor contributions to the temporal precision of auditory attention. *Nature Communications*, 5, 5255.
- Niedenthal, P. M., Krauth-Gruber, S., & Ric, F. (2006). *Psychology of emotion*. (pp 152-160). New-York: Psychology press.
- Oberman, L. M., Winkielman, P., & Ramachandran, V. S. (2007). Face to face: Blocking facial mimicry can selectively impair recognition of emotional expressions. *Social Neuroscience*, 2, 3, 167-178.

- Phillips-Silver, J., & Trainor, L. J. (2005). Feeling the beat: movement influences infant rhythm perception. *Science*, 308, 5727, 1430-1430.
- Phillips-Silver, J., & Trainor, L. J. (2007). Hearing what the body feels: Auditory encoding of rhythmic movement. *Cognition*, 105, 3, 533-546.
- Piaget, J. (1946). La genèse du temps chez l'enfant. *Paris: Presses Universitaires de France*.
- Prinz, W. (1990). A common coding approach to perception and action. In *Relationships between perception and action* (pp. 167-201). Berlin: Springer, Heidelberg.
- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9, 2, 129-154.
- Provasi, J., & Bobin-Bègue, A. (2003). Spontaneous motor tempo and rhythmical synchronisation in 2½-and 4-year-old children. *International Journal of Behavioral Development*, 27, 3, 220-231.
- Rattat, A. C., & Droit-Volet, S. (2002). Le transfert d'un apprentissage de durée d'action chez le jeune enfant: l'effet facilitateur de la variété des actions? *Enfance*, 54, 2, 141-153.
- Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: a review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 6, 969-992.
- Repp, B. H., & Penel, A. (2004). Rhythmic movement is attracted more strongly to auditory than to visual rhythms. *Psychological Research*, 68, 4, 252-270.
- Repp, B. H., & Su, Y. H. (2013). Sensorimotor synchronization: a review of recent research (2006–2012). *Psychonomic Bulletin & Review*, 20, 3, 403-452.
- Rohenkohl, G., Coull, J. T., & Nobre, A. C. (2011). Behavioural dissociation between exogenous and endogenous temporal orienting of attention. *Plos ONE*, 6,1, e14620.
- Schulze, H. H. (1989). Categorical perception of rhythmic patterns. *Psychological Research*, 51, 1, 10-15.
- Schwartz, M., Rothermich, K., Kotz, S.A. (2012). Functional dissociation of pre-SMA and SMA-proper in temporal processing. *Neuroimage*, 60, 290-298.
- Su, Y. H., & Pöppel, E. (2012). Body movement enhances the extraction of temporal structures in auditory sequences. *Psychological Research*, 76, 3, 373-382.
- Tal, I., Large, E. W., Rabinovitch, E., Wei, Y., Schroeder, C. E., Poeppel, D., & Golumbic, E. Z. (2017). Neural entrainment to the beat: the “missing-pulse” phenomenon. *Journal of Neuroscience*, 37, 26, 6331-6341.
- Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the " internal clock". *Psychological Monographs: General and Applied*, 77, 13, 1.

- Triviño, M., Arnedo, M., Lupiáñez, J., Chirivella, J., & Correa, Á. (2011). Rhythms can overcome temporal orienting deficit after right frontal damage. *Neuropsychologia*, 49, 14, 3917-3930.
- Wearden, J. H. (1992). Temporal generalization in humans. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 18, 134-144.
- Wiener, M., Turkeltaub, P., Coslett, H. B. (2010). The image of time: a voxel-wise meta analysis. *Neuroimage*, 49, 1728-1740.
- Wing, A. M., & Kristofferson, A. B. (1973). Response delays and the timing of discrete motor responses. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 14, 5-12.
- Yarrow, K., Haggard, P., Heal, R., Brown, P., Rothwell, J. C. (2001). Illusory perceptions of space and time preserve cross-saccadic perceptual continuity. *Nature*, 414, 302-305.
- Yarrow, K., Rothwell, J. C. E. (2003). Manual chronostasis: tactile perception precedes physical contact. *Current Biology*, 13, 1134-1139.

Chapitre 7

Etude sur l'effet bénéfique de l'action sur l'apprentissage des intervalles de temps : une représentation en mémoire plus robuste ?

Etude 5

Résumé

Objectif

Cette étude n'a pas encore fait l'objet d'une publication, son objectif était de clarifier la nature du processus qui sous-tend l'effet bénéfique d'un apprentissage sensorimoteur sur les performances temporelles. La question principale que nous examinons ici est de savoir si l'amélioration des performances temporelles avec un apprentissage moteur est due à l'action, qui favorise l'encodage de l'ITI, la création d'une représentation temporelle plus précise, ou si l'action permet un meilleur maintien en mémoire de l'ITI du fait de l'encodage multi-sensoriel. Pour répondre à cette question, nous avons décidé d'introduire des interférences à chaque phase de traitement, soit pendant l'encodage de l'intervalle temporel, soit pendant la rétention en mémoire, soit pendant la récupération de l'intervalle en mémoire lors de la reproduction du rythme.

Méthode

Nous avons mené cette étude chez l'adulte. Afin de faciliter l'interprétation de nos résultats nous avons décidé d'utiliser une tâche proche de celles utilisées lors de nos précédentes études, une tâche de synchronisation-reproduction de rythme avec un intervalle de 500 et de 800 ms. Cependant, dans cette étude, la reproduction est différée de 30 s de façon à examiner le maintien en mémoire de l'intervalle. De plus, afin de générer une interférence, un carré bleu

apparaissait pendant chacune des phases expérimentales selon les conditions expérimentales (encodage, rétention, reproduction). Les participants devaient alors dire si le carré était clair ou foncé (Voir Hallez & Doit-Volet, 2017 pour la même tâche). Par ailleurs comme dans nos études précédentes la moitié des participants réalisaient la synchronisation en regardant simplement la séquence rythmique (condition d'apprentissage visuel) et l'autre moitié en regardant et en tapant en coïncidence avec cette séquence (apprentissage sensorimoteur). Comme pour les études précédentes, nous avons mesuré les capacités motrices et mnésiques des participants (mémoire à court terme).

Résultats et Discussion

Avec ces résultats, nous montrons pour la première fois, un effet bénéfique de l'action sur la reproduction de rythme chez l'adulte. En effet, l'apprentissage sensorimoteur améliore la précision temporelle dans la reproduction différée du rythme, dans la mesure où celui-ci est relativement éloigné du TMS. Cependant son effet est similaire quel que soit le moment où la tâche interférente est délivrée, même quand le sujet produit des ITI plus courts dans la phase de synchronisation et de reproduction avec la tâche interférente. Les analyses de corrélations révèlent que dans la condition de l'apprentissage sensorimoteur, la performance, notamment la variabilité est surtout influencée par les capacités motrices, alors que lorsque l'apprentissage est seulement visuel, la performance est surtout influencée par les capacités de mémoire. Toutefois, d'autres études sont nécessaires pour pouvoir répondre à notre question de départ. La tâche secondaire/interférente que nous avons employée, à savoir une tâche cognitive, n'a peut-être pas assez eu d'impact sur l'apprentissage du rythme qui est sous la dépendance de processus automatiques. En conséquence, il serait intéressant de mener une nouvelle étude en testant une autre tâche interférente peut-être plus motrice pour obtenir les effets escomptés. En conclusion, l'apprentissage moteur améliore la précision des ITI dans les tâches de

synchronisation, et cette amélioration semble être à tous les niveaux du traitement que ce soit lors de l'encodage, de la rétention en mémoire, ou de la reproduction du rythme.

1. Method

1.1. Participants

The sample was composed of 60 adults ($M = 20.5$, $SE = 1.8$). They were recruited at Clermont Auvergne University and signed a consent form.

1.2 Material

The participants were tested individually in a quiet room of the university. They were seated in front of a PC computer that controlled the experimental stimuli and recorded responses via E-prime II software.

The stimulus used in the rhythmical sequence was a white dot (5 cm in diameter) presented in the center of the computer screen for a duration of 150-ms. For the interfering task, a large blue square (10 cm) was occasionally presented in the center of the screen. The color intensity of this large square was either light or dark and the duration presentation was also 150 ms. On the interference trials, the temporal stimulus (white dot) was thus presented inside the large blue square. The number of interfering stimuli presented (12, 6 dark and 6 light blue circles) was constant over phases and conditions. At the beginning of the study the three-phases of the “Synchronization-Differed reproduction” task were explained and participants were told that they would have to perform it several times. They were also instructed that they would have to perform a second task: to detect a blue square and say if it was light or dark. We explained that for each synchronization-differed reproduction task, the blue square would appear during one phase only or would not appear at all. Then, they were shown the two types of blue squares and the task began.

Neuropsychological assessments:

To assess the participant’s fine motor abilities, we used the “Peg Moving Task” (PMT-5) (Annett, 1992). To perform this test, participants have to insert pegs one-by-one in a row of holes as quickly as possible using their dominant and non-dominant hand, which corresponds to the first part of the PMT. The raw score corresponds to the number of pegs that they insert in the row of holes in 30 seconds. In addition, we assessed short-term memory the subtests of the CMS (children memory scale, Cohen, 1997). The forward digit span subtest was used to measure short-term memory abilities. Participants have to immediately repeat the sequence of digits given by the experimenter. There are two trials of digit sequences, starting from 2 up to a maximum of 9 digits. The test is stopped when the participant makes two consecutive errors, with a maximum score of 16

1.3. Procedure

The task consisted of three phases: Synchronization, memory retention and reproduction. First, during the synchronization phase, they were asked to learn the rhythm of a rhythmic sequence composed of 33 presentations of the white dot. Then, during the memory retention phase, the participants had to maintain the rhythm learned for a period of 30 s. They had to wait without moving or counting. Finally, during the reproduction phase they had to reproduce the learned rhythm by tapping on the computer spacebar” (30 taps). There were two learning

conditions: In the visual learning condition, the participants had to look at the white dot without moving, and, in the sensorimotor learning condition, they had to tap on the spacebar coincidentally with each stimulus onset.

During each phase, the participants also had to perform an interfering task, which was a secondary color discrimination task. A blue square appeared 12 times at random intervals between the onset and the offset of the temporal sequence. For each presentation of the blue square, the participants had to respond orally if it was light or dark. During the memory retention phase and reproduction phases, the temporal stimulus (white circle) was removed. However, the blue square continued to appear at random intervals.

The participants were randomly assigned to one of the two learning conditions (visual vs sensorimotor). However, the four interfering conditions were manipulated within-subjects: “without interference”, interference during the synchronization phase (“Synchronization”), interference during the memory retention phase (“Memory interference”) and interference during the reproduction phase (“Reproduction”). So all participants performed the temporal task in the four different interfering conditions, with each condition being presented in a randomized order. They performed these 4 interfering conditions 4 times. These 16 trials were presented in 2 separate blocks, once with a 500 ms ISI and another with a 800 ms ISI. These two ISI blocks were presented in a randomized order for a total duration of 30 min. Finally, we assessed the participants’ motor abilities and short-term memory performance, in a randomized order

1.4. Data analyses

We calculated the mean and the variability (SD) of inter-tap intervals (ITI) reproduced by the participants, as well as an index of absolute error ($Abs(error) = \text{mean } |ISI - ITI|$), in the two ISI blocks (500 ms and 800ms) for the four Interference conditions: no-interference, synchronization-interference, memory-interference, reproduction-interference. An ANOVA was thus conducted on each measure with ISI and Interference as within-subject factors and Learning type (visual vs. sensorimotor) as a between-subjects factor. When a significant interaction was found, Bonferroni tests were used to compare two conditions. In addition, correlations were performed between these indices of temporal performance and the raw scores on neuropsychological tests assessing either motor or short-term memory abilities. Table 1 shows the mean and standard error (SE) of raw scores of these two neuropsychological tests. Previous analyses showed no correlation between the scores on these two tests ($r = .12, p > .05$).

Table 1

Participant’s mean raw scores (standard deviation) of neuropsychological tests for motor and short-term memory abilities.

Motor abilities	Short-term memory
29.85 (2.8)	9.12 (1.8)

2. Results

2.1. Temporal performance

Mean Inter-Taps intervals

The ANOVA of mean ITI (Fig 1) showed a main effect of ISI, $F(1, 54) = 950.29, p < .0001, \eta^2_p = .95$. As expected, participants produced longer intervals in the 800 ms ISI condition ($M = 648.95, SD = 8.84$) than in the 500ms ISI condition ($M = 424.41, SD = 6.11$). There was also a significant main effect of Interference, $F(3, 162) = 71.62, p < .0001, \eta^2_p = .57$, and a significant ISI x Interference interaction, $F(3, 162) = 29.85, p < .0001, \eta^2_p = .36$. In both ISI conditions, the main effect of Interference was significant (500-ms: $F(3, 165) = 16.98, p < .0001, \eta^2_p = .24$; 800-ms: $F(3, 165) = 68.47, p < .0001, \eta^2_p = .56$). In the 500 ms ISI condition, the tapping rate increased when the interference task had to be performed during the synchronization ($M = 417.63, SE = 8.19$) or the reproduction phase ($M = 401.76, SE = 6.93$) compared to the no-interference ($M = 435.56, SE = 6.75$) or memory-interference conditions ($M = 442.13, SE = 6.66$) (all Bonferroni tests, $p < .05$). No difference in the mean ITI was observed between the synchronization-interference and the reproduction-interference conditions. The interference task did not affect the length of the reproduced ITI when it occurred during the memory retention interval, as indicated by the lack of difference in mean ITI between the memory-interference and the no-interference conditions ($p > .05$).

In the 800ms ISI condition, when the ISI to be produced was longer than the typical preferred tempo of young adults (around 600ms), no difference in the mean ITI was observed between the no-interference ($M = 678.67, SE = 11.26$), synchronization-interference ($M = 665.95, SE = 11.98$), or memory-interference ($M = 693.75, SE = 10.69$) conditions (all $p > .05$). However, participants tapped significantly faster in the reproduction-interference condition ($M=564, SE=11,90$) than all other conditions (all $p < .05$).

The ANOVA of mean ITI also revealed a significant Learning x ISI interaction (Fig 2), $F(3, 162) = 12.02, p = .001, \eta^2_p = .18$, although there was neither a significant main effect of learning, $F(1, 54) = 2.52, p = .12$, nor a significant interaction between learning and interference (Learning x Interference, $F(3, 162) = 0.33, p = .80$; Learning x ISI x Interference, $F(3, 162) = 0.72, p = .40$). The effect of learning was significant in the 800 ms condition, $F(1, 54) = 6.89, p = .01, \eta^2_p = .11$, but not in the 500 ms ISI condition, $F(1, 54) = 0.11, p = .74$. Therefore, sensorimotor learning improved rhythmic reproduction performance ($M = 672.16, SE = 12.05$) compared to the visual learning condition ($M= 625.73, SE = 12.94$) across all four interference conditions, but only for the longer 800ms tempo, when the tempo to be reproduced was far from the typical spontaneous motor tempo of young adults (around 600 ms). In other words, sensorimotor learning did not improve temporal performance when the ISI was close to the spontaneous motor tempo.

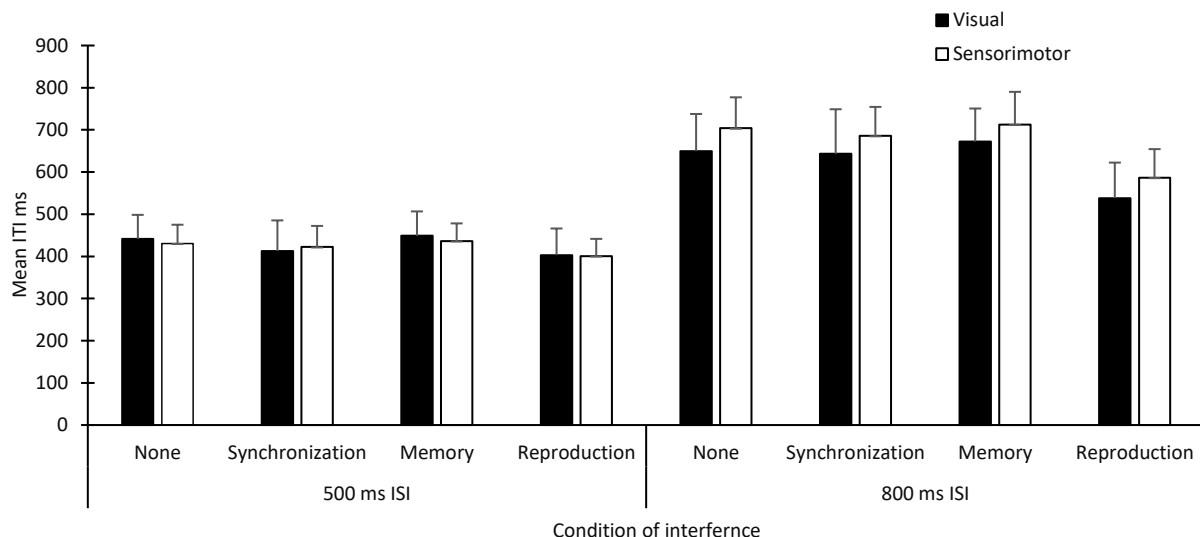


Figure 1. Mean of ITI in the visual and the sensorimotor learning condition in the four interfering conditions for both the 500 and the 800 ms ISI.

Mean Absolute error

The ANOVA on the mean Abs(error) (Figure 2) confirmed results found with the mean ITI. There was a main effect of ISI, $F(1, 54) = 180.57, p < .0001, \eta^2_p = .77$, with a higher error level for the 800 ms ISI ($M = 167.56, SE = 7.70$) than for the 500 ms ISI ($M = 89.85, SE = 4.75$). Indeed, the impact of the interference task on the abs(error) was higher in the 800 ms-ISI condition than in the 500 ms-ISI condition, as suggested by the significant Interference \times ISI interaction, $F(3, 162) = 40.87, p < .001, \eta^2_p = .43$, which subsumed the significant main effect of interference, $F(3, 162) = 116.57, p < .001, \eta^2_p = .68$. Similar to our findings for mean ITI, the temporal error was higher when the secondary task interfered with rhythmic stimulation, both in the synchronization- and the reproduction-interference condition, compared to the no-interference condition for both the 500 and the 800 ms ISI (Bonferroni, all $p < .05$). By contrast, there was no difference in the abs(error) between the memory-interference and the no-interference condition ($p > .05$). In line with our findings for mean ITI, the temporal error was nevertheless higher when the interference task occurred in the reproduction phase than in the synchronization phase in both ISI conditions ($p < .05$).

The impact of visual versus sensorimotor learning did not vary as a function of interference condition, as indicated the lack of significant interaction involving the learning factor ($p > .05$). There was only a significant main effect of learning, $F(1, 54) = 5.45, p < .02, \eta^2_p = .09$, with a significant Learning \times ISI interaction, $F(1, 54) = 9.44, p < .003, \eta^2_p = .15$. Specifically, the effect of learning did not reach significance for the 500 ms ISI (sensorimotor: 85.40; visual: 94.29, $F(1, 54) = 0.87, p = .35$). It was only for the longer ISI that we observed a significant effect of learning, $F(1, 54) = 8.31, p = .006, \eta^2_p = .13$, with a lower abs(error) value following sensorimotor learning ($M = 145.34, SE = 10.50$) than visual learning ($M = 189.77, SE = 11.28$).

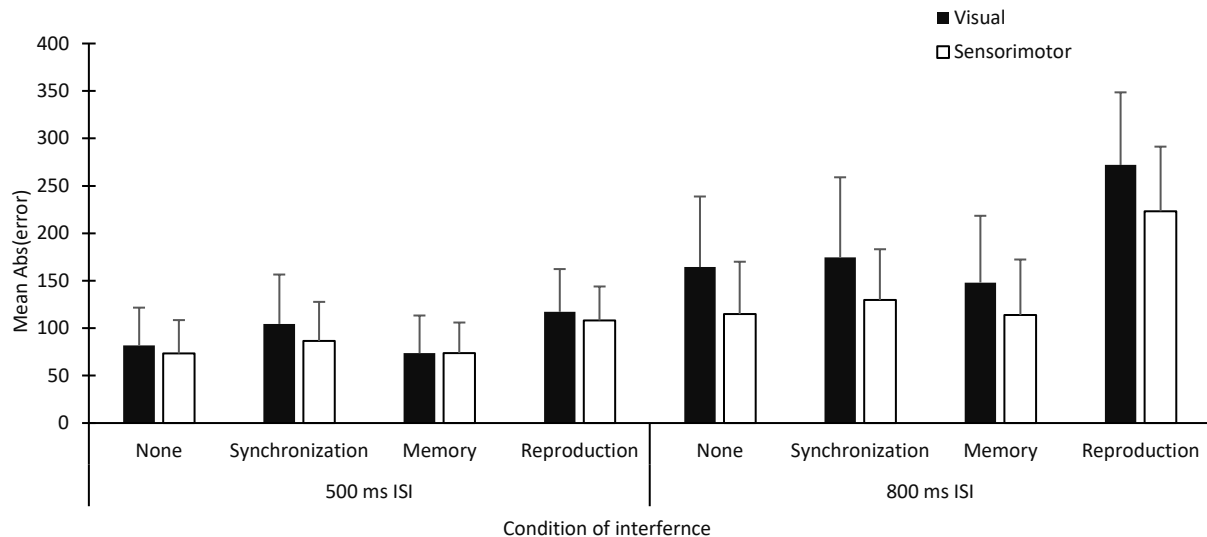


Figure 2. Mean Abs(error) in the ITI, in the visual and the sensorimotor learning conditions in the four interfering conditions for both the 500 and 800 ms ISI conditions.

Temporal variability

Figure 3 shows the temporal variability (SD) measured in each interference condition. The ANOVA of temporal variability showed that adding an action to the learning of rhythm did not reduce temporal variability (Learning, $F(1, 54) = 0.43$; ISI x Learning, $F(3, 162) = 0.89$, Interference x Learning, $F(3, 162) = 0.85$; Interference x Learning x ISI, $F(3, 162) = 0.87$, all $p > .05$). The ANOVA only identified significant main effects of ISI, $F(1, 54) = 313.96$, $p < .0001$, $\eta^2_p = .85$, and Interference, $F(3, 162) = 252.70$, $p < .0001$, $\eta^2_p = .82$, with a significant ISI x Interference interaction, $F(3, 162) = 63.45$, $p < .0001$, $\eta^2_p = .54$. As expected, temporal variability was higher in the 800 ms ISI ($M = 72.20$, $SE = 2.02$) than in the 500 ms ISI condition ($M = 43.05$, $SE = 1.52$). In addition, in each ISI condition, temporal variability was higher when the interference task was given in the reproduction phase than in the other phases (Bonferroni, all $p < .05$), while no difference was observed between the other interference conditions, i.e. between the synchronization- and the memory-interference and the non-interference condition (all $p > .05$).

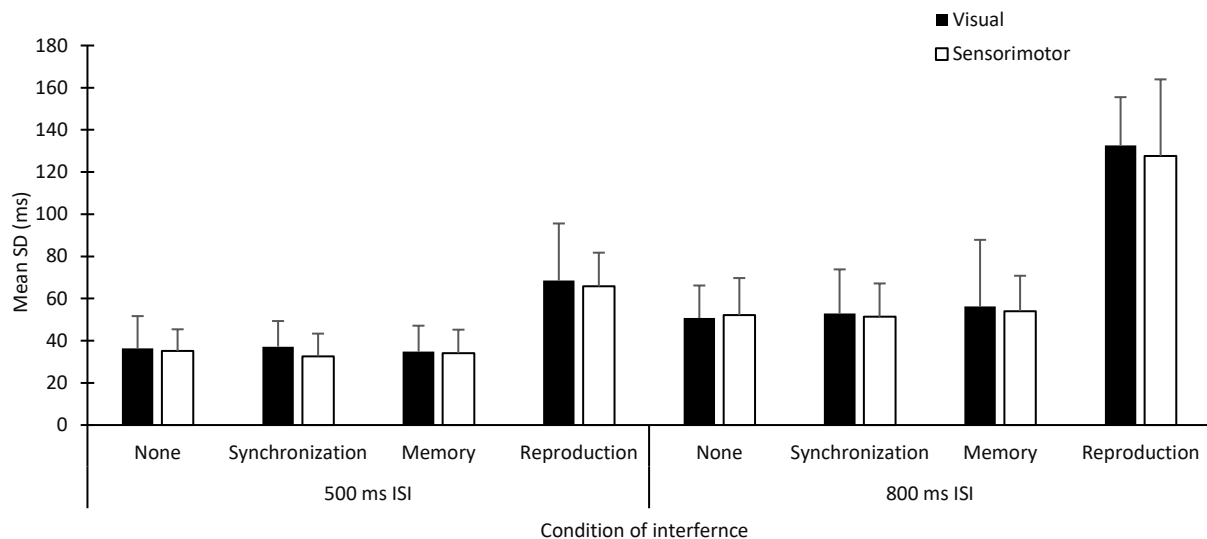


Figure 3. Variability of ITI in the visual and the sensorimotor learning conditions in the 4 interfering conditions for both 500 and 800 ms ISI conditions.

2.2. Correlations with neuropsychological scores

We ran correlational analyses between the motor and the short-term memory scores and the different indices of temporal performance (mean, SD of ITI, Abs(error)) for each interference-condition in the two learning conditions (Table 2). As one could suspect, the results did not show any significant correlation between performance and the neuropsychological scores for the short ISI of 500 ms (all $p > .05$).

By contrast, there were significant correlations between mean ITI and neuropsychological scores in the 800ms ISI condition, although the pattern of correlations does not provide a clear overall picture. The results in the sensorimotor learning condition revealed that participants who had higher motor scores produced less temporal errors when the interference task occurred during the memory-retention phase ($r = -.41, p < .05$), and were less variable in their rhythmic reproduction when the interference task occurred during the synchronization phase ($r = -.38, p < .05$). These correlations were not observed in the visual learning condition ($p > .05$). In other words, the participants with higher motor scores were more resistant to disruptive effects of the interference task on their temporal performance when they had experienced motor learning.

There was also a significant correlation between temporal variability and short-term memory in the sensorimotor learning condition when interference occurred during the retention of rhythm in memory ($r = .44, p < .05$). Therefore, the participants with higher short-term memory capacities were more resistant to memory interference effects. In the visual condition, we also found a significant correlation between the short-term memory score and the Abs(error) in the non-interference condition ($r = -.45, p < .05$) and the reproduction-interference condition ($r = -.48, p < .05$).

Table 2. Correlations between the motor and short-term memory scores and the temporal indices in both visual and sensorimotor learning conditions (the mean ITI index has been removed because of the total absence of correlations) for the 800ms block

Sensorimotor learning			Visual Learning		
<i>Without interference</i>			<i>Without interference</i>		
	1	2		1	2
1. Motor ability	1		1. Motor ability	1	
2. Short-term memory	.024	1	2. Short-term memory	.024	1
Abs(error)	.009	-.08	Abs(error)	.18	-.45*
Temporal variability	-.20	.29	Temporal variability	.06	.07
<i>Synchronization</i>			<i>Synchronization</i>		
	1	2		1	2
Abs(error)	-.001	-.12	Abs(error)	.07	-.19
Temporal variability	-.38*	.14	Temporal variability	.004	-.23
<i>Memory</i>			<i>Memory</i>		
	1	2		1	2
Abs(error)	-.40*	-.001	Abs(error)	.26	-.23
Temporal variability	-.03	-.44*	Temporal variability	.15	-.10
<i>Reproduction</i>			<i>Reproduction</i>		
	1	2		1	2
Abs(error)	-.12	-.36	Abs(error)	.22	-.48*
Temporal variability	.09	.08	Temporal variability	.05	.09

Discussion

In this study, participants performed a rhythmic task composed of 3 phases: synchronization, memory retention (30s) and rhythm reproduction. We examined the beneficial effect of action on rhythmic performance in adults by comparing a sensorimotor learning condition with a visual learning one. Furthermore, we added an interfering task either in the synchronization phase, the memory retention phase, the reproduction phase, or we added no interference, with the aim of clarifying whether action would be helpful for encoding, maintaining or reproducing rhythm.

First, our results replicated previously published results that action (sensorimotor learning) benefits timing performance (Iordanescu, et al., 2013; Manning & Schutz, 2013, 2016; Manning, Harris & Schutz, 2017). Indeed, in contrast to results of Chapter 6, we found significant benefits of sensorimotor (compared to visual) learning on rhythm reproduction even in adults. The fact that we were able to measure beneficial effects of action in adults in the current study are probably due to the increased difficulty of the timing task. The insertion of a memory retention phase and the inclusion of a secondary task meant performance wasn't at ceiling as in Chapter 4, affording the possibility for improved performance. This result confirms that action can benefit timing in adults but only if adults are having difficulty with the timing task in the first place.

Unfortunately, we were unable to distinguish whether the beneficial effects of action occurred at the encoding, memory retention or reproduction phase of the timing task. The secondary task interfered with timing performance when it was presented during either the synchronization or reproduction phase, but not during the memory retention phase. Consequently, we suggest that the secondary task used in our study did not affect the maintenance of a temporal rhythm in memory but rather its initial encoding and motor

reproduction. Since tapping rhythm increased whenever participants had to process a rhythmic sequence as well as the blue squares, we suggest that the secondary task interfered with visual processing of the rhythmic sequence.

Recent studies on the perception of duration have used the same interference task than that used in our study and found that this task distorted duration judgment in an explicit time judgment task (Hallez & Droit-Volet, 2017, 2019). Thus, we suggest that the relatively low levels of interference induced by the same color discrimination task during our rhythmic timing task, at least in the 500ms condition when the ISI was close to the typical spontaneous motor tempo, demonstrates that the encoding and maintenance of rhythm in memory demands little effort or, at least, does not compete for attentional resources, That is to say rhythmic timing is more automatic (less susceptible to interference) than judgements of single durations (Jones et al., 2002). Nevertheless, when the ISI was considerably longer than the typical spontaneous motor tempo, i.e. when the timing task was more effortful, the interfering effects of the secondary task were greater.

It is important to note that the studies by Hallez and Droit-Volet were conducted in children so an alternative explanation for the relatively low interference effects of the secondary task in the current study is that it was not a distracting enough task for the adults. Moreover, given that motor benefits on timing performance are even greater in children than in adults (Chapter 6), it's possible that in the future we might be able to successfully distinguish the effects of action at different phases of the timing task (encoding, retention, reproduction) by using this interference paradigm in children rather than in adults.

Finally, the correlational analysis showed no link between timing performance and either motor or cognitive ability in the 500 ms ISI condition. These results provide additional data to the literature supporting the idea that synchronization places little demand on cognitive and motor resources, at least in adults, when the rhythm is close to the preferred tempo. On the other hand, in the 800 ms ISI condition, there were significant correlations between motor ability and timing performance in the sensorimotor learning condition. This suggests that adding action to the learning of rhythm exacerbates inter-individual differences, so that action would be mainly beneficial for participants with higher levels of motor coordination. In other words, the participants with high motor skills were more successful than others in maintaining a motor rhythm in the presence of an interference task, but only when this rhythm was more difficult to produce, as in the case of the longer ISI.

In sum, the results of our study suggest that the improvement in timing performance following sensorimotor learning is not due to the effects of action on a specific phase of rhythm processing (i.e., encoding, memory retention, reproduction), but to a more general effect or, potentially, to an effect that was not manipulated in this study. Nevertheless, we confirmed prior results (Iordanescu, et al., 2013; Manning & Schutz, 2013, 2016; Manning, Harris & Schutz, 2017) that temporal accuracy in a rhythmic tapping task is better following sensorimotor learning compared to visual learning, at least when the rhythm to be reproduced is longer than the typical spontaneous motor tempo and therefore more effortful.

Chapitre 8

Effet d'un apprentissage moteur « dynamique » De la durée.

Etude 6

Résumé

Objectif

Dans nos études précédentes, nous avons montré un effet bénéfique de l'action sur l'apprentissage des intervalles temporels dans une séquence rythmique chez l'enfant et l'adulte. De plus, nous avons vu que l'adulte est capable de se construire une représentation de l'intervalle, isolée de la séquence rythmique dans laquelle il est inséré. Cette représentation de l'ITI isolée lui permet alors d'améliorer ses performances temporelles dans une tâche de discrimination de durées comme nous l'avons vu dans l'étude 4 au chapitre 6. De plus, comme nous l'avons vu dans notre introduction, l'action facilite l'apprentissage des durées isolées, en dehors de toute séquence rythmique chez le jeune enfant. Dans cette sixième étude, nous avons donc souhaité examiner si la composante dynamique de l'action, autrement dit le mouvement, jouait un rôle dans cette facilitation de l'apprentissage d'une durée. La méthode et les résultats de cette étude sont présentés dans ce chapitre. Toutefois, celle-ci n'a pas fait l'objet d'une publication, les résultats obtenus n'étant pas convaincants. Nous nous contenterons donc de présenter brièvement ces résultats.

Méthode

Dans cette sixième étude, nos participants étaient des adultes et des enfants âgés de 5 ans. Dans un souci de cohérence, mais également pour maintenir une certaine difficulté de la tâche, nous avons continué à travailler avec des stimuli visuels. Les participants devaient tout d'abord apprendre la durée d'un mouvement (1500 ms). Comme dans la plupart de mes études de thèse,

la moitié des participants regardait simplement le cercle (condition d'apprentissage visuel), l'autre moitié devait suivre avec le doigt la construction du cercle (condition d'apprentissage sensorimoteur). Ensuite, tous les participants réalisaient la même tâche de généralisation temporelle dans laquelle ils devaient reconnaître la durée de ce cercle parmi d'autres durées plus courtes ou plus longues, le cercle se dessinant alors plus lentement ou plus vite.

Résultats

Dans cette étude, les résultats n'ont malheureusement pas permis de mettre en évidence un effet bénéfique du mouvement sur l'apprentissage de la durée, ni chez l'enfant ni chez l'adulte. En examinant les performances des adultes, on observe qu'ils ont réussi l'apprentissage dans les deux conditions avec une performance tendant même à être inférieure dans la condition d'apprentissage sensorimoteur que dans la condition d'apprentissage visuel. Les enfants quant à eux ont échoué dans les deux conditions à réaliser la tâche de généralisation répondant tout à fait au hasard. Il semble que leur attention ait été totalement accaparée par la réalisation du geste de suivi du cercle.

Conclusion

Dans cette étude les mauvaises performances des enfants peuvent s'expliquer par le fait que nous avons ajouté une tâche motrice à la tâche temporelle. La tâche motrice a peut-être alors constitué une double tâche difficile à gérer pour les enfants aux capacités attentionnelles limitées. Ainsi, l'absence d'effet du mouvement pourrait être due à un mauvais choix de nos conditions d'apprentissage. En effet, il se peut que l'enfant n'apprenne pas mieux la durée en ajoutant une action au stimulus perceptif temporel. Ajouter une durée d'action à une durée de perception n'aiderait donc pas l'enfant à se construire une représentation du temps. Les représentations précoces des durées ne seraient donc pas dans l'action, qui se superpose à la durée perceptive, mais dans la durée de l'action elle-même, sans autres informations sensorielles temporelles. L'enfant appréhenderait donc la durée dans ses propres actions (Coull & Droit-

Volet 2018), quand il appuie pendant un certain temps par exemple ou que la durée se prolonge dans l'effort (Droit 1995). Une autre hypothèse est que le mouvement ne serait tout simplement pas aussi pertinent pour l'apprentissage de la durée isolée que pour l'apprentissage de l'ITI du rythme. Quoi qu'il en soit une autre étude sera nécessaire pour trancher cette question.

1. Method

1.1. Participants

Our sample was composed of 77 participants, 33 adults and 44 5 year-old children .The children were recruited from nursery and primary schools. The children took part voluntarily and their parents signed a consent form for their participation in this experiment. This experiment was approved by both the director of the academy of the French National Education Ministry and the Clermont-Ferrand Sud-Est VI Statutory Ethics Committee (CPP, Sud-Est VI, France). At the end of the experiment, the children received cartoon cards to thank them for their participation

1.2. Material

The participants were seated in front of a PC computer in a quiet room. We used E prime II software to deliver the visual stimuli and record participants' responses.

Stimulus

The stimulus to be timed was the movement of a blue circle (diameter 5 cm) and arrow presented at the center of the computer screen. The circle developed from a cross and gradually formed an entire circle at the center of the screen. The total duration to complete the circle was 1500 ms, the standard duration.



Figure 1: Temporal Stimulus

1.3. Procedure

The experiment was composed of two successive phases: a learning phase, and a testing phase. Participants were randomly assigned to one of the two learning conditions, the visual learning condition or the sensorimotor learning condition. During the visual learning condition, they just had to look at the drawing of the circle without moving or counting. In the visuomotor learning condition, they had to put their finger on the screen at the beginning of the drawing and follow the dynamic drawing of the circle with their finger. In each condition, the learning phase consisted of 30 presentations of the circle (at the standard duration).

Then, in the testing phase, the participants performed a discrimination task. In this phase, the stimulus duration varied (5 comparison durations : 750 ms, 1125 ms, 1500 ms, 1750 ms and 2250 ms). At each comparison duration, the participants had to say “yes” if the circle duration was the same as the standard duration, or “no” if it was different. There were 8 presentations of each comparison duration, except for the standard duration which was presented 12 times. The experiment was composed of two blocks of trials with, for each block, a learning phase followed

by a testing phase composed of 26 trials. So the participants performed a total of 52 trials. The duration of the whole task was almost 10 min.

2. Results

2.1. Proportion of “yes” responses

Fig. 1 showed the proportion of “yes” response plotted against comparison stimulus durations. Examination of the 5-year-olds’ temporal productions suggest that children produced relatively flat generalization gradients. By contrast, adults produced steeper curves, with the peak of the generalization gradient at the standard duration. This generalization gradient was similar to those obtained in adults with generalization tasks (Droit-Volet & Izaute, 2005; Droit-Volet, Clément, & Wearden, 2001; McCormack, Brown, Maylor, Darby, & Green, 1999).

We ran an ANOVA analysis on the proportion of yes responses with comparison duration as a within-subjects factor, and age and learning-type as between-subjects factors. The analysis showed a main effect of comparison duration $F(4, 70) = 57.33, p < .001, \eta^2_p = .45$, and of age $F(1, 70) = 1.38, p = .02, \eta^2_p = .07$, as well as an age x duration interaction $F(4, 280) = 22, p < .001, \eta^2_p = .24$. This confirmed that the gradient was flatter for the children than for the adults. Unfortunately, this analysis showed neither a main effect of learning, $F(1, 70) = 2.69, p = .10$, a duration x learning interaction, $F(4, 280) = 1.45, p = .21$, nor a three way age x duration x learning interaction $F(4, 280) = .5, p = .74$. Consequently, our analyses failed to show an influence of action on the generalization gradient.

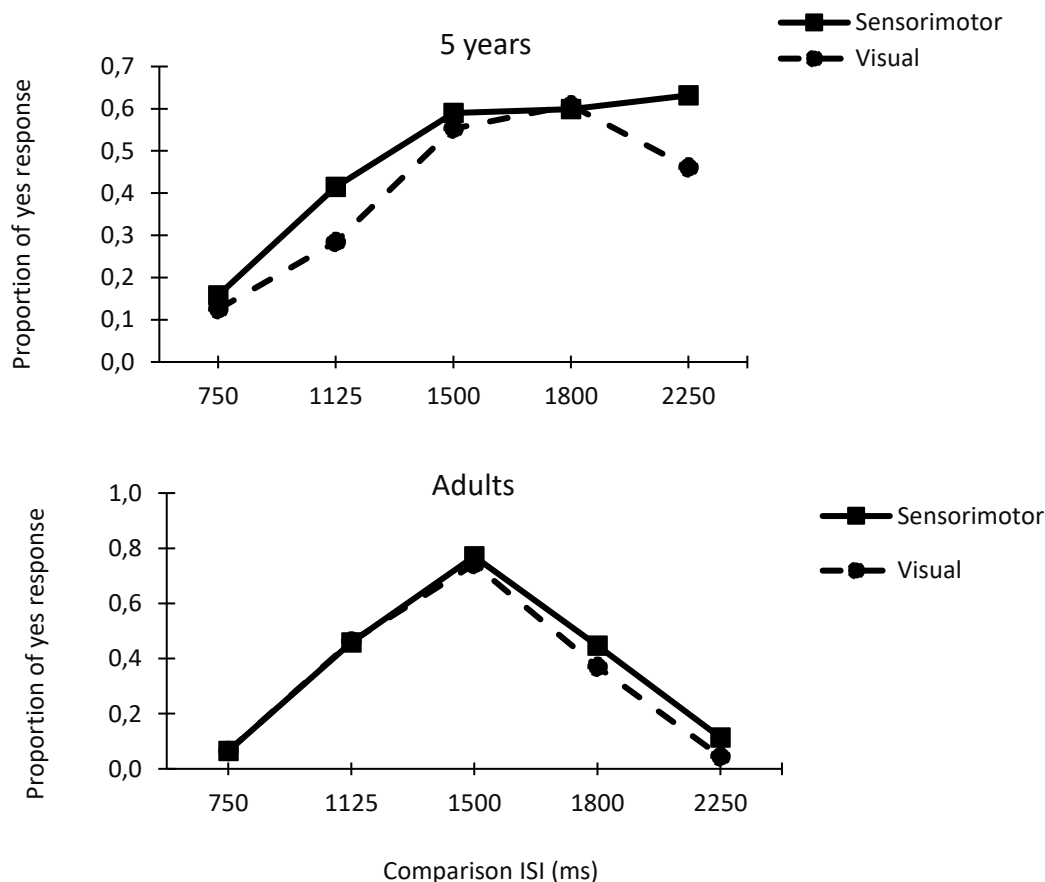


Figure 2: Proportion of “yes” response plotted against the comparison durations for the two age groups in the two learning conditions, sensorimotor and visual.

2. 3 Mean and variability in the target rhythm discrimination

To further evaluate participants' performance we calculated the Gaussian mean (peak) (Fig. 2) and the Gaussian dispersion (standard deviation) of participants' responses. We excluded 10 children and 3 adults from the analyses because their generalization gradient did not follow a Gaussian distribution ($R < .08$, $p < .05$).

An ANOVA analysis was conducted on the peak value, with age and learning condition as between-subjects factors. This analysis indicated no significant main effect of learning, $F(1, 60) = .04$, $p = .84$, but a significant main effect of age, $F(1, 60) = 46$, $p < .001$, $\eta^2_p = .43$ with no significant learning condition x age interaction $F(1, 60) = .60$, $p = .69$. Indeed, the peak of the gradient was higher for children than for adults indicating a lengthening effect in young children. The ANOVA analysis conducted on the width (SD) of the generalization gradient showed a significant main effect of learning condition, $F(1, 60) = 8.71$, $p = .004$, $\eta^2_p = .12$, a significant main effect of age, $F(1, 60) = 51$, $p < .001$, $\eta^2_p = .46$ and a significant learning condition x age interaction $F(1, 60) = 7.45$, $p = .008$, $\eta^2_p = .11$. Examining the two groups separately it appeared that there was no significant main effect of the learning condition in adults $F(1, 28) = .07$, $p = .78$. By contrast, there was a significant main effect of learning in children, $F(1, 32) = 10.78$, $p = .002$. In fact, the children had more difficulty performing the task in the sensorimotor learning condition than in the visual one, as indicated by their greater variability in the former condition.

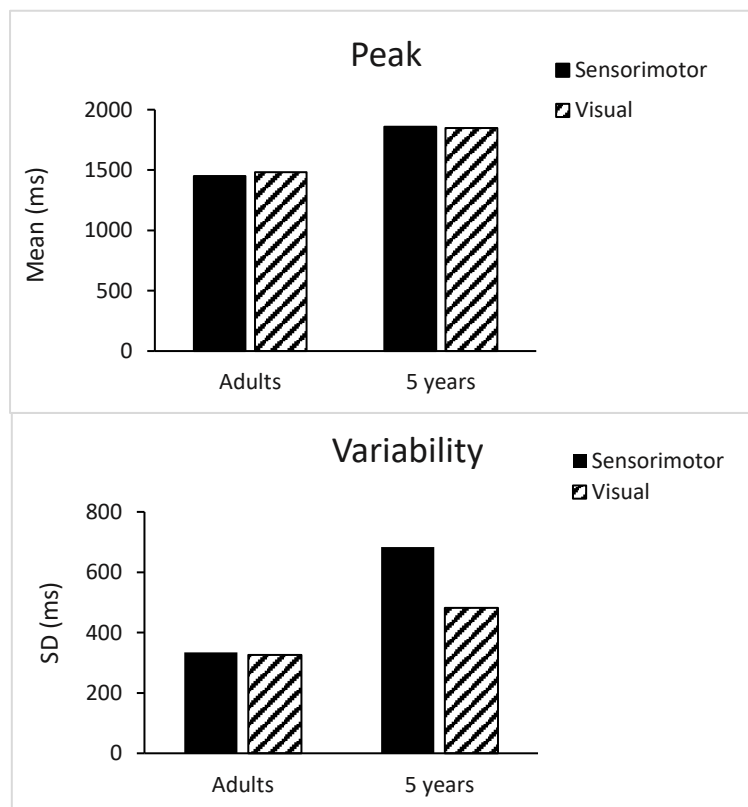


Figure 3. Gaussian mean (Peak) and dispersion (variability) of participants' generalization gradients in the two learning conditions

Discussion

Adults and children learned the duration of a visual stimulus, either by simply watching the outline of a circle being drawn dynamically on the screen (visual learning) or simultaneously tracing the outline of the circle's appearance with their finger (sensorimotor learning). Duration perception was subsequently measured in a temporal generalization task. Adults performed the task equally well under both learning conditions while children, contrary to our hypothesis, actually performed more poorly in the sensorimotor condition compared to the visual condition.

The fact that adults were no better in the sensorimotor condition than the visual condition is consistent with results presented in Chapter 6, in which adults failed to benefit from sensorimotor learning in a rhythm reproduction task. The most likely explanation is that adult performance was already at ceiling in these two paradigms, with little room for improvement by sensorimotor learning. However, the lack of motor benefit on timing performance in children was unexpected and inconsistent with results presented in Chapter 6, in which sensorimotor learning benefitted both motor and perceptual measures of rhythmic timing. With this particular circle-drawing motor task, we not only failed to show a beneficial effect of action on duration learning but found that action actually *impaired* performance. As discussed later, this might be due to the fact that the sensorimotor condition added a motor task (tracing the circle) to the temporal task (timing the circle's appearance). The young children's performance was thus lower in the "dual" task (sensorimotor condition) than in the "single" task (visual condition). By contrast, in Chapter 6 the effect of action was more beneficial for rhythmic timing because the rhythmic action in this case was part of the task. This emphasizes the importance of further examining the role of the action in timing when it is the action itself that is being timed, rather than the perceptual input.

Chapitre 9

Etude sur l'effet des émotions sur la synchronisation sensorimotrice chez l'adulte et l'enfant

Etude 7

Résumé

Objectif

Ainsi que nous l'avons évoqué à la fin de notre introduction, l'intégration des émotions pourrait être un chaînon essentiel de la régulation des activités rythmiques et de leur développement. En effet, l'incorporation, l'incarnation du rythme, en anglais l'embodiment du rythme, pourrait être la source des comportements précoces de synchronisation-interpersonnelle. L'étude de l'influence des émotions sur les rythmes permet d'examiner cette idée d'embodiment du rythme. Toutefois, peu d'études ont été menées dans ce domaine à l'exception d'une étude réalisée chez l'adulte par Droit-Volet et Provasi (2015). Nous avons donc réalisé une septième étude portant sur l'influence du contexte émotionnel sur les rythmes moteurs et leur changement avec l'âge.

Méthode

Dans cette étude, notre échantillon était composé d'enfants âgés de 3, 5 et 8 ans, ainsi que d'adultes. Nous avons utilisé une tâche de synchronisation temporelle semblable à celles utilisées dans nos autres études. Les participants réalisaient d'abord une tâche de TMS, puis une tâche de synchronisation-continuation avec un stimulus auditif tout en regardant une image. Il y avait une condition neutre (sans émotion) pour laquelle l'image était seulement un écran vert, puis trois types d'images émotionnelles, des images neutres, des images générant la peur, et des images générant la tristesse. De plus cette tâche de synchronisation a été réalisée avec deux ISI différents, un court de 500 ms et un long de 700 ms.

Résultats

Tout d'abord, en ce qui concerne les effets développementaux, nous avons retrouvé les mêmes résultats que lors de nos précédentes études. Les jeunes enfants âgés de 3 ans et 5 ans rencontrent des difficultés dans la production et le maintien d'un rythme lent de 700 ms. De plus, ils sont plus variables dans leur production rythmique. Ensuite, concernant les effets des émotions sur les productions rythmiques, cette étude a confirmé les effets observés dans l'étude de Droit-Volet et Provasi (2015). La condition émotionnelle de peur produit une augmentation du niveau d'éveil physiologique (High arousal) et génère une distorsion dans les ITI plus importante que la condition neutre ou celle associée à la tristesse, de faible niveau d'éveil physiologique (Low arousal). De plus les distorsions temporelles ont été observées dès la phase de synchronisation, malgré la présence du rythme externe, ainsi que dans la phase de continuation. Comme dans les études émotionnelles sur la discrimination des durées, les résultats de notre étude n'ont révélé aucun changement des effets des émotions sur les productions rythmiques avec l'âge. Quel que soit l'âge des enfants, les productions rythmiques sont accélérées avec des ITI plus courts dans un contexte émotionnel augmentant le niveau d'éveil (High arousal) que dans un contexte de bas niveau d'éveil.

Conclusion

Cette étude révèle que la capacité à moduler les rythmes moteurs en fonction des émotions perçues est précoce et fortement adaptative. Dès le plus jeune âge, l'enfant parvient donc à moduler ses productions rythmiques pour s'adapter au contexte. Toutefois, cette modulation n'est possible que dans une fenêtre relativement proche du TMS.

Synchrony and Emotion in Children and Adults

Florie Monier & Sylvie Droit-Volet

Monier, F., & Droit-Volet, S. (2018). Synchrony and emotion in children and adults. *International Journal of Psychology*, 53, 3, 184-193.

Abstract

This study examined both the development of synchronization activities and the way emotion affects these activities in children and adults. Children aged from 3 to 8 years, as well as adults, performed a spontaneous motor tempo (SMT) task and a synchronization task with a 500-millisecond and 700-millisecond inter-stimulus interval (ISI), followed by a continuation task, in both an emotion-free and an emotional context (High-Arousal, Low-Arousal, and Neutral). The results showed that the SMT was faster and more variable in the younger children. In addition, the younger children found it more difficult to slow down their tapping rate in synchrony with the 700-millisecond ISI, with the result that they quickly returned to their internal tempo in the continuation phase. In contrast, the 8-year-olds' synchronization performance was close to that of the adults. However, despite developmental changes in synchronization skills, all the participants produced faster tempi in both the SMT and the synchronization task for the High-Arousal emotion than for the other emotions. This suggests that emotions induce an automatic distortion of motor timing as has also been observed for the perception of time.

Keywords: Synchrony; Timing; Motor timing; Emotion; Children; Development.

1. Introduction

All parents are surprised to observe their young children spontaneously moving their bodies while listening to rhythmic music and changing the rhythm of their movements as a function of the emotion induced by music, speeding up in response to happy-sounding music with a fast tempo. Quite surprisingly, few studies have examined children's synchronization capacities and their flexibility in different emotional contexts. This entrainment of movement by an external rhythm and emotional context is possible because the human motor activity is intrinsically dynamic, and changes in time. In 1900, William Stern tried to characterize the internal rhythm of human motor activity, which he referred to as the "psychic tempo." He proposed a simple task requiring participants to tap their fingers on the table at a spontaneous tempo. This natural speed of motor tapping has since been considered as a valid measure of internal motor tempo (Frasse, 1974). The aim of the present study was to examine not only the spontaneous motor tempo (SMT) in children and adults and their ability to acquire another rhythm by synchronizing their motor tempo with an external rhythm, but also to examine how emotion affects the motor tempo in a synchronization task.

Since the pioneering work of Stern, several psychologists have assessed the SMT in children and adults by means of the motor tapping paradigm, although studies in children remain rare (Provasi, Anderson, & Barbu-Roth, 2014; Bobin-Bègue, Droit-Volet & Provasi, 2014). To date, only two studies have used the tapping task to test the SMT in children aged between 1 and 4 years (Bobin-Bègue & Provasi, 2008; Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Overall the results have pointed to a slowing-down of the tapping rate with age (Drake, Jones, & Baruch, 2000; Frasse, Chambron, & Oléron, 1954; McAuley, Jones, Holub, Johnston, & Miller, 2006).

Depending on the studies, the inter-tap intervals (ITI) have been found to be between 350 and 550 milliseconds in children aged 4–5 years and between 550 and 750 milliseconds in adults. At intermediate ages, no clear age-related SMT trend has been observed (Drake et al., 2000). Similarly, Provasi and Bobin-Bègue (2003) did not observe any significant difference in the SMT between children aged 4–5 years and younger children aged 1.5–3.5 years, who produced an ITI between 400 and 500 milliseconds. Some divergences in the results of different studies nevertheless appear at the level of the intra-individual variability of the SMT. Indeed, Drake et al. (2000) found that the standard deviation of the ITI increased with age as the tapping rate slowed down. In contrast to these results, Provasi and Bobin-Bègue (2003) did not find an increase but instead an age-related decrease in the variability of the SMT. Furthermore, Drake et al. (2000) noted that musicians, who are expert in the production of rhythm, were less variable in their motor tempi despite their longer ITI. This suggests that increased training during development decreases rather than increases the variability of the SMT with age, a finding which is consistent with the stabilization of the motor rhythm. We therefore decided to run an experiment using the tapping paradigm to further examine the SMT in a wide range of ages from 3 to young adult age.

The aim of our experiment was not only to examine the SMT in children in different age groups, but also to investigate how the SMT varies under the influence of emotions. Indeed, and somewhat surprisingly, no study has examined the effect of emotions on the SMT obtained with the tapping paradigm. A recent study conducted by Droit-Volet and Provasi (2015) took an initial look at this question but the authors used only a synchronization task in an exclusively adult population. Nevertheless, two older studies examined the effect of an increase in body temperature on motor tapping (Bell, 1965; François, 1927). In each study, the participants were required to tap a Morse key at a rate of three taps per second. The results showed a significant increase in the tapping speed as body temperature increased. The authors thus explained that the internal clock system accelerates as body temperature rises, thus speeding up subjective time. Although no experiments have been conducted on the effect of emotion on motor tapping, a large number of studies have examined the effect of emotion on the perception of stimulus durations, which is thought to be based on the same master clock as motor tempo (Ivry, 1996; Wing & Kristofferson, 1973). By using batteries of standardized emotional stimuli, these studies have found an acceleration of subjective time under the effect of High-Arousal emotion (H-A) compared to Low-Arousal and Neutral emotion (Droit-Volet, Fayolle, Lamotte, & Gil, 2013; Droit-Volet & Meck, 2007). Consequently, we can suppose that, in the same way as for time perception, an H-A emotion would speed up the internal clock system, thus increasing the tapping rate compared to L-A and Neutral emotions.

Consequently, in our study, the SMT was recorded in children and adults in both an emotion-free context and an emotional context. In particular, the participants were told to tap regularly on a computer keyboard at the rate that seemed the most comfortable for them, while non-emotional and emotional pictures were presented on the computer screen. The emotional pictures were selected for their level of arousal (H-A, L-A, and Neutral) from the International Affective Picture System (IAPS) (Lang, Bradley, & Cuthbert, 2005). In addition, as in most studies on tapping rhythm (Repp & Su, 2013), the participants were required to synchronise their motor tempo with a rhythmic sequence of neutral auditory sounds (beeps) (500-millisecond and 700-millisecond ISI), with and without the emotional pictures.

2. Method

2.1. Participants

The sample was composed of eighty-four participants: eighteen 3-year-olds (Mean age = 3.58, SD = 0.26, 16 girls and 3 boys), twenty-six 5-year-olds (Mean age = 5.41, SD = 0.41, 14

girls and 12 boys), twenty 8-year-olds (Mean age = 8.57, SD = 0.41, 9 girls and 11 boys), and twenty adults (Mean age = 8.57, SD = 0.41, 17 women and 3 men). The children were recruited from nursery and primary schools in Ceyrat, Clermont academy (France). The adults were undergraduate students in psychology from the University of Clermont Auvergne. All participants were volunteers. The adults, and the parents for the children, signed a written informed consent to participate in this study. The study was carried out according to the principles of the Helsinki Declaration and was approved by both the inspector of the academy of the French National Education Ministry and the Clermont-Ferrand Sud-Est VI Statutory Ethics Committee (CPP, Sud-Est 6, France). The students received course credit in exchange for their participation.

2.2. Material

The participants were seated, in a quiet room (at school for the children, and university for the adults), in front a PC computer that recorded responses and generated auditory and visual stimuli via E-prime Software. The responses were presses with the index finger of the dominant hand on the spacebar of the computer keyboard. The auditory stimuli used in the synchronization task were 100-ms beeps (440 Hz, 60 dB) delivered by the computer. The visual stimuli were emotional pictures (all negative valence) selected for their arousal level (H-A, L-A and neutral) from the IAPS, which were also validated in children (Lang et al., 2005). The H-A pictures were 1120 (snake), 1300 (pit bull) 1930 (shark) and the L-A pictures 2271 (woman), 2590 (elderly woman) and 9210 (rain). The Neutral pictures were 7010 (basket), 7040 (dustpan) and 7030 (iron). The three H-A pictures have been characterized as eliciting the discrete emotion of fear and the three L-A pictures that of sadness (Mikels, Fredrickson, & Reuter-Lorenz, 2005).

After the synchronization task, the participants assessed the arousal level of the emotion pictures using the 5-point scale of the Self-Assessment Manikin (SAM) adapted to young children (Lang et al., 2005). The emotional pictures were presented on the computer screen until the participants completed the paper SAM scale. For the SAM scale, the children were told that if they felt very calm, relaxed... when they looked at picture then they had to point at this person, and if they felt very excited, nervous. "Look at this picture... which kind of person do you feel like?" (Lang et al., 2005, p. 7). The participants therefore rated 9 different emotional stimuli presented in a random order (3 pictures x 3 emotions).

2.3. Procedure

The participants performed two successive experimental tasks: a SMT task and a synchronization task. In the SMT task, the participant was told to tap with his/her finger on the spacebar as regularly as possible during the presentation of a green square ("keep on tapping with your hand in the same way at the speed you want"). The square turned red when 30 taps had been recorded, thus automatically interrupting the tapping. The SMT task was initially performed in an emotion-free condition, and the experimenter demonstrated a few taps (5–6 taps) before the task to make sure that the participants had understood correctly. It was then performed in the three emotional conditions (High-Arousal, Low-Arousal and Neutral), presented in random order. In each emotional condition, the SMT task was the same as that used in the emotion-free condition, except that the green square was replaced by an emotional picture. As a function of emotional condition, the emotional picture was randomly taken from the pool of three emotion-specific pictures.

The synchronization task was divided into two phases: a synchronized tapping phase followed by a continuation phase. In the synchronization phase, the participants were presented with a rhythmic sequence of 30 beeps and were instructed to press the spacebar in time with the beeps. They had then to continue their tapping with the same rhythm as that initiated in the

synchronization phase and 30 successive taps were recorded (continuation phase). The instructions were: “First, you tap at the same time as the beep. Then, you continue to tap in the same way and at the same speed, even when you do not hear the beep. The red square will tell you that you can stop.” A demonstration consisting of a few taps was again given before the task. The participants completed eight trials: four trials with an inter-beep interval (ISI) of 500 milliseconds and four trials with a ISI of 700 milliseconds. The four trials consisted of the synchronization task conducted in the emotion-free condition and in the three emotional conditions (H-A, L-A, Neutral). The three emotional tasks were administered after the emotion-free task and were presented randomly. The synchronization tasks were similar in all conditions, except that the synchronization phase was performed while a green square in the emotion-free condition and an emotional picture in the emotional conditions was presented on the computer screen. The inter-trial interval was randomly chosen between 500 and 1500 milliseconds. The word “ready” then appeared on the computer screen and the participant the computer spacebar to start the task when he/she felt ready. This triggered the rhythmic beep sequence 500 milliseconds later. The total duration of the overall experimental session (synchronization and assessment of emotion pictures) was about 15–20 minutes.

3. Results

3.1. Synchronization

3.1.1. Spontaneous motor tempo

Figure 1 shows the mean and the variability (SD) of ITI produced by the children and the adults for the SMT. The ANOVA¹ found a significant main effect of age for each measure ($F(3, 80) = 5.92, p = 0.001, \eta^2_p = .18$; $F(3, 80) = 7.07, p = 0.001, \eta^2_p = .21$). The statistical analyses using the Bonferroni test indicated that the ITI were significantly longer in the adults ($M = 728.79, ES = 51.17$) than in the children aged of 3 years ($M = 523.85, ES = 53.94$), 5 years ($M = 446.55, ES = 44.88$), or 8 years ($M = 571.24, ES = 51.17$) (all $p < .05$), while no difference was observed between the children groups ($p < .05$). In contrast, the variability of ITI systematically decreased with the increasing age, the tapping being more irregular in the 3-year-olds ($M = 397.75, ES = 51.39$) than in the 5-year-olds ($M = 216.86, ES = 42.70$), and in the 5-year-olds than in the two older age groups (8 years: $M = 136.46, ES = 48.69$; Adults: $M = 95.58, ES = 48.69$) (all $p < .05$). It was only at the age of 8 years that the children tapped at the same regular rhythm as the adults ($p > .05$).

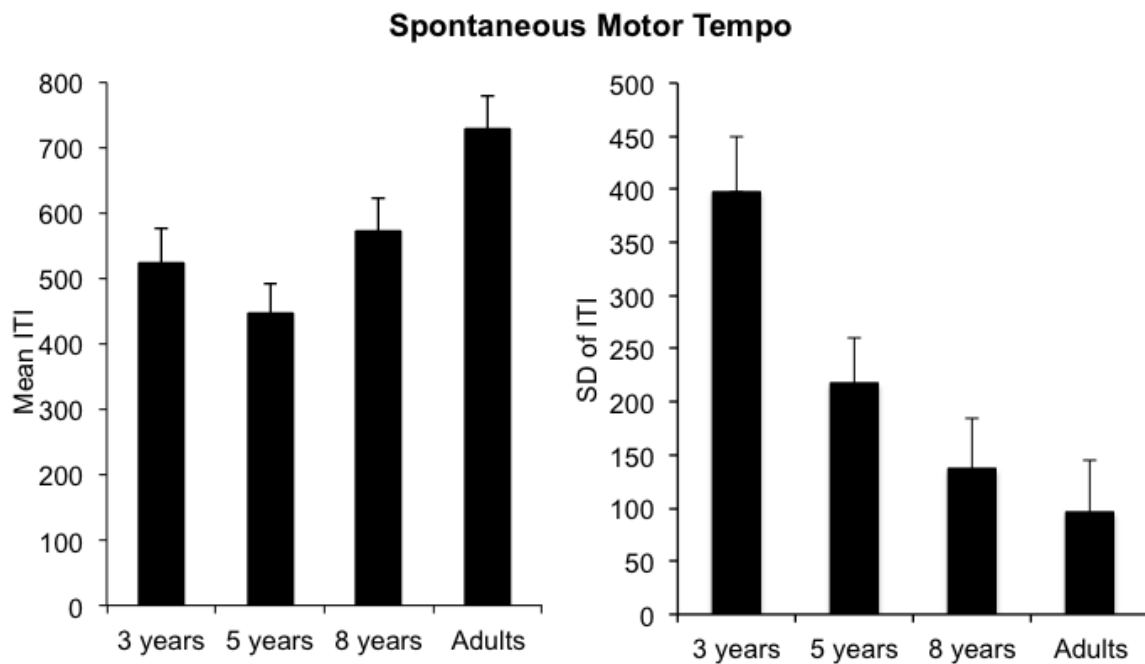


Figure 1. Mean and standard deviation of ITIs for the spontaneous motor tempo in the non-emotional context for the children aged 3, 5 and 8 years and the adults

3.1.2. Synchronization and continuation.

An ANOVA was performed on the mean of ITI with 1 between-subjects factor (age) and 2 within-subjects factors (synchronization vs. continuation, 500-ms vs. 700-ms ISI) (Figure 2). This ANOVA showed a significant main effect of ISI, $F(1, 79) = 222.08, p = 0.0001, \eta^2_p = .74$. Consequently, all participants, even the youngest ones, tapped slower with the 700-ms than with the 500-ms ISI (all 500-700 ISI pairwise comparisons, $p < .05$), thus revealing their capacities to synchronize their finger taps with an external tempo. However, there was a significant main effect of age, $F(3, 79) = 4.51, p = 0.01, \eta^2_p = .15$, and a significant age x ISI interaction, $F(3, 79) = 12.58, p = 0.001, \eta^2_p = .32$, indicating that the magnitude of the difference in the ITI between 700 and 500-ms increased with age. Indeed, the slowing down of tapping with the 700-ms ISI compared to the 500-ms ISI was greater in the 8-year-olds and the adults than in the 5- and the 3-year-olds (Bonferroni test, $p < .05$), with no difference being observed between the two groups of youngest children (3 vs. 5 years) and the two groups of oldest participants (8 years vs. adults) (both $p > .05$).

This ANOVA also showed a main effect of experimental phases (synchronization vs. continuation), $F(1, 79) = 41.18, p = 0.0001, \eta^2_p = .34$, as well as a phase x age interaction, $F(3, 79) = 11.79, p = 0.0001, \eta^2_p = .31$, with no other significant effect. The phase x age interaction suggested that all children tended to speed up their tapping in the continuation phase compared to the synchronization phase (3 years: $t(17) = 3.39$; 5 years: $t(25) = 6.35$; 8 years: $t(18) = 4.89$; all $p < .05$). However, the adults succeeded to maintain in the continuation phase the tapping tempo initiated in the synchronization phase, $t(19) = 1.37, p = .19$. Consequently, although an effect of age was obtained in each synchronization phase (synchronization: $F(3, 79) = 6.35, p = 0.001, \eta^2_p = .19$; continuation: $F(1, 80) = 7.16, p = 0.0001, \eta^2_p = .21$), the rate of ITI was faster in the continuation phase in the 3- and the 5-year-olds than in the 8-year-old and the adults (Bonferroni, $p < .05$) (no difference being observed both between two youngest and the two oldest age groups, $p > .05$), while difference in ITI did not reached significance in the

synchronization phase between the different age groups ($p > .05$), except for the 8-years-old who tended to produce longer ITI than the youngest and the older participants ($p < .05$).

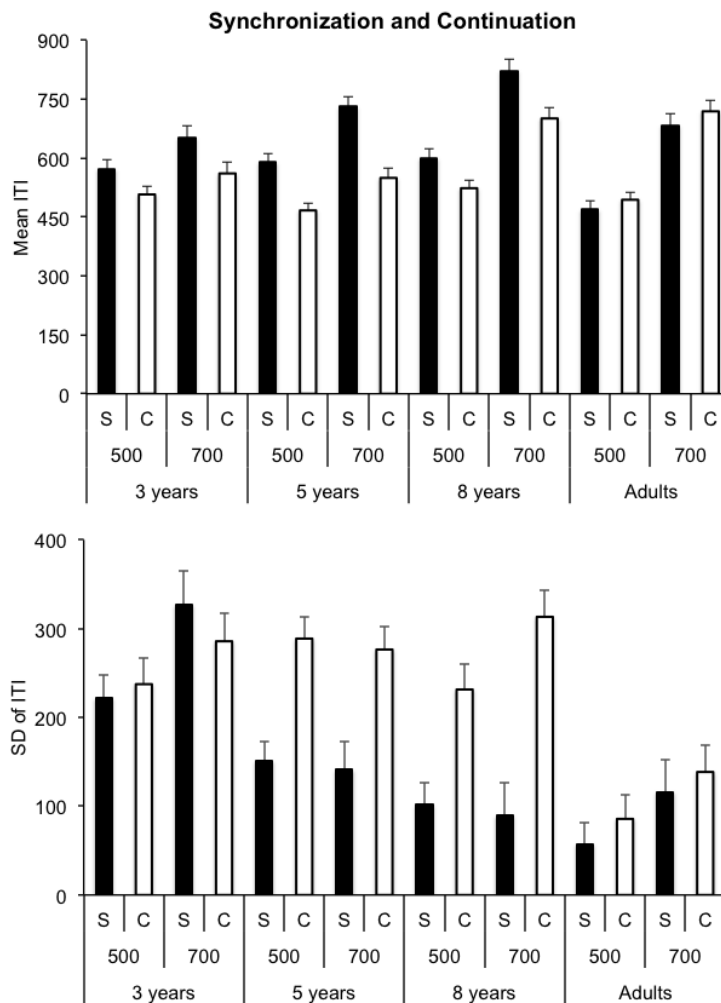


Figure 2. Mean and standard deviation of ITIs for the synchronization (S) and the continuation (C) phase in the no-emotional context for the children aged 3, 5 and 8 years and the adults.

As for the mean of ITI, the ANOVA on the variability of ITI showed a significant main effect of age, $F(3, 79) = 14.96, p = 0.0001, \eta^2_p = .36$, duration, $F(1, 79) = 7.87, p = 0.01, \eta^2_p = .09$, and phase, $F(1, 79) = 29.42, p = 0.0001, \eta^2_p = .27$, as well as a phase x age interaction, $F(3, 79) = 8.54, p = 0.0001, \eta^2_p = .25$, the duration x age interaction being not significant, $F(3, 79) = 2.03, p = 0.12$. No other significant effects were found (all $p > .05$). As indicated Figure 2, the variability of ITI was indeed higher for the 700-ms than for the 500-ms ISI (210.85 vs. 171.83). In addition, the variability of ITI tended to be higher in the continuation than in the synchronization phase (232.17 vs. 150.51). However, the age x phase interaction suggested that the 5- and the 8-year-old children were more variable in their taps in the continuation than in the synchronization phase ($t(25) = 6.48, t(18) = 7.72$, both $p < .05$). In contrast, the variability of ITI did not change between these two experimental phases in the 3-year-olds and the adults ($t(17) = 0.27, p = .79, t(19) = .92, p = .37$), the former always being irregular in their taps and the adults regular.

3.2. Emotion and Synchronization

3.2.1. Emotion and Spontaneous motor tempo

Figure 3 showed the mean ITI for the SMT produced by the participants in the different age groups faced to emotional pictures of the IAPS (Neutral, Low-Arousal, High-Arousal). As for the analyses on the SMT without emotion, the ANOVA on the mean ITI found a main effect of age, $F(3, 80) = 5.86, p = 0.001, \eta^2_p = .18$, with longer ITI in the adults than in all children ($p < .05$), no difference being observed between children groups (see Table 1). However, more interestingly, the ANOVA also found a significant main effect of emotion, $F(2, 160) = 16.04, p = 0.0001, \eta^2_p = .17$, with no interaction between the emotion and the age, $F(6, 160) = 1.7, p = 0.12$. Regardless of age group, the SMT rhythm was thus faster in the H-A condition ($M=505.61, SE=22.44$) than in either the L-A ($M=552.63, SE=24.41$) or the Neutral condition ($M=559.01, SE=23.59$) (Bonferroni test, all $p=.0001$). No difference in the SMT was observed between the L-A and the Neutral condition ($p=1.0$). Comparisons between the SMT in the emotional and the emotion-free condition also found no difference in the mean ITI between the emotion-free condition and either the L-A or the Neutral emotional condition ($p>.05$).

As for the mean ITI, the ANOVA on the variability of ITI showed a significant main effect of age, $F(3, 80) = 14.47, p = 0.001, \eta^2_p = .35$, indicating a decrease of the variability of SMT with increasing age (3 years: $M = 305.53, ES = 27.83$; 5 years: $M = 149.13, ES = 23.1$; 8 years: $M = 107.88, ES = 26.4$; Adults: $M = 67.86, ES = 26.4$), and a significant main effect of emotion, $F(2, 160) = 14.67, p = 0.0001, \eta^2_p = .16$. The age x emotion interaction failed to reach significance, $F(6, 160) = 1.99, p = 0.07$. Consequently, as illustrated by Figure 3, SMT was less variable in the H-A ($M=94.25, SE=7.73$) than in either the L-A or the Neutral conditions ($M=179.57, SE=21.15; M=198.97, SE=20.57$) (Bonferroni tests, $p<.05$). The variability of SMT was nevertheless similar in the L-A and the Neutral conditions ($p>.05$).

3.2.2. Emotion, Synchronization and continuation

The ANOVA on the mean ITI showed the same effects than those reported for the non-emotional condition (age, $F(3, 79) = 3.84, p = 0.01, \eta^2_p = .13$; ISI, $F(1, 79) = 212.47, p = 0.0001, \eta^2_p = .73$; phase, $F(1, 79) = 67.83, p = 0.0001, \eta^2_p = .46$; age x ISI, $F(3, 79) = 11.27, p = 0.0001, \eta^2_p = .30$; age x phase, $F(3, 79) = 14.25, p = 0.0001, \eta^2_p = .35$) (Table 1). However, in the present emotional conditions, a main effect of emotion emerged, $F(2, 158) = 42.56, p = 0.0001, \eta^2_p = .35$. This indicated that, in the synchronization phase, as for the SMT, the H-A emotion increased the tapping rate compared to the L-A and the Neutral emotion (Bonferroni test, $p < .05$). No difference was observed between these two latter conditions ($p > .05$). There was nevertheless an emotion x phase interaction, $F(2, 158) = 11.94, p = 0.0001, \eta^2_p = .13$. Indeed, the effect of emotion described above was obtained both in the synchronization and the continuation phase ($F(2, 164) = 33.08, p = 0.0001, \eta^2_p = .29$; $F(2, 166) = 16.71, p = 0.0001, \eta^2_p = .17$), with a faster rate for the H-A emotion than the other emotions (Bonferroni tests, $p < .05$). However, the mean ITI was significantly longer for the L-A emotion than for the Neutral emotion in the continuation phase ($p < .05$), that was not observed in the synchronization phase ($p > .05$).

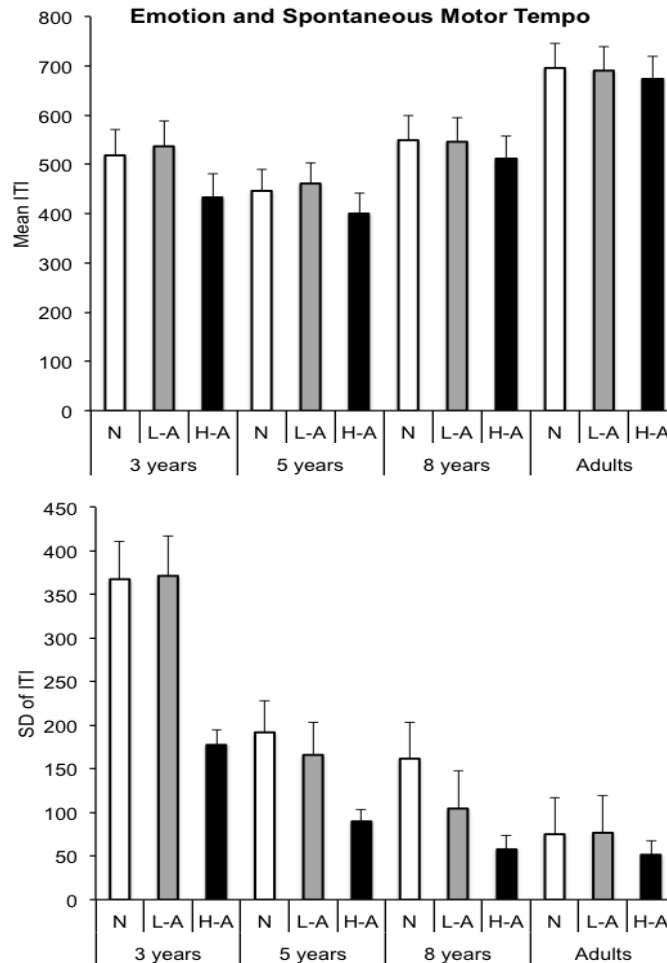


Figure 3. Mean and standard deviation of ITIs for the spontaneous motor tempo in the emotional context (Neutral, Low-Arousal, High-Arousal) for the children aged 3, 5 and 8 years and the adults.

As far as the synchronization tasks are concerned, there was also a significant interaction between emotion and age, $F(6, 158) = 3.78, p = 0.002, \eta^2_p = .13$ (see Figure 4). The effect of emotion was indeed significant for each age group (3 years: $F(2, 34) = 16.79, p = 0.0001, \eta^2_p = .50$; 5 years: $F(2, 50) = 12.40, p = 0.0001, \eta^2_p = .33$; Adults: $F(2, 38) = 13.82, p = 0.0001, \eta^2_p = .42$) ($p < .05$), except for the 8-year-old children (Figure 4). Indeed, at this age, the effect of emotion only tended to be significant, $F(2, 38) = 2.84, p = 0.07, \eta^2_p = .13$, with a significant difference between the H-A and the L-A condition, but no between the H-A and the Neutral condition. Whatever the case may be, the overall results indicated a faster rate of tempo with the H-A emotion than the other emotional conditions at all ages.

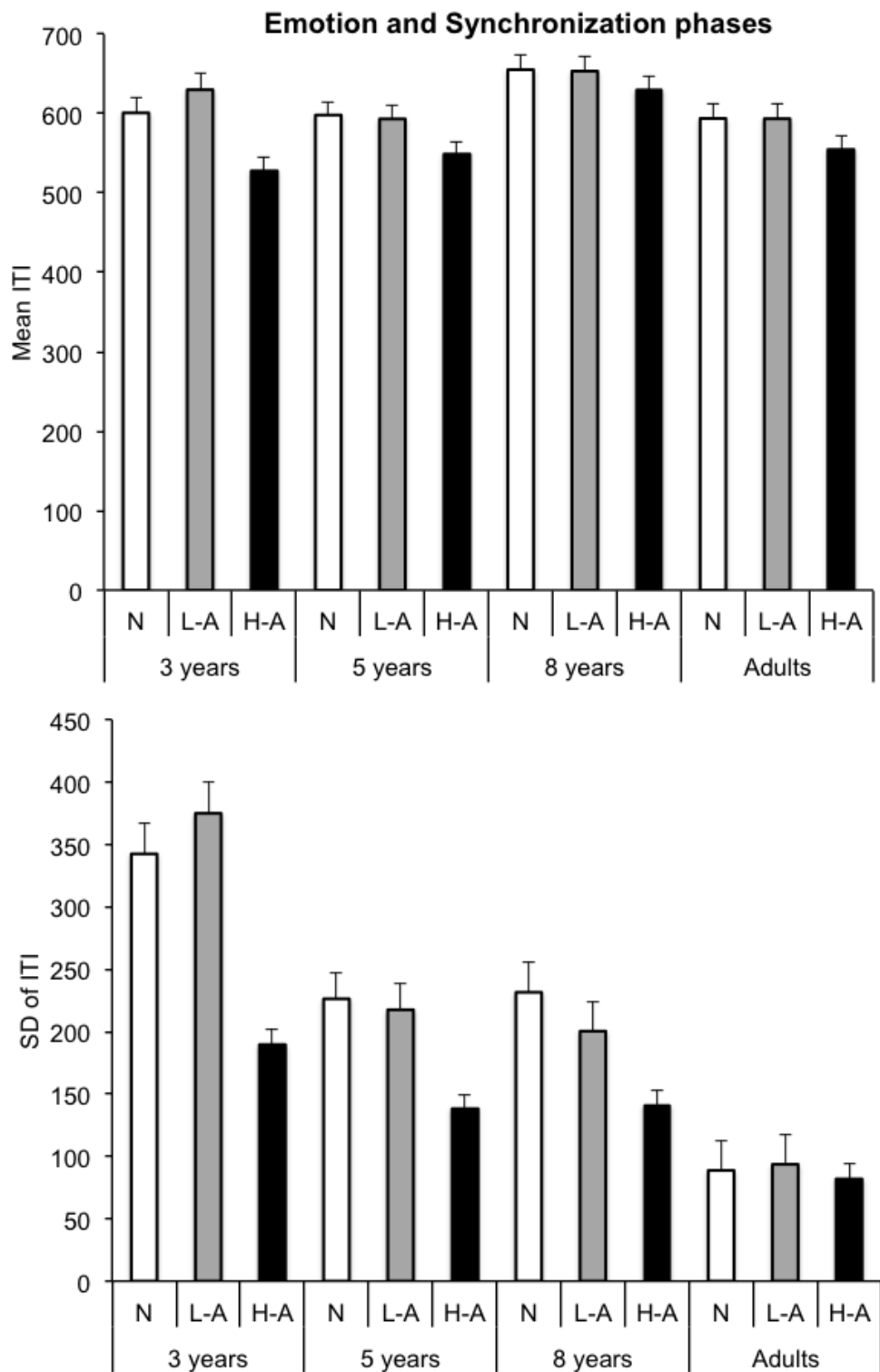


Figure 4. Mean and standard deviation of ITIs for the synchronization task in the emotional context (Neutral, Low-Arousal, High-Arousal) for the children aged 3, 5 and 8 years and the adults.

The ANOVA on the variability of ITI showed a significant 4-way interaction between the emotion, the age, the ISI and the synchronization phases, $F(6, 158) = 4.34, p = 0.0001, \eta^2_p =$

.42 (Table 1). The ANOVA for each age group taken separately indicated that the effect of emotion was significant in all children age groups (3 years: $F(2, 34) = 16.20, p = 0.0001, \eta^2_p = .49$; 5 years: $F(2, 50) = 21.35, p = 0.001, \eta^2_p = .46$; 8 years: $F(2, 36) = 14.63, p = 0.0001, \eta^2_p = .45$), but not in the adults group, $F(2, 38) = 0.35, p = 0.71$ (Figure 4). Indeed, the children's tapping was not only faster but also more regular with the H-A emotion than with the L-A and the neutral emotion (Bonferroni test, all $p < .05$), with no difference between these two latter emotions ($p > .05$). In contrast, the adults' tapping remained regular whatever the emotional contexts (all pairwise comparisons, $p > .05$). For the 3-year-olds, there was also a significant emotion x duration x phase interaction, $F(2, 34) = 6.86, p = 0.003, \eta^2_p = .29$. This interaction was due to the variability of ITI in the 700-ms/L-A condition which significantly increased in the continuation phase compared to the synchronization phase, $t(17) = 2.55, p = .02$.

In addition, the ANOVA on the variability of ITI showed the same pattern of results than that found in the synchronization task without emotion, with a significant main effect of the phase (5 years: $F(1, 25) = 58.39, p = 0.0001, \eta^2_p = .70$; 8 years: $F(1, 18) = 59.21, p = 0.0001, \eta^2_p = .77$; Adults: $F(1, 19) = 23.86, p = 0.0001, \eta^2_p = .58$), and a significant main effect of duration at least for the 5- and the 8-year-old children (5 years: $F(1, 25) = 4.38, p = 0.047, \eta^2_p = .15$; 8 years: $F(1, 18) = 20.66, p = 0.0001, \eta^2_p = .53$; Adults: $F(1, 19) = 2.61, p = 0.12$), with not other interaction involving these factors (all $p > .05$). Therefore, even in an emotional context, the participants tended to speed up their tempo after the synchronization, and consequently to be less variable in their taps, even when they were instructed to maintain their synchronization tempo.

As explained above, for the youngest children aged 3 years old, there was also an emotion x duration x phase interaction, indicating that the variability of ITI in the continuation phase was significantly higher for the L-A emotion than for the H-A emotion but also for the Neutral emotion ($p < .05$). In the synchronization phase, no difference in the ITI variability between the L-A and the Neutral emotion was found. The 3-year-olds' tapping rhythm was only less variable with the H-A emotion than with the two other emotions, as for the older participants.

TABLE 1 Mean and Standard Error for the Mean and the Standard Deviation of Inter-Tap Intervals (ITI) for the 3-year-olds, the 5-year-olds, the 8-year-olds and the adults in the different experimental phases: Spontaneous Motor Tempo (SMT), Synchrony (S) and Continuation (C) for the 500 and the 700 Inter-Stimulus Intervals (ISI).

Age	ISI	Phases	Emotion	Mean ITI		SD of ITI	
				M	SE	M	SE
3 years	500	SMT	No	523.86	53.94	397.75	51.32
		SMT	N	518.54	52.24	367.45	44.03
		SMT	L-A	536.95	50.51	371.28	45.28
		SMT	H-A	433.43	48.02	177.87	16.54
		S	No	572.35	25.19	221.68	25.67
		C	No	507.37	20.33	237.42	29.16
		S	N	597.02	27.60	357.56	47.96
		C	N	525.07	20.56	306.60	33.55
		S	L-A	668.52	35.82	387.66	50.50
		C	L-A	538.54	22.80	313.56	28.44
	700	S	H-A	518.45	19.48	180.68	21.13
		C	H-A	481.36	17.00	168.94	15.91
		S	No	651.29	31.91	326.79	38.06
		C	No	560.87	28.40	285.74	31.42
		S	N	707.19	34.17	418.83	42.48
		C	N	573.68	28.71	287.45	33.48
		S	L-A	692.06	31.11	312.59	32.43
		C	L-A	620.42	27.83	486.63	42.90
		S	H-A	594.22	30.52	197.20	22.22
		C	H-A	518.49	25.32	210.71	17.10
5 years	500	SMT	No	446.55	44.88	216.86	42.70
		SMT	N	446.47	43.47	191.81	36.63
		SMT	L-A	461.31	42.02	165.93	37.67
		SMT	H-A	401.04	39.96	89.66	13.76
		S	No	589.71	20.96	151.23	21.36
		C	No	466.69	16.92	288.74	24.26
		S	N	613.52	22.97	303.08	39.90
		C	N	487.12	17.11	130.68	27.92
		S	L-A	588.74	29.80	249.31	42.02
		C	L-A	491.20	18.97	141.90	23.66
	700	S	H-A	557.12	16.21	173.16	17.58
		C	H-A	462.11	14.14	93.41	13.23
		S	No	730.13	26.55	140.82	31.67
		C	No	549.47	23.63	276.46	26.14
		S	N	744.55	28.43	307.44	35.35
		C	N	546.74	23.89	164.43	27.86
		S	L-A	731.62	25.89	320.42	26.98
		C	L-A	560.86	23.16	158.74	35.70
		S	H-A	663.48	25.39	185.96	18.49
		C	H-A	515.97	21.07	102.53	14.22
8 years	500	SMT	No	571.24	51.17	136.46	48.69
		SMT	N	549.44	49.56	161.63	41.77
		SMT	L-A	546.10	47.91	104.42	42.95
		SMT	H-A	511.21	45.56	57.56	15.69
		S	No	599.71	24.51	101.27	24.99
		C	No	523.32	19.79	231.44	28.38
		S	N	636.02	26.86	288.36	46.68
		C	N	513.25	20.01	102.24	32.66
		S	L-A	606.29	34.86	226.67	49.15
		C	L-A	514.63	22.19	67.84	27.68
	700	S	H-A	588.95	18.96	176.05	20.56
		C	H-A	507.06	16.54	62.25	15.48
		S	No	821.53	31.06	89.23	37.05
		C	No	700.84	27.64	313.28	30.58
		S	N	826.69	33.26	401.96	41.35
		C	N	644.47	27.95	159.81	32.59

Age	ISI	Phases	Emotion	Mean ITI		SD of ITI	
				M	SE	M	SE
Adults	500	S	L-A	832.42	30.28	358.84	31.56
		C	L-A	659.49	27.09	110.21	41.76
		S	H-A	774.86	29.71	236.39	21.63
		C	H-A	649.79	24.65	78.92	16.64
		SMT	No	728.80	51.17	95.58	48.69
		SMT	N	696.06	49.56	75.00	41.77
		SMT	L-A	690.65	47.91	76.68	42.95
		SMT	H-A	674.76	45.56	51.90	15.69
		S	No	468.54	23.89	57.18	24.35
		C	No	493.87	19.29	85.71	27.66
		S	N	506.79	26.18	125.34	45.50
		C	N	493.68	19.51	36.31	31.83
	700	S	L-A	485.10	33.98	132.70	47.91
		C	L-A	503.40	21.63	42.33	26.98
		S	H-A	439.08	18.48	95.66	20.04
		C	H-A	490.20	16.12	46.06	15.09
		S	No	682.74	30.27	115.90	36.11
		C	No	718.92	26.94	138.57	29.80
		S	N	683.58	32.41	142.69	40.30
		C	N	690.66	27.24	50.84	31.76
		S	L-A	683.39	29.52	114.50	30.76
		C	L-A	701.58	26.41	85.17	40.70
		S	H-A	616.24	28.95	130.89	21.08
		C	H-A	678.84	24.02	56.65	16.22

3.3. Emotional assessment

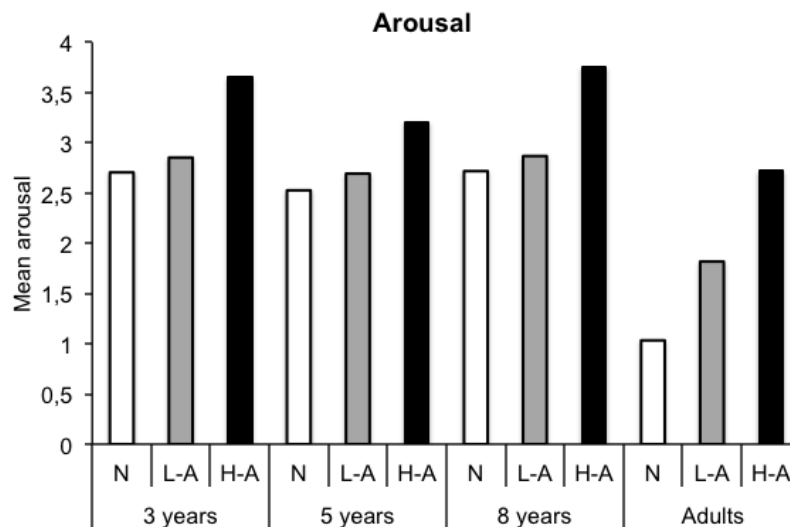


Figure 5. Mean rating of arousal level of emotional pictures (Neutral, Low-Arousal, High-Arousal) for the children aged 3, 5 and 8 years and the adults

Figure 5 showed the mean rating of arousal level for each type of emotional pictures (Neutral, L-A, H-A) using the 5-point SAM scale. The ANOVA on this measure confirmed the significant effect of emotion, $F(2, 160) = 62.39, p = 0.001, \eta^2_p = .44$. The H-A pictures were indeed judged as more arousing than the L-A and the Neutral pictures (Bonferroni tests, $p = 0.001$). More surprisingly, the L-A pictures were not judged as less arousing than the Neutral pictures ($p > 0.05$). However, there was a significant main effect of age, $F(3, 80) =$

33.35, $p = 0.001$, $\eta^2_p = .56$, as well as a significant age x emotional interaction, $F(6, 160) = 2.71$, $p = 0.02$, $\eta^2_p = .09$. The effect of emotion appeared to be significant for each age group (3 years: $F(2, 34) = 12.28$, $p = 0.0001$, $\eta^2_p = .42$; 5 years: $F(3, 50) = 8.67$, $p = 0.001$, $\eta^2_p = .26$; 8 years: $F(2, 38) = 22.42$, $p = 0.001$, $\eta^2_p = .54$; Adults: $F(2, 38) = 22.69$, $p = 0.0001$, $\eta^2_p = .54$). Indeed, the H-A pictures were systematically judged as more arousing than the L-A and the Neutral pictures in each age group (all pairwise comparisons, $p = 0.001$), with no difference between these two latter pictures ($p > .05$). However, surprisingly enough the adults judged more arousing the L-A pictures ($M = 1.8$) than the Neutral pictures ($M = 1.03$), although both were judged low arousing on the 5-point SAM scales.

4. Discussion

The results revealed developmental changes in the SMT, with a critical transition at about 8 years, the age as of which the SMT rate significantly decreased and approached that of the adults. Indeed, up until the age of 8 years, the children spontaneously produced ITI shorter than those produced by the adults. This is consistent with the results found by McAuley et al. (2006), which revealed the similarity in the participants' ITI after 8 years, namely between children aged 10–12 years and adults. However, as far as the variability of SMT is concerned, a decrease in the variability of ITIs (even though the ITIs lengthened with age) was systematically observed between each age group, from 3 years through to young adult age. In other words, the SMT become more regular across ages. The most pronounced age-related changes in SMT thus lie in the variability rather than the length of SMT.

Furthermore, our results showed that, whatever their age, all the participants were able to slow down their SMT in order to synchronize with an external tempo. Indeed, in the synchronization phase, the ITIs were longer with a 700-millisecond ISI than a 500-millisecond ISI in all age groups. However, our study also suggested that the task of synchronizing a motor rhythm with an auditory rhythm was more difficult for the younger children, thus suggesting that they are less flexible in adapting their motor tempi. Indeed, the difference in the mean ITI between the 500- and the 700-millisecond ISI was greater in the 8-year-olds and the adults than in the 3- and the 5-year-olds. In addition, although the children were instructed to maintain the tempo initiated in the synchronization phase, the tempo accelerated in the continuation phase in all the children, but to a greater extent in the younger children. Only the adults succeeded in maintaining the rhythm acquired in the synchronization phase. Despite their ability to produce a new tempo in the presence of rhythmic stimuli, the children's motor tempi thus returned rapidly to the rhythm of their internal tempo in the continuation phase.

Our results also demonstrated that emotions affect both the SMT and synchronization behaviors in all age groups. Indeed, in both the SMT task and the synchronization task, the children and the adults tapped faster with the H-A emotion than with the L-A and the Neutral emotions. In contrast, there were no difference in the length of ITIs between the L-A and the Neutral emotion at least for the SMT and the synchronization phase. Indeed, in the continuation phase, the ITI was significantly longer for the L-A emotion than for the Neutral emotion. Two explanations can be provided for the lack of differences between the L-A and the Neutral condition for the SMT and the synchronization phase. Firstly, the difference in the level of arousal induced by the perception of L-A and Neutral pictures from the IAPS was not high enough to reveal any effects on timing behavior, except in the transitional behavioral phase (continuation), that is, with the tempo becoming less regular when the rhythmic sequence of sounds was withdrawn. This finding is supported by our scores of the assessment of arousal levels that were similar for the L-A and Neutral pictures. Secondly, the absence of difference between these two emotions has systematically been found in time perception studies (Droit-Volet et al., 2013). An alternative explanation is that the function of the temporal mechanisms involved in (motor or perceptual) timing is more clearly to speed up than to slow down in

emotional contexts, because it is related to the need for action readiness in the case of the H-A emotion.

Even though it was not clearly established that motor timing slows down with L-A emotions in the tapping task, there is ample evidence that it is accelerated by H-A emotions. Indeed, the children and the adults tapped faster with the H-A emotion in all the timing tasks (SMT, synchronization, continuation). This acceleration of motor timing under the influence of H-A emotion is entirely consistent with the results of emotional studies on the perception of time. Indeed, these studies have revealed an acceleration of subjective time with H-A emotion (Gil & Droit-Volet, 2012). Our study thus generalizes the effects of emotion on time perception to motor timing, including the production of motor rhythms. There is a debate concerning the mechanisms involved in the acceleration of time in response to the increased physiological arousal produced by emotion. However, most researchers agree in considering that the time distortions that occur under the influence of H-A emotion result from the speeding-up of the internal clock system (Cheng, Tipples, Narayanan, & Meck, 2016). According to the internal clock models (Gibbon, Church, & Meck, 1984), a pacemaker emits a number of pulses that are gated into an accumulator during the stimulus to be timed. When the level of physiological arousal increases, this speeds up the pacemaker, with the result that more pulses are accumulated and the stimulus duration is judged longer and the duration to be produced shorter.

The increase in physiological arousal level with the H-A emotion associated in our study with emotion of fear consists in automatic defense responses geared to ensure the survival of the species that are observed at an early age in different animal species (Ledoux, 2014). In line with this observation, our results showed that all the participants, even those as young as 3 years, accelerated their motor tempi in response to the H-A emotion compared to the other emotions. In addition, our study suggested that there was no age-related difference in the H-A emotional effect on motor timing in the tapping tasks used. Using the same synchronization tasks in adults, Droit-Volet and Provasi (2015) found an increase in tempo with H-A emotions only in the continuation phase. However, in their study, they used a rhythmic sequence of emotional stimuli (facial expressions), whereas in our study, the participants tapped in time with a rhythmic auditory rhythm (beep) while an emotional picture was presented on the computer screen. The effect of our type of emotional context, which might be considered to be more ecological, was therefore more efficient in producing an emotional effect on motor timing. Whatever the emotional context used, the results relating to the absence of a developmental trend in the H-A emotional effect on motor timing confirmed the results on time perception. Indeed, the two studies conducted in children aged from 3 to 8 years did not find any age-related changes in the H-A emotional effect on the judgment of durations (Droit-Volet, Fayolle, & Gil, 2016; Gil, Niedenthal, & Droit-Volet, 2007). Our study is therefore the first to demonstrate that the emotional effects on motor timing in a tapping task in children are similar to those previously found for time perception. In sum, despite their faster and more variable motor tempi and the difficulty they experience in adapting these tempi to external tempi, young children, like adults, accelerate their tempo in response to high-arousal emotions. This suggests that the acceleration of motor timing in a high-arousal emotional context is automatic, thus revealing the fundamental adaptive function of motor timing in synchronization activities.

Footnotes

Fraisse (1966) demonstrated that the rhythm is quickly adopted, after three ITI. Therefore, we did not include in the treatment the first three ITI.

Acknowledgments

The authors would like to thank all the teachers and the directors (Claudine Bissereix and Yolande Camp) from the nursery schools and primary schools in Ceyrat. The present study was supported by a Grant (TIMESTORM) from European Commission, Horizon 2010 research and innovation action (H2020-FETPROACT-2014).

References

- Bell, C. R. (1965). Time estimation and increases in body temperature. *Journal of Experimental Psychology*, 70, 2, 232-234
- Bobin-Bègue, A., & Provasi, J. J. (2008). Régulation rythmique avant 4 ans : effet d'un tempo auditif sur le tempo moteur. *L'année Psychologique*, 108(04), 631–658. doi:10.4074/S000350330800403X
- Bobin-Bègue, A., Droit-Volet, S. & Provasi, J. (2014). Young children's difficulties in switching from rhythm production to temporal interval production (> 1 s). *Frontiers in Psychology*. doi: 10.3389/fpsyg.2014.01346.
- Cheng, R-K, Tipples, J., Narayanan, N-S, & Meck, W.H. (in press). Clock Speed as a Window into Dopaminergic Control of Emotion and Time Perception. *Timing and time perception*.
- Drake, C., Jones, M. R., and Baruch, C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences: attunement, referent period, focal attending. *Cognition* 77, 251–288. doi: 10.1016/S0010-0277(00)00106-2
- Droit-Volet, S. & Meck, W.H. (2007). How emotions colour our time perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 1, 12, 504-513.
- Droit-Volet, S., Fayolle, S., & Gil, S. (2016). Emotion and time perception in children and adults: The effect of task-difficulty. *Timing and Time Perception*, 4, 1, 7–29.
- Droit-Volet, S., Fayolle, S., Lamotte, M. & Gil, S. (2013). Time, Emotion and the Embodiment of timing. *Timing and time perception*, 0, 1-30.
- Droit-Volet, S. & Provasi, J. (2015). Synchrony and emotion. *Timing and Time perception*.
- Fraisse, P. (1974). *Psychologie du rythme*. Presses Universitaires de France.
- Fraisse Paul, Chambron Henry, Oléron G. Note sur la constance et l'évolution génétique du tempo spontané moteur. In: *Enfance*. Tome 7 n°1, 1954. pp. 25-34.
- François, M. (1927). Contribution à l'étude du sens du temps : la température interne comme facteur de variation de l'appréciation subjective des durée. *L'Année psychologique*, 28, 186-204.
- Gibbon, J., Church, R., & Meck, W. H. (1984). Scalar timing in memory. In J. Gibbon & L. Allan (Eds.), *Annals of the New York Academy of Sciences*, 423: *Timing and time perception* (pp. 52–77). New York, NY: New York Academy of Sciences.
- Gil, S., & Droit-Volet, S. (2012). Emotional time distortions: The fundamental role of arousal. *Cognition and Emotion*, 26(5), 847–862.
- Gil, S., Niedenthal, P., & Droit-Volet, S. (2007). Anger and temporal perception in children. *Emotion*, 7, 219–225.
- Ivry, R. B. (1996). The representation of temporal information in perception and motor control. *Curr. Opin. Neurobiol.*, 6, 851–857.
- Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (2005). *International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual* (Technical Report A-6). University of Florida, Gainesville, FL.
- Ledoux, J. (2014). Coming to terms with fear. *PNAS*, 111(8), 2871–2878.
- McAuley, J. D., Jones, M. R., Holub, S., & Johnston, H. M., & Miller, N. S. (2006). The time

- of our lives: life span development of timing and event tracking. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135, 3, 348-367.
- Mikels, J., Fredrickson, B., & Reuter-Lorenz, P. (2005). Emotional category data on images from the International Affective Picture System. *Behavior Research Methods*, 37(4), 626–630.
- Provasi, J., & Bobin-Bègue, A. (2003). Spontaneous motor tempo and rhythmical synchronization in 2 1/2- and 4-year-old children. *International Journal of Behavioral Development*, 27, 3, 220-231.
- Provasi, J., Anderson, D. I. & Barbu-Roth, M. (2014). Rhythm perception, production and synchronization during the perinatal period. *Frontiers in Psychology*, doi: 10.3389/fpsyg.2014.01048.
- Repp, B. H. (2005), Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonom. Bull. Rev.*, 12, 969–992.
- Repp, B. H., & Su, Y. H. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006–2012). *Psychonom. Bull. Rev.*, 20, 403–452.
- Stern, W. (1900). *Über psychologie der individuellen differenzen*. Leipzig, Germany: Verlag von Johann Ambrosius Barth
- Wing, A. M., & Kristofferson, A. B. (1973). The timing of inter-response interval. *Percept. Psychophys.*, 14, 5–12.

Discussion

L'action joue-t-elle un rôle particulier dans les conduites temporelles et leur développement ? C'est la question à laquelle j'ai tenté de répondre à travers ce travail de thèse.

En introduction, j'ai insisté sur le fait que le jugement temporel ne se limite pas à un simple traitement des durées par notre mécanisme « d'horloge interne », via l'activité oscillatoire des groupes de neurones. De nombreux autres processus cognitifs et moteurs sont impliqués. Le jugement temporel dépend par exemple des capacités d'attention, des capacités d'inhibition de la réponse, ou encore des capacités de coordination motrice qui favorisent la flexibilité des rythmes moteurs comme ceux que l'on a étudiés. De plus, les processus sollicités changent selon la tâche et la situation. Ainsi, la multitude de processus sous-jacents aux jugements temporels rend nécessaire l'examen rigoureux des différentes opérations impliquées dans chacune des tâches temporelles.

Dans ce travail de thèse, même si je m'intéresse à toutes les conduites temporelles et que la question posée concerne aussi l'estimation des durées, j'ai fait le choix d'étudier essentiellement des tâches de synchronisation. Ces tâches ont en effet une composante motrice importante et sont donc appropriées pour examiner le rôle de l'action dans les conduites temporelles. Toutefois, jusqu'à présent, peu d'études ont examiné les différentes composantes de l'activité de synchronisation et leurs spécificités. J'ai donc commencé ce travail de thèse par une première étude, en comparant, les performances d'enfants d'âges différents dans plusieurs tâches de synchronisation. Travailler avec des enfants dont les capacités motrices et cognitives varient est un moyen d'évaluer la contribution respective de ces capacités dans les performances de synchronisation (De Ribaupierre & Lecerf, 2018). Prendre comme sujets des enfants permet donc d'étudier le développement d'une compétence temporelle motrice, la synchronisation, mais sert aussi de modèle pour comprendre le fonctionnement de l'adulte. C'est d'ailleurs dans

cette démarche que s'inscrit l'ensemble des travaux du célèbre épistémologue Jean Piaget (1946).

Dans cette première étude, j'ai donc examiné les différences individuelles dans les performances pour chaque phase de la synchronisation (tempo moteur spontané (TMS), synchronisation, continuation) et les variations de performance avec l'âge des enfants selon leurs capacités cognitives et motrices. Les résultats de ma première étude ont montré l'existence de trajectoires de développement différentes pour les activités de TMS, de synchronisation et de continuation. Ceci rend compte du fait que la synchronisation temporelle n'est pas une fonction unitaire ainsi que l'ont suggéré Kotz et ses collègues (2018) (voir aussi Drake et al., 2000).

Concernant la tâche de TMS, la seule différence développementale que l'on observe entre 5 et 8 ans est une légère augmentation de la régularité des frappes, autrement dit une réduction de la variabilité. L'amélioration de la régularité est liée aux compétences motrices des enfants. De façon intéressante, on observe peu d'évolution du rythme de la frappe, qui reste autour de 400 ms, quelle que soit la longueur de la session (33 frappes, 66 frappes ou 99 frappes). Ceci révèle que l'établissement du TMS est rapide chez l'enfant et qu'il n'y a pas d'emballement de leurs frappes. De plus, nos résultats montrent que le TMS, dans son ITI moyen ou sa variabilité, n'est pas relié au niveau de développement cognitif des enfants. Seules les différences sur le plan des capacités de coordination motrice rentrent en compte dans les différences avec l'âge de la variabilité du TMS. L'ensemble de ces résultats est en accord avec l'idée selon laquelle la capacité de produire de façon spontanée un rythme moteur serait automatique, sollicitant peu les fonctions cognitives comme le suggèrent Fraisse et ses collaborateurs (1954, voir aussi Delevoeye-Turrel et al., 2014). Ainsi, dans la mesure où la valeur de l'intervalle inter frappe change peu au cours du développement, on peut défendre l'idée que le TMS reflète un rythme interne établi de façon précoce, du moins dès l'âge de 3-5 ans (Provasi & Bobin-Bègue, 2003).

Si l'on examine les performances des enfants à travers le modèle de Wing et Kristofferson (1973), la composante temporelle nécessaire à la production du TMS serait donc fonctionnelle à ces âges puisque le rythme est maintenu avec une moyenne quasiment constante. La variabilité des frappes plus élevée chez les jeunes enfants ne serait donc pas due à un mauvais fonctionnement de l'horloge interne à la base du traitement temporel mais à la composante périphérique du rythme, la composante motrice. Comme le suggèrent nos résultats, celle-ci est assujettie aux capacités motrices des enfants. Ceci corrobore les résultats obtenus chez les enfants avec des lésions du cervelet (Provasi et al., 2014). En effet, ces enfants présentent des difficultés de production du rythme mais pas de perception du rythme. On peut donc penser que c'est, pour l'essentiel, leur capacité de coordination motrice qui affecte leur production de rythme. Dans de futures études il serait intéressant d'étudier l'influence d'un entraînement moteur, par exemple avec des instruments de percussion, sur la régularité du TMS chez les jeunes enfants, et plus particulièrement chez les enfants présentant des troubles comme dans le cas de la dyspraxie ou des troubles de l'inhibition motrice.

Comme nous l'avons évoqué à plusieurs reprises, il y aurait donc deux composantes dans l'activité rythmique, une composante temporelle sollicitant le fonctionnement de l'horloge interne, et une composante motrice. On peut donc considérer que dans le cas des rythmes qui impliquent un traitement automatique des durées courtes, de quelques centaines de millisecondes, le système d'horloge interne est fonctionnel avant l'âge de 5 ans. Ceci est cohérent avec les travaux sur les traitements des durées courtes chez le jeune enfant (pour une revue voir Coull & Droit Volet, 2018 ; Droit-Volet, 2016). En revanche, la composante motrice n'est pas encore mature ; les capacités de coordination fine se développent en effet jusqu'à l'âge de 10-12 ans (Getchell, 2006). Dans cette perspective, il semble logique que certaines études trouvent que le TMS des jeunes enfants est plus rapide que chez l'adulte. S'il existe un TMS universel comme le suggère par Mc Auley et al., (2006) autour de 500 ms, alors ce rythme

universel serait établi dès l'âge de 5 ans, et le TMS plus rapide des jeunes enfants en serait l'expression directe. Les adultes et les enfants plus âgés, quant à eux, peuvent facilement frapper sur une harmonique rythmique lente du TMS pour une simple raison de confort moteur. Finalement le TMS apparaît comme un compromis entre le choix d'un intervalle court générant peu de variabilité temporelle, et la capacité motrice nécessaire à la production d'une frappe rapide précise. Cette capacité de choisir l'intervalle chez l'adulte pourrait expliquer la plus grande variabilité interpersonnelle que l'on rencontre chez ces derniers (Fraisse, Chambon & Oléron, 1954). Toutefois, des études supplémentaires seront nécessaires pour trancher la question de ce que reflète réellement ce tempo moteur spontané chez l'enfant et l'adulte.

Concernant la synchronisation, comme pour le TMS, on observe peu de différences développementales lorsque les enfants doivent synchroniser leurs frappes avec un rythme externe proche de leur TMS (avec un ISI de 500 ms). A nouveau, seule la variabilité dans les ITI diminue avec l'âge et il n'y a aucune corrélation entre leur performance de synchronisation à un ISI de 500 ms et les scores aux tests neuropsychologiques, ni ceux relatifs aux fonctions cognitives, ni ceux relatifs aux fonctions motrices. Ceci confirme l'aspect automatique de la synchronisation avec un rythme externe proche du tempo moteur spontané. La variabilité des ITI se réduit même par rapport à celle observée lors du TMS. Ceci est tout à fait en accord avec le modèle de Large et Snyder (2009) qui propose que le rythme externe aide à l'harmonisation et la calibration des oscillateurs neuronaux (Nozaradan et al., 2011 ; Schachner, 2010 ; Tierney & Kraus, 2015).

En revanche, lorsque l'on demande aux enfants de ralentir le rythme pour se synchroniser à un intervalle de 700 ms ou 900 ms, on observe une amélioration avec l'âge de la précision et de la flexibilité de la synchronisation. Nos résultats montrent que cette amélioration n'est pas liée à l'amélioration des capacités cognitives mais encore à l'amélioration des capacités motrices. Les capacités motrices faciliteraient donc l'ajustement d'un rythme interne à un

rythme externe. Ceci suggère que l'entraînement des oscillateurs par des rythmes lents n'est pas efficace chez les jeunes enfants. Pour qu'un rythme externe parvienne à entraîner, modifier, assouplir un rythme interne, il faut donc qu'il reste dans une fenêtre très proche du rythme interne. Toutefois, on ne connaît pas l'étendue de cette fenêtre temporelle. Est-elle de 15%, de 30% du TMS ou plus ? Il s'agit d'une autre question à traiter. A ce propos, il serait intéressant d'examiner si un entraînement de synchronisation permet progressivement d'accroître cette fenêtre temporelle, autrement dit d'accroître la flexibilité de l'ajustement rythmique. Ceci doit bien entendu s'inscrire dans les limites des possibilités de flexibilité. Bobin-Bègue, Droit-Volet et Provasi (2014) montrent que les enfants de 5 ans ne parviennent pas à se synchroniser à des rythmes dont l'intervalle dépasse 1 à 1,5 s. L'entraînement par le rythme ne leur permet donc pas de produire des intervalles supérieurs à 1,5 s.

Concernant la phase de continuation, en l'absence du rythme externe, des différences temporelles apparaissent encore selon l'âge des enfants. Nos résultats suggèrent que ces différences seraient, cette fois, attribuables aux différences inter individuelles non pas dans les capacités motrices mais dans les capacités cognitives. En effet, comme en attestent les corrélations que nous avons observées, la phase de continuation induit une charge cognitive supplémentaire en mémoire de travail, pour le maintien de l'intervalle. Quoi qu'il en soit, la capacité à maintenir actif un nouveau tempo, au sein des oscillateurs, dépendrait essentiellement des capacités de mémoire de travail (voir aussi Grahn & Schuit, 2012). Ceci n'est guère surprenant si l'on considère les travaux qui suggèrent que seules les aires corticales tels que le cortex préfrontal ou la SMA, également impliquées dans la mémoire des durées, sont capables de maintenir ces oscillations (Buonomano & Laje, 2011). De plus, les travaux en neuropsychologie du développement montrent que la maturation du cortex cognitif est très lente, n'atteignant son apogée qu'au début de l'âge adulte (Paus, 2005). La dimension cognitive de la tâche de continuation est confirmée dans notre étude par son développement tardif. En

effet, même à l'âge de 8 ans, les enfants ne sont pas parvenus à maintenir avec précision les intervalles de 700 et 900 ms. Même s'ils y parviennent mieux qu'à l'âge de 5 ans, dès que le rythme externe est retiré, leurs ITIs se rapprochent de leur TMS (voir aussi Broadway & Engle, 2011).

Ainsi ma première étude suggère que la synchronisation avec un rythme externe régulier est relativement automatique de telle façon que les différences interindividuelles dans les performances de synchronisation sont liées davantage aux différences sur le plan des capacités motrices qu'aux différences sur le plan des capacités cognitives. La possibilité de modifier un rythme interne sous l'effet d'un rythme externe dans les tâches de synchronisation est donc essentiellement sous la dépendance du développement moteur. Cependant, dans cette première étude, et toutes celles que j'ai réalisées, je n'ai examiné que des rythmes réguliers. Notre objectif est donc à présent de réaliser d'autres études chez l'enfant avec des rythmes irréguliers. On peut supposer qu'avec de tels rythmes, on observerait davantage de différences dans les performances de synchronisation entre les enfants d'âges différents, et que ces différences seraient liées aux différences en terme de capacités cognitives notamment dans le domaine de l'attention ou de la mémoire de travail comme le laissent supposer les travaux chez l'adulte de Bailey et Penhune (2010) et aussi Chen et ses collègues (Chen, Penhune & Zatorre, 2008b). Cependant comme le suggèrent Repp et Keller (Repp & Keller, 2004 ; Madison & Merker, 2004), l'irrégularité doit être assez importante sans quoi le sujet est capable de s'ajuster automatiquement. Il faudra donc bien veiller à tester différents types d'irrégularités plus ou moins importantes.

Après cette première étude, qui a mis l'accent sur l'aspect moteur de l'activité de synchronisation et son traitement plus ou moins automatique en fonction de la tâche, nous avons examiné plus directement le rôle de l'action dans diverses tâches temporelles en faisant varier le type d'apprentissage chez des enfants de 5 ans à 8 ans et des adultes. Dans un cas, il s'agissait

d'un apprentissage sensorimoteur, où le sujet devait produire une action pour suivre le rythme ou la durée présentée visuellement. Dans l'autre cas, il s'agissait d'un apprentissage visuel où le sujet regardait simplement le rythme ou la durée. Ceci a été testé dans trois études (études 2, 3 et 4). Dans l'étude 2, les sujets devaient se synchroniser avec un rythme externe puis le reproduire. Dans l'étude 3, ils devaient également se synchroniser avec un rythme puis le discriminer parmi d'autres rythmes. Enfin, dans l'étude 4, ils devaient se synchroniser avec le rythme et reconnaître la durée de l'ISI du rythme parmi d'autres durées. Les résultats de ces trois études ont mis en évidence un effet bénéfique de l'apprentissage sensorimoteur par rapport à un apprentissage perceptif. Toutefois ces effets dépendent de l'âge des sujets et de la difficulté de la tâche.

Ainsi, en ce qui concerne l'effet bénéfique de l'apprentissage sensorimoteur sur la performance de continuation (reproduction de rythme, étude 2) (ISI 800 ms), les résultats ont montré que seuls les enfants de 5 ans tirent avantage de cet apprentissage moteur par rapport à l'apprentissage visuel simple. En effet, comme nous l'avons vu dans l'étude 1, les enfants de 5 ans ont des difficultés pour maintenir un rythme lent (800 ms). Or, dans l'étude 2 ils y sont mieux parvenus lorsqu'ils ont bénéficié de l'apprentissage sensorimoteur. Quant aux enfants de 8 ans et aux adultes, ils y sont parvenus sans avoir besoin d'action dans l'apprentissage. On pourrait finalement argumenter que le bénéfice de l'action observé chez les 5 ans se réduit à un effet d'entraînement à la tâche agissant uniquement sur la composante motrice de la reproduction rythmique. Cependant, les résultats de l'étude 3 sur la discrimination de rythmes montrent qu'il s'agit d'autre chose. En effet, dans l'étude 3, nous avons remplacé la tâche motrice de reproduction de rythme par une tâche résolument différente : une tâche perceptive de discrimination de rythme. Or, avec cette nouvelle tâche, nous avons également observé un effet bénéfique de l'action sur la performance temporelle chez les enfants de 5 ans, mais cette fois aussi chez les enfants plus âgés. Ceci montre que le bénéfice de l'action observé ne peut

pas être dû à un effet de l'entraînement à la tâche puisqu'il est toujours présent même pour cette tâche qui diffère totalement de la tâche d'apprentissage. La tâche de discrimination de rythme requiert un jugement temporel, et s'avère plus difficile à réaliser que la tâche de reproduction de rythmes. Or, les jugements temporels se sont avérés plus précis avec un apprentissage sensorimoteur. On peut alors penser que l'action aide à la représentation en mémoire de l'intervalle temporel chez le jeune enfant, et les enfants plus âgés quand la tâche est plus difficile. En revanche, à l'âge adulte, l'ajout de l'action pendant la phase d'apprentissage n'a pas d'effet sur leur performance. Lors de la tâche de discrimination de durées isolées (étude 4), les participants devaient extraire, à partir de l'apprentissage du rythme, la durée de l'ISI. Ils devaient ensuite reconnaître cette durée parmi d'autres. Les enfants âgés de 5 ans et certains enfants âgés de 8 ans n'y sont pas parvenus. Chez les enfants de 8 ans qui ont réussi la tâche, l'intervalle de référence est mieux identifié parmi les intervalles de comparaison dans le cas de l'apprentissage sensorimoteur.

Ainsi, mes premières études ont montré un effet bénéfique de l'action lors de l'apprentissage d'un intervalle temporel présent dans une séquence rythmique chez les enfants âgés de 5 et 8 ans. De plus, elles suggèrent que l'apprentissage sensorimoteur n'agit pas seulement sur la synchronisation. L'effet de l'action pendant l'apprentissage est plus général, lié au traitement temporel en lui-même, du moins pour les intervalles courts ($< 1s$). Ceci tend à être en accord avec l'idée d'un codage sensorimoteur des intervalles temporels et d'un rôle particulier de l'action dans les traitements temporels (Coull & Droit-Volet, 2018 ; Leman, 2010; Cox, 2011; Maes, Leman, Palmer & Wanderley, 2014). L'action améliore la perception temporelle lorsque la tâche n'implique pas un traitement automatique mais est plutôt contrôlée, coûteuse du point de vue cognitif. Comme le suggèrent les corrélations que nous avons observées, il semble que l'action favorise la représentation du temps et « allège » d'une certaine manière le coût cognitif en mémoire. Toutefois, les résultats des études 2, 3, et 4 ne

nous permettent pas de trancher entre l'implication directe de l'action dans l'encodage de l'intervalle, c'est-à-dire la formation de la représentation du temps, et l'implication de l'action dans les processus mnésiques de mémoire de travail. En effet, l'action peut favoriser la représentation du temps en concentrant l'attention sur la durée, mais elle peut aussi favoriser une représentation plus solide en mémoire du fait d'un encodage multi sensoriel du temps, un encodage visuel et moteur (Gray et al., 2017 ; Cowan, 2006). C'est pourquoi nous avons mené une cinquième étude pour essayer de répondre à cette question.

Dans la cinquième étude, nous avons utilisé, chez l'adulte, une tâche très proche de celle utilisée dans l'étude 2, c'est-à-dire une tâche de synchronisation-reproduction d'un rythme visuel avec un ISI de 800 ms, avec une condition d'apprentissage visuel et une condition d'apprentissage sensorimoteur. Toutefois, dans cette étude, la reproduction était différée de 30 s afin de tester le maintien en mémoire du rythme. De plus, nous avons ajouté une tâche interférente durant chacune des phases de la tâche de synchronisation, soit durant l'encodage du rythme, soit durant la phase de maintien en mémoire, soit durant la phase de reproduction du rythme.

Tout d'abord, cette étude nous a permis de mettre en évidence un effet bénéfique de l'apprentissage sensorimoteur dans la tâche de reproduction de rythme chez l'adulte. En effet, quelle que soit la condition, les sujets adultes ont été plus précis pour reproduire l'intervalle quand ils ont bénéficié de l'apprentissage sensorimoteur. Ceci confirme que l'action peut aussi améliorer les performances temporelles des adultes en reproduction de rythme, dans la mesure où la tâche est relativement difficile comme lorsque la reproduction est différée de 30 s. En effet, la reproduction rythmique est moins précise en reproduction différée de rythme qu'en reproduction immédiate (Monier & Droit-Volet, 2016 ; Monier, Droit-Volet & Coull, 2019). La moyenne des ITI produits en reproduction différée est en fait plus proche de 650 ms que de 800 ms, ce qui témoigne d'une difficulté pour l'adulte à garder actif le tempo en mémoire de

travail durant 30 s. Ceci est surprenant si on considère qu'une durée apprise peut être mémorisée pendant plusieurs heures (Rattat & Droit-Volet, 2005). Lorsque l'on examine l'effet de la tâche interférente, on s'aperçoit qu'elle n'affecte pas le rythme lorsqu'elle est délivrée pendant la phase de rétention en mémoire. Elle affecte seulement la performance quand elle est présentée en même temps que le rythme, que le sujet tape ou regarde simplement la séquence rythmique. Ainsi la tâche interférente affecte le traitement du rythme aussi bien lors de l'encodage, quand le sujet doit se synchroniser au stimulus rythmique visuel que lors de la reproduction du rythme. Ceci se traduit alors par une accélération des frappes des sujets durant la phase de reproduction du rythme avec des ITI plus courts. Aucune différence due aux effets d'interférence n'est toutefois observée entre ces deux phases. Ainsi, la tâche interférente a engendré une légère distorsion dans la représentation de l'intervalle en accord avec l'effet attendu dans le cas d'un traitement temporel en double tâche (Macar, Grondin & Casini, 1994 ; Casini & Macar, 1997). Il est difficile de savoir si la tâche interférente a produit une sous-estimation temporelle due à cette situation de double tâche ou a simplement accéléré la réponse motrice en ajoutant une action verbale (la dénomination de la couleur dans la tâche interférente). Cependant, que la tâche interférente soit présente ou non, et quelle que soit la phase où elle est présentée, l'apprentissage moteur améliore toujours la performance par rapport à l'apprentissage visuel. Son effet ne varie pas selon l'emplacement de la tâche interférente. Comme il n'y a pas d'interaction significative entre le moment d'interférence et le type d'apprentissage, on peut penser que cette amélioration de la performance par l'action est générale, agissant aussi bien au niveau de l'encodage du rythme, de son maintien et de sa reproduction. Toutefois, il faudrait réaliser d'autres études avec d'autres tâches interférentes pour pouvoir conclure en faveur d'un effet de l'action sur les performances rythmiques globales, d'un effet de l'action au niveau de l'encodage du rythme ou d'un effet sur un autre processus que nous n'aurions pas testé dans cette étude. De plus, le fait que la tâche interférente que nous avons utilisée ait finalement

produit peu d'effets sur les processus de maintien en mémoire du rythme conforte l'idée d'un maintien automatique des intervalles-inter-frappes conformément avec la notion d'oscillateurs neuronaux capables de maintenir un rythme sans forcément que l'on soit obligé de recourir à une représentation consciente des ITI. Comme nous l'avons déjà suggéré, il faut d'abord tester d'autres tâches interférentes. Néanmoins, la chute de la performance rythmique quand la reproduction du rythme est différée corrobore l'idée d'un processus relativement court, qui s'efface rapidement de la mémoire de travail. Un tel fonctionnement pourrait expliquer le résultat de l'étude 4, notamment les difficultés des sujets à transférer leur connaissance de l'intervalle, d'une tâche rythmique à une tâche de durée même si celles-ci étaient de même valeur temporelle. Un traitement cognitif supplémentaire serait alors nécessaire pour isoler l'intervalle constitutif d'un rythme, en faire une durée indépendante de son ensemble.

Durées et rythmes font partie du même champ d'étude. Les modèles suggèrent des mécanismes communs à leur traitement. Ils évoquent une même horloge interne qu'il s'agisse d'intervalles temporels intégrés dans une séquence rythmique ou de durées allant de quelques centaines de millisecondes à plusieurs secondes (Merchant et al., 2008 ; Buonomano & Laje, 2010). Il faudrait d'autres études pour examiner la capacité des sujets à isoler des durées à partir de séquences rythmiques avec des rythmes réguliers ou irréguliers. J'ai tendance à penser qu'il existe bien des différences de traitement selon qu'il s'agit de rythmes ou de durées comme le suggèrent de nombreux travaux (Grube et al., 2010 ; Lewis & Miall, 2003a, 2003b, 2003c ; Teki et al., 2011 ; Pashler, 2001). Toutefois, il me semble que la différence principale entre le traitement des durées et des rythmes réside dans la nature de la représentation créée à partir du codage temporel. La présentation d'une durée aurait plutôt tendance à induire une représentation « cognitive », parce qu'elle est nécessaire à la compréhension des caractéristiques temporelles de notre environnement. En revanche, la présentation d'intervalles répétés, de rythmes, serait plus pertinente pour l'action, entraînant les oscillateurs pour la

synchronisation des mouvements. Le rythme aurait alors tendance à induire une représentation dite motrice ou sensorimotrice. D'autres études sont nécessaires pour essayer de valider cette hypothèse théorique d'une représentation sensorimotrice ou cognitive des durées selon le contexte dans lequel elles sont interprétées, rythmique ou non.

C'est dans cette perspective que nous avons une sixième étude portant sur le rôle de l'action dans une tâche d'apprentissage et de jugement de durée. Dans cette sixième étude, nous avons donc comparé l'effet sur la performance de discrimination de durées d'un apprentissage sensorimoteur et d'un apprentissage visuel de la durée. Dans cette étude, la durée était présentée sous la forme d'un cercle en construction. Les sujets (des adultes et des enfants de 5 ans) devaient suivre du doigt (apprentissage sensorimoteur) le cercle, ou simplement le regarder (apprentissage visuel). Malheureusement, la procédure mise au point n'a pas donné de résultats significatifs. En effet, les adultes ont discriminé les durées dans les deux conditions, avec ou sans action lors de l'apprentissage. Quant aux enfants, ils n'ont tout simplement pas réussi la tâche. Ils ont répondu de façon aléatoire quel que soit le type d'apprentissage. Leur performance était particulièrement mauvaise, bien moins bonne que celle habituellement observée en tâche de discrimination de durées (ex. Droit-Volet, Clément & Wearden, 2001; Mc Cormack et al., 1999). Ainsi, il semble que notre tâche motrice se soit avérée trop difficile à réaliser pour les enfants. Une explication possible est que nous avons ajouté une action (la poursuite motrice) à une perception visuelle. Les enfants se sont alors retrouvés en situation de double tâche. L'action a alors perturbé plutôt que facilité l'encodage de la durée. On pourrait toutefois se demander pourquoi l'action n'a pas agi comme une double tâche dans le cas de la tâche de synchronisation. En effet, dans nos études sur la synchronisation nous avons ajouté une action à la perception d'un rythme. Cependant dans nos études de synchronisation, la réponse demandée consistait en une reproduction motrice du rythme perçu. L'action était donc « redemandée » dans la phase de reproduction. Il est donc possible que la similarité des

contextes entre la phase d'apprentissage et celle de reproduction ait participé à l'amélioration des performances temporelles. Pour tester ceci dans notre tâche de jugement des durées, il faudrait demander aux sujets non pas de juger les durées du mouvement du cercle, mais de reproduire ce mouvement. Néanmoins, dans les études 3 et 4 sur la synchronisation, les sujets ne devaient pas reproduire le rythme mais discriminer le rythme présenté visuellement parmi d'autres rythmes. Or, dans cette étude, même si les performances sont bonnes, on observe toujours un effet de la condition d'apprentissage avec de meilleures performances en condition d'apprentissage sensorimoteur qu'en condition d'apprentissage visuel. Finalement, on peut penser que, dans le cas de la perception des séquences rythmiques, l'action ne constitue jamais une seconde tâche mais amène par elle-même la représentation du rythme. La question est donc : en est-il de même pour les durées isolées ? Bien que l'on ait soulevé cette question, en décidant d'étudier le rythme plus que la durée, nos résultats ne nous permettent pas d'y répondre. D'autres études portant sur le jugement des durées sont donc nécessaires. Toutefois, il est parfaitement envisageable que les résultats de notre sixième étude révèlent que l'action est tout simplement moins pertinente pour l'apprentissage de la durée que pour l'apprentissage du rythme, en particulier pour les durées allant au-delà de 1 s, comme celles que nous avons choisies dans notre étude 6. Il sera donc nécessaire de tester d'autres tâches de jugement de durées notamment une tâche plus comparable à celle utilisée par Droit-Volet et Rattat (1999), qui ont demandé aux sujets de reproduire une durée d'appui, c'est-à-dire une tâche dans laquelle la durée fait partie intégrante de l'action et non une tâche visuelle à laquelle l'action vient s'ajouter.

Pour terminer ce travail portant essentiellement sur la synchronisation, nous avons décidé d'examiner l'effet des émotions sur les rythmes moteurs. Pour ce faire, dans notre étude 7, nous avons demandé à des enfants âgés de 3, 5 et 8 ans et des adultes de produire un rythme moteur en présence d'images émotionnelles lors d'une tâche de TMS et de synchronisation-

continuation avec un rythme auditif (ISI de 500 et 700 ms). Les résultats de cette étude ont permis de répliquer ceux des études 1 et 2. Nous avons en effet observé que les jeunes enfants sont plus variables dans leurs intervalles inter-frappes et parviennent difficilement à se synchroniser à un ISI lent (700 ms). La flexibilité de l'activité rythmique est donc moins élevée chez les jeunes enfants. Toutefois, dans cette étude, comme dans les autres, nous n'avons pas analysé le décalage de phase entre les ITI des participants et le rythme externe afin d'examiner si les frappes étaient anticipées ou posticipées par rapport au rythme externe. En effet, nous avons considéré que des ITI systématiquement plus courts que l'ISI étaient révélateurs d'anticipation. Toutefois, dans nos prochaines études, il serait intéressant d'entreprendre ces analyses complexes, surtout si nous utilisons des rythmes irréguliers. Ces analyses plus détaillées nous permettraient peut-être alors de mettre en évidence des différences de performance chez les adultes que nous n'avons pas observées en fonction de leur profil cognitif et moteur.

Ceci dit, l'intérêt majeur de notre dernière étude porte sur l'effet des émotions sur l'activité de synchronisation. En effet, nos résultats nous ont permis de mettre en évidence une accélération systématique du rythme des frappes en présence d'images générant une émotion de peur. Cette accélération est apparue aussi bien pendant la phase de TMS que pendant les phases de synchronisation ou de continuation, et ceci quel que soit l'âge des sujets. Les émotions négatives, faiblement activatrices (« low arousing ») en l'occurrence l'émotion de tristesse, n'ont pas généré de distorsion. Nos résultats chez le jeune enfant nous permettent donc de dire que les distorsions émotionnelles des activités rythmiques observés chez l'adulte (Droit-Volet & Provasi, 2014) sont très précoces, du moins elles apparaissent dès l'âge de 5 ans. On retrouve donc pour l'activité rythmique les mêmes distorsions émotionnelles que celles observées pour le jugement des durées (Droit-Volet & Meck, 2007 ; Droit-Volet, Fayolle, Lamotte & Gil, 2013). Les études sur le jugement des durées expliquent ces distorsions par une

accélération du rythme de « l'horloge interne » sous l'effet des émotions de valence négative fortement activatrices sur le plan physiologique. Dans cette perspective, on peut suggérer que l'accélération de la frappe dans une tâche de synchronisation temporelle est due aux émotions fortement activatrices qui agissent sur la composante temporelle de l'activité rythmique (« horloge interne ») en augmentant sa vitesse de fonctionnement, et ceci quelles que soient les capacités de coordination motrice du sujet. Le fait que le rythme externe en tant que tel (la valeur de l'ISI) ne permet pas aux participants de contrôler le rythme de la frappe dans un contexte émotionnel confirme l'aspect automatique de l'activité rythmique dans des tâches de synchronisation, avec du moins des rythmes réguliers. Cependant dans l'étude de Droit-Volet et Provasi (2014), les participants accélèrent leur rythme de frappe dans le cas du TMS et de la continuation, mais pas dans la phase de synchronisation en présence du rythme externe, alors que nous observons cette accélération dans cette phase chez le jeune enfant. Toutefois ces chercheurs n'ont pas utilisé une image émotionnelle en fond d'écran, mais des stimuli émotionnels ponctuels auxquels les sujets devaient se synchroniser. De plus, ces stimuli étaient particuliers dans la mesure où il s'agissait d'expressions faciales émotionnelles et non d'images IAPS comme dans notre étude. Or, parmi les stimuli émotionnels, les expressions faciales émotionnelles ont un statut particulier (Kaiser, Wehrle, Schenkel, 2009 ; Rosenberg & Ekman 1995). En effet, il s'agit de stimuli émotionnels sociaux, particulièrement significatifs pour nous. Depuis l'enfance, nous sommes continuellement confrontés aux expressions faciales émotionnelles, celles de nos parents, de nos frères et sœurs... En situation de communication, nous imitons, simulons, les expressions faciales d'autrui, pour mieux les comprendre à travers notre propre ressenti (Niedenthal et al., 2006 ; Oberman et al., 2007). On peut par exemple ressentir l'émotion de peur en imitant la peur exprimée par l'autre. Cependant, lorsque l'émotion d'autrui est trop forte, nous pouvons éviter la contagion émotionnelle en inhibant cette simulation. Un contrôle conscient des émotions dans un contexte social (Denis et al.,

2009 ; Denham, 2007 ; Denham et al., 2003, 2012) peut donc atténuer les effets de la perception des expressions faciales émotionnelles sur l'activité rythmique. Lamotte, Izaute et Droit-Volet (2012) ont montré comment la connaissance d'une situation permet de façon rétroactive de contrôler les effets automatiques des stimuli émotionnels sur la perception des durées en réduisant notamment les distorsions temporelles. Toutefois, Lamotte et al., (2012) ont utilisé comme expression faciale celle de la colère et non celle de la peur. Il est donc aussi possible que le sujet l'ait perçu comme un feedback négatif l'incitant à essayer de mieux s'ajuster au rythme. Dans ce cas précis, on comprend l'importance des analyses plus détaillées du rythme, de l'aspect anticipé ou posticipé des frappes et de la valeur du décalage de phase par rapport au rythme externe. Ces résultats sont en accord avec ceux d'une autre étude que nous avons réalisée chez le jeune enfant, mais que n'avons pas présentée dans ce travail de thèse. Dans cette étude, nous n'avons pas observé d'effet des expressions faciales émotionnelles sur l'activité rythmique des jeunes enfants (3-5 ans) dans une tâche de synchronisation (Monier & Droit-Volet, non publié). Ainsi, avant de tirer des conclusions sur cette absence d'effet et de pouvoir réellement en discuter, nous devons répliquer nos résultats afin d'établir la réelle absence d'effet des expressions faciales émotionnelles sur l'activité de synchronisation des jeunes enfants. Si celle-ci est avérée, il est envisageable que l'ajustement temporel des jeunes enfants soit meilleur en présence qu'en l'absence d'expressions faciales. Il faudrait donc dans notre prochaine étude comparer l'activité de synchronisation avec un stimulus représentant une expression faciale même neutre à celle avec un autre stimulus. Dans le cas où l'on vérifierait l'absence d'effet des expressions faciales sur l'activité de synchronisation des enfants, on pourrait alors suggérer que l'influence des expressions faciales diffère selon la tâche temporelle. Ceci révélerait alors une fonction bien spécifique de l'activité de synchronisation dans un contexte social. Mais arrêtons ici nos extrapolations sur des résultats que nous n'avons pas et agissons par l'expérimentation !

En conclusion, dans mon travail de thèse, avec pour l'essentiel des tâches de synchronisation temporelle, nous avons tenté d'élucider le rôle de l'action dans l'amélioration des conduites temporelles et ses variations au cours du développement des enfants variant du point de vue de leurs compétences motrices et cognitives. Conformément au modèle de Wing et Kristofferson (1973), nous avons mis en évidence l'importance de la composante motrice de l'activité rythmique de synchronisation. Cette composante motrice est à l'origine des variations avec l'âge des conduites de synchronisation temporelle, du moins dans le cas d'un rythme régulier. Il faut en effet maintenant tester le développement des activités de synchronisation dans le cas de rythmes irréguliers. Pour ces derniers, on peut parfaitement envisager un rôle plus important de la composante temporelle ou cognitive, du moins tout dépend des rythmes utilisés et si un ajustement automatique est possible ou non (Repp & Keller, 2004). Nous avons également mis en évidence une composante temporelle de l'activité rythmique qui présente les mêmes propriétés que celles observées dans le traitement des durées, comme la propriété du temps scalaire et les distorsions automatiques sous l'effet des émotions. Cependant, nous sommes allées plus loin dans la mesure où les résultats de nos différentes études suggèrent que la motricité n'est pas seulement impliquée dans la composante motrice de la synchronisation. Elle est aussi impliquée dans la composante temporelle de la synchronisation et donc dans les traitements des intervalles, tout du moins pour les intervalles courts, inférieurs à une seconde. Nos travaux suggèrent que, pendant l'apprentissage, l'action aide à construire une représentation des intervalles temporels. Ceci est totalement en accord avec les résultats d'imagerie (Coull, Cheng & Meck, 2011 ; voir aussi Wiener, Turkeltaub & Coslett, 2010) qui montrent de façon systématique l'activation des aires motrices, de la SMA dans le traitement des intervalles courts. De plus, l'originalité de nos études est de montrer que plus les participants sont jeunes et inexpérimentés, plus ils tirent bénéfice de l'action. Les adultes tirent aussi bénéfice de l'action, mais uniquement pour les tâches les plus difficiles à réaliser. Ceci

est tout à fait en accord avec notre hypothèse de départ selon laquelle le traitement du temps prendrait sa source dans la régulation temporelle de l'action. C'est à travers les temps agis, que le jeune enfant ferait l'expérience de durer et de la durée. Ainsi, à partir de cette expérience de la durée de ses actions, il pourrait progressivement prendre conscience du temps. Emergerait alors un temps représenté, explicite, retraduit sur le plan verbal (McCormack & Hoerl, 2017 ; Tartas, 2008, 2010). Tant que la notion de temps n'est pas bien établie, l'enfant aurait donc toujours besoin de l'action pour faire l'expérience du temps à travers elle (Droit, 1995). Toutefois, il faudrait faire d'autres études sur le rôle de l'action dans l'amélioration des conduites de jugements temporels. De façon assez simple, voire simpliste, nous avons par exemple demandé aux sujets de suivre du doigt un stimulus temporel visuel ; nous avons donc ajouté de l'action à la perception du temps. Cette action a bien amélioré les performances temporelles mais seulement dans le cas de l'activité de synchronisation et non réellement dans le cas du jugement des durées. Il faut donc maintenant plutôt étudier des durées d'action en tant que telle sans stimulus visuel. On ne peut pas en effet exclure que ce soit la multitude des modalités sensorielles qui améliorent l'appréhension du temps et non l'apprentissage de l'action. Il faudrait donc maintenant dissocier l'effet lié à l'ajout d'une modalité sensorielle de l'effet lié à l'ajout de la motricité. On pourrait par exemple comparer les performances avec une ou plusieurs modalités sensorielles. On peut aussi envisager que l'action lors de la phase d'apprentissage joue un rôle général de focalisation de l'attention sur le rythme. Quoi qu'il en soit notre travail de thèse ouvre un nouveau champ de recherche sur le temps agi et son développement que je vais maintenant m'atteler à défricher.

Un autre sujet, qui me tient à cœur en tant que psychologue clinicienne, est l'étude des activités rythmiques chez l'enfant dans le cas de troubles du développement. Des études ont été menées chez l'adulte notamment dans le cas de la maladie de Parkinson (Dalla Bella, Benoit, Farrugia, Schwartz, Kötz, 2015) mais assez peu chez l'enfant. Je serais intéressée pour aborder

cette question, notamment chez des enfants souffrant de dyspraxie (De Castelneau et al., 2007; Albaret & Chaix, 2012). On pourrait alors envisager des thérapies portant sur la synchronisation où la musique permettrait d'entraîner les enfants et d'améliorer leurs capacités de synchronisation (Bailey & Penhune, 2010 ; Thompson et al., 2015). On pourrait également étudier cette synchronisation dans différents contextes, en particulier des contextes sociaux en présence d'un pair ou d'un adulte et examiner la capacité des enfants à se synchroniser à l'autre et à répondre à ses demandes au moment opportun. En effet, cette capacité de synchronisation, jusque-là assez peu étudiée, pourrait être impliquée dans la compétence sociale, l'harmonie avec l'autre, le bien-être social.

REFERENCES

- [1] Abecasis, D., Brochard, R., Granot, R., & Drake, C. (2005). Differential brain response to metrical accents in isochronous auditory sequences. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 22, 3, 549-562.
- [2] Agostino, P. V., Cheng, R. K., Williams, C. L., West, A. E., & Meck, W. H. (2013). Acquisition of response thresholds for timed performance is regulated by a calcium-responsive transcription factor, CaRF. *Genes, Brain and Behavior*, 12, 6, 633-644.
- [3] Albaret, J. M., & Chaix, Y. (2012). Trouble de l'acquisition de la coordination: bases neurobiologiques et aspects neurophysiologiques. *Clinical Neurophysiology*, 42, 1-2, 11-17.
- [4] Allan, L. G. (1979). The perception of time. *Perception & Psychophysics*, 26, 340-354.
- [5] Allan, L. G., & Gerhardt, K. (2001). Temporal bisection with trials referents. *Perception and Psychophysics*, 63, 524-540.
- [6] Allan, L. G., & Gibbon, J. (1991). Humans bisection at the geometric mean. *Learning and Motivation*, 22, 39-58.
- [7] Allman, M. J., Teki, S., Griffiths, T. D., & Meck, W. H. (2014). Properties of the internal clock: first-and second-order principles of subjective time. *Annual Review of Psychology*, 65, 743-771.
- [8] Annett, M. (1992). Five tests of hand skill. *Cortex*, 28, 583-600.
- [9] Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-422.
- [10] Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. Bower (Ed.), *The Psychology of Learning and Motivation*, 8, 47-90. New York: Academic Press.
- [11] Balsam, P. D., Drew, M. R., & Gallistel, C. R. (2010). Time and associative learning. *Comparative Cognition & Behavior Reviews*, 5, 1-22.

- [12] Bailey, J. A., & Penhune, V. B. (2010). Rhythm synchronization performance and auditory working memory in early- and late-trained musicians. *Experimental Brain Research*, 204, 91-101.
- [13] Baker, S. N. (2007). Oscillatory interactions between sensorimotor cortex and the periphery. *Current Opinion in Neurobiology*, 17, 649-655.
- [14] Barnes, R., & Jones, M. R. (2000). Expectancy, attention, and time. *Cognitive Psychology*, 41, 3, 254-311.
- [15] Barsalou, L. W. (2009). Simulation, situated conceptualization, and prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364, 1521, 1281-1289.
- [16] Bartolo, R., Prado, L., & Merchant, H. (2014). Information processing in the primate basal ganglia during sensory-guided and internally driven rhythmic tapping. *Journal of Neuroscience*, 34, 3910-3923.
- [17] Bausenhardt, K. M., Bratzke, D., & Ulrich, R. (2016) Formation and representation of temporal reference information. *Current Opinion in Behavioral Science*, 8, 46-52.
- [18] Bell, C. R. (1965). Time estimation and increases in body temperature. *Journal of Experimental Psychology*, 70, 2, 232-234
- [19] Bergeson, T. R., & Trehub, S. E. (2006). Infants perception of rhythmic patterns. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 23, 4, 345-360.
- [20] Bergson, H. (1968). *Durée et simultanéité*. Presses universitaires de France.
- [21] Bernieri, F. J., Reznick, J. S., & Rosenthal, R. (1988). Synchrony, pseudosynchrony, and dissynchrony: Measuring the entrainment process in mother-infant interactions. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54, 2, 243.

- [22] Bertelson, P., & Aschersleben, G. (2003). Temporal ventriloquism: Crossmodal interaction on the time dimension: 1. Evidence from auditory–visual temporal order judgment. *International Journal of Psychophysiology*, 50, 147–155.
- [23] Block, R. A., Hancock, P. A., & Zakay, D. (2010). How cognitive load affects duration judgments: A meta-analytic review. *Acta Psychologica*, 134, 3, 330-343.
- [24] Bobin-Bègue, A., & Provasi, J. (2005). Tempo discrimination in 3-and 4-year-old children: Performances and threshold. *Current Psychology Letters, Behaviour, Brain & Cognition*, 16, 2.
- [25] Bobin-Bègue, A., Droit-Volet, S., & Provasi, J. (2014). Young children’s difficulties in switching from rhythm production to temporal interval production (> 1 s). *Frontiers in Psychology*, 5, 1346.
- [26] Bobin-Bègue, A., Provasi, J., Marks, A., & Pouthas, V. (2006). Influence of auditory tempo on the endogenous rhythm of non-nutritive sucking. *European Review of Applied Psychology*, 56, 4, 239-245.
- [27] Brannon, E. M., Libertus, M. E., Meck, W. H., & Woldorff, M. G. (2008). Electrophysiological measures of time processing in infant and adult brains: Weber's Law holds. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 2, 193-203.
- [28] Brannon, E. M., Suanda, S., & Libertus, K. (2007). Temporal discrimination increases in precision over development and parallels the development of numerosity discrimination. *Developmental Science*, 10, 6, 770-777.
- [29] Brazelton, T. B., Koslowski, B., & Main, M. (1974). The origins of reciprocity: The early mother-infant interaction. In M. Lewis & L. A. Rosenblum, *The effect of the infant on its caregiver*. Oxford, England: Wiley-Interscience.

- [30] Breska, A., & Deouell, L. Y. (2014). Automatic bias of temporal expectations following temporally regular input independently of high-level temporal expectation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26, 1555–1571.
- [31] Breska, A., & Deouell, L. Y. (2017). Neural mechanisms of rhythm-based temporal prediction: Delta phase-locking reflects temporal predictability but not rhythmic entrainment. *Plos Biology*, 15, 2, e2001665.
- [32] Broadway, J. M., & Engle, R.W. (2011). Lapsed attention to elapsed time? Individual differences in working memory capacity and temporal reproduction. *Acta Psychologica*, 137, 115-126, 15.
- [33] Brown, S. W. (1997). Attentional resources in timing: interference effects in concurrent temporal and non temporal working memory tasks. *Perception and Psychophysics*, 59, 1118-1140.
- [34] Brown, S. W. (2010). *Timing, resources, and interference: attentional modulation of time perception*. In Attention and Time. Edited by Nobre KC, Coull JT. New York: Oxford University Press, 107-121.
- [35] Brown, S. W., Collier, S. A., & Night, J. C. (2013). Timing and executive resources: dual-task interference patterns between temporal production and shifting, updating, and inhibition tasks. *Journal of Experimental Psychology and Human Perception Performance*, 39, 947-963, 10.
- [36] Brown, S., Martinez, M. J., & Parsons, L. M. (2006). The neural basis of human dance. *Cerebral Cortex*, 16, 1157-1167.
- [37] Brown, S., Newcomb, D., & Kahrl, K. (1995). Temporal-signal detection and individual differences in timing. *Perception*, 24, 525–538
- [38] Buetti, D. (2011). The sensory representation of time. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 5, 34.

- [40] Buetti, D., Bahrami, B., & Walsh, V. (2008). Sensory and association cortex in time perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 1054-1062.
- [41] Buetti, D., & Walsh, V. (2009). The parietal cortex and the representation of time, space, number and other magnitudes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364, 1525, 1831-1840.
- [42] Buhusi, C. V., Aziz, D., Winslow, D., Carter, R. E., Swearingen, J. E., & Buhusi, M. C. (2009). Interval timing accuracy and scalar timing in C57BL/6 mice. *Behavioral Neuroscience*, 123, 5, 1102.
- [43] Buhusi, C. V., & Meck, W. H. (2002). Differential effects of methamphetamine and haloperidol on the control of an internal clock. *Behavioral Neuroscience*, 116, 2, 291.
- [44] Buhusi, C. V., & Meck, W. H. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature Review of Neuroscience*, 6, 755-76.
- [45] Buhusi, C. V., & Meck, W. H. (2006). Time sharing in rats: A peak-interval procedure with gaps and distracters. *Behavioural Processes*, 71, 2-3, 107-115.
- [46] Buhusi, C. V., Reyes, M. B., Gathers, C. A., Oprisan, S. A., & Buhusi, M. (2018). Inactivation of the medial-prefrontal cortex impairs interval timing precision, but not timing accuracy or scalar timing in a peak-interval procedure in rats. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 12.
- [47] Buonomano, D. V., & Karmarkar, U. R. (2002). Book Review: How Do We Tell Time? *The Neuroscientist*, 8, 1, 42-51.
- [48] Buonomano, D. V., & Laje, R. (2010). Population Clocks: Motor Timing with Neural Dynamics. *Trends in Cognitive Science*, 14, 520-527.
- [49] Buonomano, D. V., & Maass, W. (2009). State-dependent computations: spatiotemporal processing in cortical networks. *Nature Review of Neuroscience*, 10, 113-125.

- [50] Buonomano, D. V., & Merzenich, M. M. (1995). Temporal information transformed into a spatial code by a neural network with realistic properties. *Science*, 267, 1028-1030.
- [51] Burle, B., & Casini, L. (2001). Dissociation between activation and attention effects in time estimation: implications for internal clock models. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 1, 195.
- [52] Burr, D., Tozzi, A., & Morrone, M. C. (2007). Neural mechanisms for timing visual events are spatially selective in real-world coordinates. *Nature Neuroscience*, 10, 4, 423.
- [53] Buschman, T. J., & Miller, E. K. (2007). Top-down versus bottom-up control of attention in the prefrontal and posterior parietal cortices. *Science*, 315, 1860-1862.
- [54] Butler, B. E., & Trainor, L. J. (2015). The musician redefined: A behavioral assessment of rhythm perception in professional club DJs. *Timing & Time Perception*, 3, 116–132.
- [55] Casini, L., & Macar, F. (1997). Effects of attention manipulation on judgments of duration and of intensity in the visual modality. *Memory & Cognition*, 25, 6, 812-818.
- [56] Casini, L., & Macar, F. (1999). Multiple approaches to investigate the existence of an internal clock using attentional resources. *Behavioural Processes*, 45, 73-85.
- [57] Casini, L., Pech-Georgel, C., & Ziegler, J. C. (2018). It's about time: revisiting temporal processing deficits in dyslexia. *Developmental Science*, 21, 2, 12530.
- [58] Cassenti, D. N. (2011). The intrinsic link between motor behavior and temporal cognition. *New Ideas in Psychology*, 29, 2, 72–79.
- [59] Chapin, H. L., Zanto, T., Jantzen, K. J., Kelso, S. J., Steinberg, F., & Large, E. W., (2010). Neural responses to complex auditory rhythms: the role of attending. *Frontiers in Psychology*, 1, 224.
- [60] Chemin, B., Mouraux, A., & Nozaradan, S. (2014). Body movement selectively shapes the neural representation of musical rhythms. *Psychological Science*, 25, 12, 2147-2159.

- [61] Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008a). Listening to musical rhythms recruits motor regions of the brain. *Cerebral Cortex*, 18, 12, 2844-2854.
- [62] Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008b). Moving on time: brain network for auditory-motor synchronization is modulated by rhythm complexity and musical training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 226-239.
- [63] Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2009). The role of auditory and premotor cortex in sensorimotor transformations. *Annals of New York Academy of Science*, 1169, 15-34.
- [64] Cheng, R. K., Tipples, J., Narayanan, N. S., & Meck, W. H. (2016). Clock speed as a window into dopaminergic control of emotion and time perception. *Timing and Time Perception*, 4, 1, 9-122
- [65] Church, R. M., & Broadbent, H. A. (1990). Alternative representations of time, number, and rate. *Cognition*, 37, 1-2, 55-81.
- [66] Church, R. M., Meck, W. H., & Gibbon, J. (1994). Application of scalar timing theory to individual trials. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 20, 2, 135.
- [67] Cirelli, L. K., Bosnyak, D., Manning, F. C., Spinelli, C., Marie, C., Fujioka, T., ... & Trainor, L. J. (2014). Beat-induced fluctuations in auditory cortical beta-band activity: using EEG to measure age-related changes. *Frontiers in Psychology*, 5, 742.
- [68] Cleeremans, A., & Jiménez, L. (2002). Implicit learning and consciousness: A graded, dynamic perspective. In R. M. French & A. Cleeremans (Eds.), *Implicit learning and consciousness* (pp. 1–40). Hove, UK: Psychology Press.
- [69] Clifton, R. K. (1974). Heart rate conditioning in the newborn infant. *Journal of Experimental Child Psychology*, 18, 1, 9-21.

- [70] Cohen, M. (1997). Children's memory scale (CMS). *San Antonio: The Psychological Corporation.*
- [71] Colombo, J., & Richman, W. A. (2002). Infant timekeeping: Attention and temporal estimation in 4-month-olds. *Psychological Science, 13, 5, 475-479.*
- [72] Comstock, D. C., Hove, M. J., & Balasubramaniam, R. (2018) Sensorimotor Synchronization with Auditory and Visual Modalities: Behavioral and Neural Differences. *Frontiers in Computational Neuroscience, 12, 53.*
- [73] Coull, J. T. (2014). Getting the timing right: experimental protocols for investigating time with functional neuroimaging and psychopharmacology. In *Neurobiology of Interval Timing* (pp. 237-264). Springer, New York, NY.
- [74] Coull, J. T. (2004). fMRI studies of temporal attention: Allocating attention within, or towards, time. *Cognitive Brain Research, 21, 216-226.*
- [75] Coull, J. T., Charras, P., Donadieu, M., Droit-Volet, S., & Vidal, F. (2015). SMA selectively codes the active accumulation of temporal, not spatial, magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience, 27, 11, 2281-2298.*
- [76] Coull, J. T., Cheng, R. K., & Meck, W. H. (2011). Neuroanatomical and neurochemical substrates of timing. *Neuropsychopharmacology, 36, 1, 3.*
- [77] Coull, J. T., Davranche, K., Nazarian, B., & Vidal, F. (2013). Functional anatomy of timing differs for production versus prediction of time intervals. *Neuropsychologia, 51, 309-319.*
- [78] Coull, J. T., & Droit-Volet, S. (2018). Explicit understanding of duration develops implicitly through action. *Trends in Cognitive Sciences, 22, 10, 923-937.*
- [79] Coull, J. T., Hwang, H. J., Leyton, M., & Dagher, A. (2012). Dopamine precursor depletion impairs timing in healthy volunteers by attenuating activity in putamen and supplementary motor area. *Journal of Neuroscience, 32, 47, 16704-16715.*

- [80] Coull, J. T., Nazarian, B., & Vidal, F. (2008). Timing, storage, and comparison of stimulus duration engage discrete anatomical components of a perceptual timing network. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 2185-2197.
- [81] Coull, J. T., & Nobre, A. C. (2008). Dissociating explicit timing from temporal expectation with fMRI. *Current Opinion in Neurobiology*, 18, 2, 137-144.
- [82] Coull, J. T., Vidal, F., & Burle, B. (2016). When to act, or not to act: That's the SMA's question. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 14-21.
- [83] Cowan, N. (2016). Working Memory Maturation: Can We Get at the Essence of Cognitive Growth? Association for psychological science. *Perspectives on Psychological Science*, 11, 239-264.
- [84] Cox, A. (2011). Embodying music: Principles of the mimetic hypothesis. *Music Theory Online*, 17, 2.
- [85] Cravo, A. M., Rohenkohl, G., Wyart, V., & Nobre, A. C. (2011). Endogenous modulation of low frequency oscillations by temporal expectations. *Journal of Neurophysiology*, 106, 2964-2972.
- [86] Cutanda, D., Correa, Á., & Sanabria, D. (2015). Auditory temporal preparation induced by rhythmic cues during concurrent auditory working memory tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 41, 790–797.
- [87] Darcheville, J. C., Riviere, V., & Wearden, J. H. (1993). Fixed-interval performance and self-control in infants. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 60, 2, 239-254.
- [88] Dalla Bella, S., Benoit, C. E., Farrugia, N., Schwartz, & M., Kotz, S.A. (2015). Effects of musically cued gait training in Parkinson's disease: beyond a motor benefit. *Annals of New York Academy of Science*, 1337, 77-85.

- [89] Dallal, N. L., & Meck, W.H. (1993). Depletion of dopamine in the caudate nucleus but not destruction of vestibular inputs impairs short-interval timing in rats. *Abstracts-Society for Neuroscience*, 19, 15-83.
- [90] Castelnaud, P., Albaret, J. M., Chaix, Y., & Zanone, P. G. (2007). Developmental coordination disorder pertains to a deficit in perceptuo-motor synchronization independent of attentional capacities. *Human Movement Science*, 26, 3, 477-490.
- [91] De Hevia, M. D., Izard, V., Coubart, A., Spelke, E. S., & Streri, A. (2014). Representations of space, time, and number in neonates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 13, 4809-4813.
- [92] Delevoye-Turrell, Y., Dione, M., & Agneray, G. (2014). Spontaneous motor tempo is the easiest pace to act upon for both the emergent and the predictive timing modes. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 126, 121-122.
- [93] Delevoye-Turrell, Y., & Wing, A. M. (2004). Action and motor skills: adaptive behavior for intended goals. *Handbook of Cognition*, 130-157.
- [94] Delgado, M., & Droit-Volet, S. (2007). Testing the representation of time in reference memory in the bisection and the generalization task: The utility of a developmental approach. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60, 6, 820-836.
- [95] Denham, S. A. (2007). Dealing with feelings: How children negotiate the worlds of emotions and social relationships. *Cognition, Brain, Behavior*, 11, 1, 1.
- [96] Denham, S. A., Bassett, H. H., Way, E., Mincic, M., Zinsser, K., & Graling, K. (2012). Preschoolers' emotion knowledge: Self-regulatory foundations, and predictions of early school success. *Cognition & Emotion*, 26, 4, 667-679.
- [97] Denham, S. A., Blair, K. A., De Mulder, E., Levitas, J., Sawyer, K., Auerbach-Major, S., & Queenan, P. (2003). Preschool emotional competence: Pathway to social competence? *Child Development*, 74, 1, 238-256.

- [98] Dennis, T. A., Chen, C. C., & Malone, M. M. (2009). Emotional Face Processing and Emotion Regulation in Children: An ERP Study. *Developmental Neuropsychology*, 34, 1, 85.
- [99] De Ribaupierre, A., & Lecerf, T. (2018). On the Importance of Intraindividual Variability in Cognitive Development. *Journal of Intelligence*, 6, 2, 17.
- [100] Di Luca, M., & Rhodes, D. (2016). Optimal perceived timing: Integrating sensory information with dynamically updated expectations. *Scientific Reports*, 6.
- [101] Drake, C., & Botte, M. C. (1993). Tempo sensitivity in auditory sequences: Evidence for a multiple-look model. *Perception & Psychophysics*, 54, 3, 277-286.
- [102] Drake, C., Jones, M. R., & Baruch, C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences: attunement, referent period, focal attending. *Cognition*, 77, 251-288.
- [103] Drewing, K., Aschersleben, G., & Li, S-H. (2006). Sensorimotor synchronization across the life span. *International Journal of Behavioral Development*, 30, 280-287.
- [104] Droit, S. (1995). Learning by doing in 3- and 4½-year-old children: Adapting to time. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition*, 14, 3, 283-299.
- [105] Droit-Volet, S. (1998). Time estimation in young children: an initial force rule governing time production. *Journal of Experimental Child Psychology*, 68, 236–249,108.
- [106] Droit-Volet, S. (2002). Scalar timing in temporal generalization in children with short and long stimulus durations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 55, 4, 1193-1209.
- [107] Droit-Volet, S. (2003). Alerting attention and time perception in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 85, 4, 372-384.

- [108] Droit-Volet, S. (2008). Further investigation of the filled-duration illusion with a comparison between children and adults. *Journal of Experimental Psychology and Animal Behaviour Processes*, 34, 400-414, 29.
- [109] Droit-Volet, S. (2010). Stop using time reproduction tasks in a comparative perspective without further analyses of the role of the motor response: The example of children. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22, 1, 130-148.
- [110] Droit-Volet, S. (2013). Time perception in children: A neurodevelopmental approach. *Neuropsychologia*, 51, 220–234.
- [111] Droit-Volet, S. (2016). Development of time. *Current Opinion in Behavioral Science*, 8, 102-109.
- [112] Droit-Volet, S. (2017). Time dilation in children and adults: The idea of a slower internal clock in young children tested with different click frequencies. *Behavioural processes*, 138, 152-159.
- [113] Droit-Volet, S. (2018). Intertwined facets of subjective time. *Current Direction in Psychological Science*, 27, 6.
- [114] Droit-Volet, S., & Clément, A. (2005). Time perception in children and adults: Effects of continuous and discontinuous signal. *Current Psychology of Cognition*, 23, 229-248.
- [115] Droit-Volet, S., Clément, A., & Wearden, J. (2001). Temporal generalization in 3-to 8-year-old children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80, 3, 271-288.
- [116] Droit-Volet, S., & Coull, J. T. (2016). Distinct developmental trajectories for explicit and implicit timing. *Journal of Experimental Child Psychology*, 150, 141-154.
- [117] Droit-Volet, S., Delgado, M., & Rattat, A. C. (2006). The development of the ability to judge time in children. In J. R. Marrow (Ed.), *Focus on child psychology research*. Nova Science Publishers, Inc.

- [118] Droit-Volet, S., Fayolle, S., Lamotte, M., & Gil, S. (2013). Time, emotion and the embodiment of timing. *Timing & Time Perception*, 1, 1, 99-126.
- [119] Droit-Volet, S., & Hallez, Q. (2018). Differences in modal distortion in time perception due to working memory capacity: a response with a developmental study in children and adults. *Psychological Research*, 1-10.
- [120] Droit-Volet, S., & Izaute, M. (2005). The effect of feedback on timing in children and adults: The temporal generalization task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 58, A, 507-520.
- [121] Droit-Volet, S., & Izaute, M. (2008). The necessity of using feedback and no-forced choice in time bisection in children and adults? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.
- [122] Droit-Volet, S., & Izaute, M. (2009). Improving time discrimination in children and adults in a temporal bisection task: The effects of feedback and no forced choice on decision and memory processes. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62, 6, 1173-1188.
- [123] Droit-Volet, S., & Meck, W.H. (2007). How emotions color our time perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 1, 12, 504-513.
- [124] Droit-Volet, S., & Provasi, J. (2015). Synchrony and emotion. *Timing and Time Perception*, 3, 1- 2.
- [125] Droit, S., Provasi, J., & Pouthas, V. (1993). Les activités rythmiques du nourrisson: de la neurophysiologie à la cognition. *Psychologie Française*, 38, 1, 7-12.
- [126] Droit-Volet, S., Pouthas, V., & Jaquet, A.Y. (1991). Apprentissage temporel chez des enfants âgés de 4 ½ et 6 ans : rôle d'une horloge externe. *L'Année Psychologique*, 91, 347-364.

- [127] Droit-Volet, S., & Rattat, A. C. (1999). Are time and action dissociated in young children's time estimation? *Cognitive Development*, 14, 4, 573-595
- [128] Droit-Volet, S., & Rattat, A. C. (2007). A further analysis of time bisection behavior in children with and without reference memory: the similarity and the partition task. *Acta Psychologica*, 125, 2, 240-256.
- [129] Droit-Volet, S., Turrett, S., & Wearden, J. H. (2004). Perception of the duration of auditory and visual stimuli in children and adults. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54, A, 797-818.
- [130] Droit-Volet, S., & Wearden, J. H. (2001). Temporal bisection in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80, 2, 142-159.
- [131] Droit-Volet, S., & Wearden, J. (2002). Speeding up an internal clock in children? Effects of visual flicker on subjective duration. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55, 193-211.
- [132] Droit-Volet, S., & Wearden, J. (2003). Les modèles d'horloge interne en psychologie du temps. *L'Année Psychologique*, 103, 4, 617-654.
- [133] Droit-Volet, S., Wearden, J., & Zélanti, P. (2015). Cognitive abilities required in time judgment depending on the temporal task used: A comparison of children and adults. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68, 2216-2242.
- [134] Droit-Volet, S., & Zélanti, P. S. (2013a). Development of time sensitivity and information processing speed. *PLoS ONE*, 8, 8.
- [135] Droit-Volet, S., & Zélanti, P. (2013b). Time sensitivity in children and adults: Duration ratios in bisection. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 66, 687-704.
- [136] Droit-Volet, S., Zélanti, P. S., Dellatolas, G., Kieffer, V., El Massioui, N., Brown, B. L., ... & Grill, J. (2013). Time perception in children treated for a cerebellar medulloblastoma. *Research in Developmental Disabilities*, 34, 1, 480-494.

- [137] Dyjas, O., Bausenhardt, K. M., & Ulrich, R. (2012). Trial-by-trial updating of an internal reference in discrimination tasks: Evidence from effects of stimulus order and trial sequence. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74, 8, 1819-1841.
- [138] Efron, D. A., Niedenthal, P. M., Gil, S., & Droit-Volet, S. (2006). Embodied temporal perception of emotion. *Emotion*, 6, 1, 1.
- [139] Eimas, P. D., Siqueland, E. R., Jusczyk, P., & Vigorito, J. (1971). Speech perception in infants. *Science*, 171, 3968, 303-306.
- [140] Fayolle, S., Gil, S., & Droit-Volet, S. (2015). Fear and time: fear speeds up the internal clock. *Behavioural Processes*, 120, 135-140.
- [141] Fautrelle, L., Mareschal, D., French, R., Addyman, C., & Thomas, E. (2015). Motor activity improves temporal expectancy. *PLoS ONE*, 10:e0119187.
- [142] Fechner, G. T. (1987). My own viewpoint on mental measurement (1887). *Psychological Research*, 49, 4, 213-219.
- [143] Feldman, R. (2006). From biological rhythms to social rhythms: Physiological precursors of mother-infant synchrony. *Developmental Psychology*, 42, 1, 175.
- [144] Feldman, R., Magori-Cohen, R., Galili, G., Singer, M., & Louzoun, Y. (2011). Mother and infant coordinate heart rhythms through episodes of interaction synchrony. *Infant Behavior and Development*, 34, 4, 569-577.
- [145] Fierro, B., Palermo, A., Puma, A., Francolini, M., Panetta, M. L., Daniele, O., & Brighina, F. (2007). Role of the cerebellum in time perception: a TMS study in normal subjects. *Journal of the Neurological Sciences*, 263, 1-2, 107-112.
- [146] Fitch, W.T. (2013). Rhythmic cognition in humans and animals: distinguishing meter and pulse perception. *Frontiers in System and Neuroscience*, 7, 68, 3.
- [147] Fitzgerald, H. E., & Brackbill, Y. (1968). Interstimulus interval in classical pupillary conditioning. *Psychological Reports*, 23, 2, 369-370.

- [148] Fortin, C. (1999). Short-term memory in time interval production. *International Journal of Psychology*, 34, 5-6, 308-316.
- [149] Fortin, C., Breton, R. (1995). Temporal interval production and processing in working memory. *Perception and Psychophysics*, 57, 203-215.
- [150] Fortin, C., & Couture, E. (2002). Short-term memory and time estimation: beyond the 2-second "critical" value. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 56, 2, 120.
- [151] Fortin, C., & Massé, N. (1999). Order information in short-term memory and time estimation. *Memory & Cognition*, 27, 1, 54-62.
- [152] Fortin, C., & Rousseau, R. (1998). Interference from short-term memory processing on encoding and reproducing brief durations. *Psychological Research*, 61, 269-276.
- [153] Fortin, C., Rousseau, R., Bourque, P., & Kirouac, E. (1993). Time estimation and concurrent nontemporal processing: Specific interference from short-term-memory demands. *Perception & Psychophysics*, 53, 5, 536-548.
- [154] Fortin, C., & Schweickert, R. (2016). Timing, working memory, and expectancy: A review of interference studies. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 67-72.
- [155] Fraisse, P. (1948). II.-Rythmes auditifs et rythmes visuels. *L'Année Psychologique*, 49, 21- 42.
- [156] Fraisse, P. (1966). L'anticipation de stimulus rythmiques: Vitesse d'établissement et précision de la synchronisation. *L'Année Psychologique*, 66, 15-36.
- [157] Fraisse, P. (1974). *Psychologie du rythme*. Presses Universitaires de France.
- [158] Fraisse, P. (1982). Rhythm and tempo. *The Psychology of Music*, 1, 149-180.
- [159] Fraisse, P., Chambon, H., & Oléron, G. (1954). Note sur la constance et l'évolution génétique du tempo spontané moteur. *Enfance*, 7, 25-34.
- [160] François, M. (1927). Contribution à l'étude du sens du temps : la température interne comme facteur de variation de l'appréciation subjective des durée. *L'Année*

- Psychologique*, 28, 186-204.
- [161] Franssen, V., & Vandierendonck, A. (2002). Time estimation: Does the reference memory mediate the effect of knowledge of results? *Acta Psychologica*, 109, 3, 239-267.
- [162] Friedman, E. R. (1977). Judgments of time intervals by young children. *Perceptual and Motor Skills*, 45, 3, 715-720.
- [163] Fujioka, T., Ross, B., & Trainor, L. J. (2015). Beta-band oscillations represent auditory beat and its metrical hierarchy in perception and imagery. *Journal of Neuroscience*, 35, 45, 15187-15198.
- [164] Fujioka, T., Trainor, L. J., Large, E. W., & Ross, B. (2012). Internalized timing of isochronous sounds is represented in neuromagnetic beta oscillations. *Journal of Neuroscience*, 32, 1791-1802.
- [165] Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 11, 9, 593-609.
- [167] Gallistel, C. R. (1990). *The organization of learning*. The MIT Press.
- [168] Gathercole, S. E. (2002). Memory development during the childhood year. In A. D. Baddeley, M. D. Kopelman, & B. A. Wilson (Eds.), *Handbook of memory disorders* (2nd ed., pp. 475–500). Chichester, England: Wiley.
- [169] Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology*, 40, 177-190.
- [170] Gautier, T., & Droit-Volet, S. (2002). Attention and time estimation in 5- and 8-year-old children: A dual-task procedure. *Behavioural Processes*, 58, 1-2, 57-66.
- [171] Gerfen, C.R., and Bolam, J.P. (2010). The neuroanatomical organization of the basal ganglia. In *Handbook of Basal Ganglia Structure and Function*, Vol. 20, H. Steiner and K.Y. Tseng, eds. (pp. 3–28). Academic Press.

- [172] Getchell, N. (2006). Age and task-related differences in timing stability, consistency, and natural frequency of children's rhythmic, motor coordination. *Developmental Psychobiology: The Journal of the International Society for Developmental Psychobiology*, 48, 8, 675-685.
- [173] Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theories and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, 84, 279-325.
- [174] Gibbon, J. (1981). On the form and location of the psychometric bisection function for time. *Journal of Mathematical Psychology*, 24, 1, 58-87.
- [175] Gibbon, J. (1991). Origins of scalar timing. *Learning and motivation*, 22, 1-2, 3-38.
- [176] Gibbon, J. (1992). Ubiquity of scalar timing with a Poisson clock. *Journal of Mathematical Psychology*, 36, 2, 283-293.
- [177] Gibbon, J., & Church, R. M. (1990). Representation of time. *Cognition*, 37, 1-2, 23-54.
- [178] Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. H. (1984). Scalar timing in memory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 423, 1, 52-77.
- [179] Gibson, J.J. (1975). Events are perceivable but time is not. In *The Study of Time II* (J.T. Fraser, and N. Lawrence, eds, (pp. 295– 301).
- [180] Gil, S., & Droit-Volet, S. (2012). Emotional time distortions: the fundamental role of arousal. *Cognition & Emotion*, 26, 5, 847-862.
- [181] Gil, S., Niedenthal, P., & Droit-Volet, S. (2007). Anger and temporal perception in children. *Emotion*, 7, 219–225.
- [182] Gomez, C. M., Marco, J., & Grau, C. (2003). Preparatory visuo-motor cortical network of the contingent negative variation estimated by current density. *Neuroimage*, 20, 1, 216-224.

- [183] Gordon, R. L., Jacobs, M. S., Schuele, C. M., & McAuley, J. D. (2015). Perspectives on the rhythm–grammar link and its implications for typical and atypical language development. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1337, 1, 16-25.
- [184] Gordon, R. L., Shivers, C. M., Wieland, E. A., Kotz, S. A., Yoder, P. J., & McAuley, J. D. (2015). Musical rhythm discrimination explains individual differences in grammar skills in children. *Developmental Science*, 18, 4, 635-644.
- [185] Gori, M., Chilosi, A., Forli, F., & Burr, D. (2017). Audio-visual temporal perception in children with restored hearing. *Neuropsychologia*, 99, 350-359.
- [186] Goudar, V., & Buonomano, D. V. (2018). Encoding sensory and motor patterns as time-invariant trajectories in recurrent neural networks. *Elife*, 7, e31134.
- [187] Graff, C., & El Methni, M. (2011). Développement de la précision temporo-motrice et cadences spontanées de jeunes enfants. *Psychologie Française*, 56, 1, 19-29.
- [188] Grahn, J. A. (2012). Neural mechanisms of rhythm perception: Current findings and future perspectives. *Topics in Cognitive Science*, 4, 585-606.
- [189] Grahn, J.A. & Brett, M. (2007). Rhythm and beat perception in motor areas of the brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19, 893-906.
- [190] Grahn, J. A., & Brett, M. (2009). Impairment of beat-based rhythm discrimination in Parkinson's disease. *Cortex*, 45, 1, 54-61.
- [191] Grahn, J. A., & Rowe, J. B. (2009). Feeling the beat: premotor and striatal interactions in musicians and nonmusicians during beat perception. *Journal of Neuroscience*, 29, 23, 7540-7548.
- [192] Grahn, J. A., & Schuit, D. (2012). Individual Differences in Rhythmic Ability: Behavioral and Neuroimaging Investigations. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, 22, 105-121.

- [193] Gray, S., Green, S., Alt, M., Hogan, T., Kuo, T., Brinkley, S., & Cowan, N. (2017). The structure of working memory in young children and its relation to intelligence. *Journal of Memory and Language*, 92, 183-201.
- [194] Grondin, S. (2001). From physical time to the first and second moments of psychological time. *Psychological Bulletin*, 127, 22-44.
- [195] Grondin, S. (2005). Overloading temporal memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 5, 869.
- [196] Grondin, S. (2010). Timing and time perception: A review of recent behavioral and neuroscience findings and theoretical directions. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72, 561-582.
- [197] Grondin, S. (2012). Violation of the scalar property for time perception between 1 and 2 seconds: evidence from interval discrimination, reproduction, and categorization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38, 4, 880.
- [198] Grondin, S., Meilleur-Wells, G., Ouellette, C., & Macar, F. (1998). Sensory effects on judgments of short time-intervals. *Psychological Research*, 61, 261-268.
- [199] Grube, M., Cooper, F. E., Chinnery, P. F., & Griffiths, T. D. (2010). Dissociation of duration-based and beat-based auditory timing in cerebellar degeneration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 25, 11597-11601.
- [200] Guyau, J. M. (1890). *La genèse de l'idée de temps*. Paris, France: Alcan
- [201] Hallez, Q., Damsma, A., Rhodes, D., van Rijn, H., & Droit-Volet, S. (2019). The dynamic effect of context on interval timing in children and adults. *Acta Psychologica*, 192, 87-93.
- [202] Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2017). High levels of time contraction in young children in dual task are related to their limited attention capacities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 161, 148-160, 18.

- [203] Hannon, E. E., & Johnson, S. P. (2005). Infants use meter to categorize rhythms and melodies: Implications for musical structure learning. *Cognitive Psychology*, 50, 4, 354-377.
- [204] Hannon, E. E., Nave-Blodgett, J. E., & Nave, K. M. (2018). The developmental origins of the perception and production of musical rhythm. *Child Development Perspectives*, 12, 3, 194-198.
- [205] Hannon, E. E., & Trehub, S. E. (2005). Tuning in to musical rhythms: Infants learn more readily than adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 35, 12639-12643.
- [206] Harrington, D.L., & Jahanshahi, M. (2016) Reconfiguration of striatal connectivity for timing and action. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 79-84.
- [207] Hary, D., & Moore, G. P. (1987). Synchronizing human movement with an external clock source. *Biological Cybernetics*, 56, 305-311.
- [208] Haueisen, J., & Knösche, T. R. (2001). Involuntary motor activity in pianists evoked by music perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 6, 786-792.
- [209] Helmbold, N., Troche, S., & Rammsayer, T. (2006). Temporal information processing and pitch discrimination as predictors of general intelligence. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 60, 4, 294.
- [210] Heyes, C. (2010). Mesmerising mirror neurons. *Neuroimage*, 51, 2, 789-791.
- [211] Heyes, C. M., & Ray, E. D. (2000). What is the significance of imitation in animals? *Advances in the Study of Behavior*, 29, 215-245.
- [212] Hoagland, H. (1933). The physiological control of judgments of duration: Evidence for a chemical clock. *The Journal of General Psychology*, 9, 2, 267-287.
- [213] Hollingworth, H. L. (1910). The central tendency of judgment. *The Journal of Philosophy, Psychology and Scientific Methods*, 7, 17, 461-469.

- [214] Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). Codes and their vicissitudes. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 5, 910-926.
- [215] Honing, H. (2012). Without it no music: beat induction as a fundamental musical trait. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1252, 85-91.
- [216] Honing, H., Ten Cate, C., Peretz, I., & Trehub, S. E. (2015). Without it no music: cognition, biology and evolution of musicality. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Sciences*, 370.
- [217] Huss, M., Verney, J. P., Fosker, T., Mead, N., & Goswami, U. (2011). Music, rhythm, rise time perception and developmental dyslexia: perception of musical meter predicts reading and phonology. *Cortex*, 47, 6, 674-689.
- [218] Ilari, B. (2015). Rhythmic engagement with music in early childhood: A replication and extension. *Journal of Research in Musical Education*, 62, 4, 332-343.
- [219] Iordanescu, L., Grabowecky, M., & Suzuki, S. (2013). Action enhances auditory but not visual temporal sensitivity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20, 1, 108-114.
- [220] Ivry, R. B. (1996). The representation of temporal information in perception and motor control. *Current Opinion in Neurobiology*, 6, 851-857.
- [221] Ivry, R. B., & Hazeltine, R. E. (1995). Perception and production of temporal intervals across a range of durations: evidence for a common timing mechanism. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 1, 3-18.
- [222] Ivry, R. B., & Keele, S. W. (1989). Timing functions of the cerebellum. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1, 136-152.
- [223] Ivry, R. B., & Schlerf, J. E. (2008). Dedicated and intrinsic models of time perception. *Trends in Cognitive Science*, 12, 273-280
- [224] Ivry, R. B., & Spencer, R. M. (2004). The neural representation of time. *Current Opinion in Neurobiology*, 14, 2, 225-232.

- [225] Jahanshahi, M., Jones, C. R. G., Dirnberger, G., & Frith, C.D. (2006). The substantia nigra pars compacta and temporal processing. *Journal of Neuroscience*, 26, 12266-12273.
- [226] Janssen, P., and Shadlen, M.N. (2005). A representation of the hazard rate of elapsed time in macaque area LIP. *Nature Neuroscience*, 8, 234-241.
- [227] Jantzen, K. J., Steinberg, F. L., & Kelso, J. A. S. (2005). Functional MRI reveals the existence of modality and coordination-dependent timing networks. *Neuroimage*, 25, 4, 1031-1042.
- [228] Jazayeri, M., & Shadlen, M. N. (2010) Temporal context calibrates interval timing. *Nature Neuroscience*, 13, 1020-1026.
- [229] Jazayeri, M., & Shadlen, M.N. (2015). A neural mechanism for sensing and reproducing a time interval. *Current Biology*, 25, 2599-2609.
- [230] Johnson, K. A., Bryan, M., Polonowita, K., Decroupet, D., & Coull, J. T. (2016). Isochronous sequential presentation helps children orient their attention in time. *Frontiers in Psychology*, 7, 1417.
- [231] Johnson, K. A., Burrowes, E., & Coull, J. T. (2015). Children can implicitly, but not voluntarily, direct attention in time. *PLoS ONE*, 10, 4, e0123625.
- [232] Jones, C. R., Claassen, D., Yu, M., Spies, J. R., Malone, T., Dirnberger, G., ... & Kubovy, M. (2011). Modeling accuracy and variability of motor timing in treated and untreated Parkinson's disease and healthy controls. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 5, 81.
- [233] Jones, C. R., Malone, T., Dirnberger, G., Edwards, M., & Jahanshahi, M. (2008). Basal ganglia, dopamine and temporal processing: performance on three timing tasks on and off medication in Parkinson's disease. *Brain and Cognition*, 68, 1, 30-41.

- [234] Jones, L. A., & Wearden, J. H. (2003). More is not necessarily better: Examining the nature of the temporal reference memory component in timing. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section B*, 56, 4b, 321-343.
- [235] Jones, L. A., & Wearden, J. H. (2004). Double standards: Memory loading in temporal reference memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section B*, 57, 1b, 55-77.
- [236] Jones, L. A., Allely, C. S., & Wearden, J. H. (2011). Click trains and the rate of information processing: Does “speeding up” subjective time make other psychological processes run faster? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 64, 2, 363-380.
- [237] Jones, M. R., 1976. Time, our lost dimension: toward a new theory of perception, attention and memory. *Psychological Review*, 83, 323-355.
- [238] Jones, M. R., Moynihan, H., MacKenzie, N., & Puente, J. (2002). Temporal aspects of stimulus-driven attending in dynamic arrays. *Psychological Science*, 13, 4, 313-319.
- [239] Kail, R. (1991). Development of processing speed in childhood and adolescence. *Advances in child development and behavior*, 23, 151-185.
- [240] Kaiser, S., Wehrle, T., & Schenkel, K. (2009). Expression faciale des emotions. *Traité de psychologie des emotions. Paris: Dunod*, 109-157.
- [241] Karmarkar, U. R., & Buonomano, D. V. (2007). Timing in the absence of clocks: encoding time in neural network states. *Neuron*, 53, 427-438
- [241] Khalil, A. K., Mincses, V., McLoughlin, G., & Chiba, A. (2013). Group rhythmic synchrony and attention in children. *Frontiers in Psychology*, 4, 564.
- [242] Kim, J., Ghim, J.-W., Lee, J. H., & Jung, M. W. (2013). Neural correlates of interval timing in rodent prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, 33, 13834-13847.

- [243] Kononowicz, T. W., & Penney, T. B. (2016). The contingent negative variation (CNV): timing isn't everything. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 231-237.
- [244] Kononowicz, T. W., & Van Rijn, H. (2014). Decoupling interval timing and climbing neural activity: a dissociation between CNV and N1P2 amplitudes. *Journal of Neuroscience*, 34, 2931-2939, 18.
- [245] Kononowicz, T. W., & Van Rijn, H. (2015). Single trial beta oscillations index time estimation. *Neuropsychologia*, 75, 381-389.
- [246] Kononowicz, T. W., Van Rijn, H., & Meck, W. H. (2017). Timing and time perception: A critical review of neural timing signatures before, during, and after the to-be-timed interval. *Sensation, Perception and Attention*, 2, 1-35.
- [247] Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (2007). *Nepsy-II*. San Antonio, TX: Pearson.
- [248] Kotz, S. A., Brown, R. M., & Schwartz, M. (2016). Cortico-striatal circuits and the timing of action and perception. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 42-45.
- [249] Kotz, S. A., Ravnani, A., & Fitch, W. T. (2018). The evolution of rhythm processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 22, 10, 896-910.
- [250] Kotz, S. A., & Schwartz, M. (2016). Motor-timing and sequencing in speech production: a general-purpose frame-work. In *Neurobiology of Language* (G. Hickok, and S. L. Small, eds), pp. 717–724, Academic Press.
- [251] Koch, G., Oliveri, M., Torriero, S., Salerno, S., Gerfo, E. L., & Caltagirone, C. (2007). Repetitive TMS of cerebellum interferes with millisecond time processing. *Experimental Brain Research*, 179, 2, 291-299.
- [252] Laje, R., & Buonomano, D. V. (2013). Robust timing and motor patterns by taming chaos in recurrent neural networks. *Nature Neuroscience*, 16, 7, 925.
- [253] Lakatos, P., Karmos, G., Mehta, A. D., Ulbert, I., Schroeder, C. E. (2008) Entrainment of neuronal oscillations as a mechanism of attentional selection. *Science*, 320, 110-113.

- [254] Lamotte, M., Droit-Volet, S., & Izaute, M. (2017). Confidence judgment in a temporal generalization task: Accuracy and sensitivity to task difficulty. *L'Annee Psychologique*, 117, 3, 275-298.
- [255] Lamotte, M., Chakroun, N., Droit-Volet, S., & Izaute, M. (2014). Metacognitive questionnaire on time: Feeling of the passage of time. *Timing & Time Perception*, 2, 3, 339-359.
- [256] Lamotte, M., Izaute, M., & Droit-Volet, S. (2012). Awareness of time distortions and its relation with time judgment: A metacognitive approach. *Consciousness and Cognition*, 21, 2, 835-842.
- [257] Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (2005). *International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual* (Technical Report A-6). University of Florida, Gainesville, FL.
- [258] Large, E. W. (2000). On synchronizing movements to music. *Human Movement Science*, 19, 4, 527-566.
- [259] Large, E. W., & Jones, M. R. (1999). The dynamics of attending: How people track time-varying events. *Psychological Review*, 106, 1, 119.
- [259] Large, E. W., & Snyder, J. S. (2009). Pulse and meter as neural resonance. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 1, 46-57.
- [260] Ledoux, J. (2014). Coming to terms with fear. *PNAS*, 111(8), 2871–2878.
- [261] Lejeune, H. (2000). Prospective timing, attention and the switch: A response to 'Gating or switching? Gating is a better model of prospective timing' by Zakay. *Behavioural Processes*, 52, 2-3, 71-76.
- [262] Lejeune, H., & Wearden, J. H. (2009). Vierordt's 'The experimental study of the time sense (1868) and its legacy. *European Journal of Cognitive Psychology*, 21, 941-960.

- [263] Leman, M. (2010). Music, gesture, and the formation of embodied meaning. *Musical Gestures: Sound, Movement, and Meaning*, 126-153.
- [264] Leman, M. (2007). *Embodied Music Cognition and Mediation Technology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [265] Lenroot, R. K., & Giedd, J. N. (2006). Brain development in children and adolescents: Insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 30, 718-729.
- [266] Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2003a). Brain activation patterns during measurement of sub-and supra-second intervals. *Neuropsychologia*, 41, 12, 1583-1592.
- [267] Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2003b). Distinct systems for automatic and cognitively controlled time measurement: evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology*, 13, 250-255.
- [267] Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2003c). Overview: An image of human neural timing. *Functional and Neural Mechanisms of Interval Timing*, 515-532.
- [268] Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2006). Remembering the time: a continuous clock. *Trends in Cognitive Sciences*, 10, 9, 401-406.
- [269] Macar, F., Grondin, S., & Casini, L. (1994). Controlled attention sharing influences time estimation. *Memory & Cognition*, 22, 6, 673-686.
- [270] Macar, F., & Vidal, F. (2003). The CNV peak: an index of decision making and temporal memory. *Psychophysiology*, 40, 950-954, 19.
- [271] Macar, F., Vidal, F., & Casini, L. (1999). The supplementary motor area in motor and sensory timing: evidence from slow brain potential changes. *Experimental Brain Research*, 125, 3, 271-280.

- [272] Madison, G., Forsman, L., Blom, Ö., Karabanov, A., & Ullén, F. (2009). Correlations between intelligence and components of serial timing variability. *Intelligence*, 37, 68-75.
- [273] Madison, G., & Merker, B. (2004). Human sensorimotor tracking of continuous subliminal deviations from isochrony. *Neuroscience Letters*, 370, 69-73.
- [274] Maes, P. J., Leman, M., Palmer, C., & Wanderley, M. (2014). Action-based effects on music perception. *Frontiers in Psychology*, 4, 1008.
- [275] Malapani, C., Dubois, B., Rancurel, G., & Gibbon, J. (1998). Cerebellar dysfunctions of temporal processing in the seconds range in humans. *Neuroreport*, 9, 17, 3907-3912.
- [276] Manning, F. C., Harris, J., & Schutz, M. (2017). Temporal prediction abilities are mediated by motor effector and rhythmic expertise. *Experimental Brain Research*, 235, 3, 861-871.
- [277] Manning, F., & Schutz, M. (2013). "Moving to the beat" improves timing perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20, 6, 1133-1139.
- [278] Manning, F., & Schutz, M. (2015). Movement enhances perceived timing in the absence of auditory feedback. *Timing and Time Perception*, 3, 3-12.
- [279] Manning, F. C., & Schutz, M. (2016). Trained to keep a beat: movement-related enhancements to timing perception in percussionists and non-percussionists. *Psychological Research*, 80, 4, 532-542.
- [280] Maricq, A. V., & Church, R. M. (1983). The differential effects of haloperidol and methamphetamine on time estimation in the rat. *Psychopharmacology*, 79, 1, 10-15.
- [281] Maricq, A. V., Roberts, S., & Church, R. M. (1981). Methamphetamine and time estimation. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 7, 1, 18.

- [282] Matell, M. S., Chelius, C. M., Meck, W. H., & Sakata, S. (2000). Effect of unilateral or bilateral retrograde 6-OHDA lesions of the substantia nigra pars compacta on interval timing. *Abstracts-Society for Neuroscience*, 26, 1742.
- [283] Matell, M. S., & Meck, W. H. (2000). Neuropsychological mechanisms of interval timing behavior. *Bioessays*, 22, 1, 94-103.
- [284] Matell, M. S., & Meck, W. H. (2004). Cortico-striatal circuits and interval timing: coincidence detection of oscillatory processes. *Cognitive Brain Research*, 21, 2, 139-170.
- [285] Matthews, W. J., & Meck, W. H. (2016) Temporal cognition: connecting subjective time to perception, attention, and memory. *Psychological Bulletin*, 142, 865-907.
- [286] Mauk, M. D., & Buonomano, D. V. (2004). The neural basis of temporal processing. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 307-340.
- [287] McAuley, J. D. (2010). Tempo and rhythm. In *Music perception* (pp. 165-199). Springer, New York, NY.
- [288] McAuley, J. D., Jones, M. R., Holub, S., & Johnston, H. M., & Miller, N. S. (2006). The time of our lives: life span development of timing and event tracking. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135, 3, 348-367.
- [289] McCormack, T., Brown, G. D. A., Maylor, E. A., Darby, R. J., & Green, D. (1999). Developmental changes in time estimation: Comparing childhood and old age. *Developmental Psychology*, 35, 1143-1155.
- [290] McCormack, T., Brown, G. D. A., Smith, M. C., Brock, J. (2004). A timing-specific memory distortion effect in young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 33-56.
- [291] McCormack, T., & Hoerl, C. (2017). The development of temporal concepts: Learning to locate events in time. *Timing and Time perception*, 4, 3-4, 297-327.

- [292] McCormack, T., Wearden, J. H., Smith, M. C., & Brown, G. D. A. (2005). Episodic temporal generalization: A developmental study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 58A, 693-704.
- [293] McDonald, C., Cheng, R. K., & Meck, W. H. (2012). Acquisition of “Start” and “Stop” response thresholds in peak-interval timing is differentially sensitive to protein synthesis inhibition in the dorsal and ventral striatum. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 6, 10.
- [294] McNaughton, S., Timmann, D., Watts, S., & Hore, J. (2004). Overarm throwing speed in cerebellar subjects: effect of timing of ball release. *Experimental Brain Research*, 154, 470-478.
- [295] Meck, W.H. (1996). Neuropharmacology of timing and time perception. *Cognition and Brain Research*, 3, 227-242.
- [296] Meck, W.H. (2006). Neuroanatomical localization of an internal clock: a functional link between mesolimbic-mesocortical and nigrostriatal dopaminergic systems. *Brain Research*, 1109, 1, 93-107.
- [297] Mento, G., Astle, D. E., Scerif, G. (2018). Cross-frequency phase-amplitude coupling as a mechanism for temporal orienting of attention in childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 30, 594-602.
- [298] Mento, G., Tarantino, V., Sarlo, M., & Bisiacchi, P. S. (2013). Automatic temporal expectancy: a high-density event-related potential study. *PLoS One*, 8, 5, e62896.
- [299] Merchant, H., & Bartolo, R. (2018). Primate beta oscillations and rhythmic behaviors. *Journal of Neural Transmission*, 125, 3, 461-470.
- [300] Merchant, H., & Yarrow, K. (2016). How the motor system both encodes and influences our sense of time. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 22-27.

- [301] Merchant, H., Zarco, W., & Prado, L. (2008). Do we have a common mechanism for measuring time in the hundreds of millisecond range? Evidence from multiple-interval timing tasks. *Journal of Neurophysiology*, 99, 2, 939-949.
- [302] Merchant, H., Zarco, W., Pérez, O., Prado, L., & Bartolo, R. (2011). Measuring time with different neural chronometers during a synchronization-continuation task. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 49, 19784-19789.
- [303] Miall, C. (1989). The storage of time intervals using oscillating neurons. *Neural Computation*, 1, 3, 359-371.
- [304] Miall, C. (1996). Models of neural timing. *Advances in Psychology*, 115, 69-94.
- [305] Mikels, J., Fredrickson, B., & Reuter-Lorenz, P. (2005). Emotional category data on images from the International Affective Picture System. *Behavior Research Methods*, 37, 4, 626-630.
- [306] Mita, A., Mushiake, H., Shima, K., Matsuzaka, Y., & Tanji, J. (2009). Interval time coding by neurons in the pre-supplementary and supplementary motor areas. *Nature Neuroscience*, 12, 4, 502.
- [307] Monier, F., Droit-Volet, S., & Coull, J.T. (2019). The beneficial effect of synchronized action on motor and perceptual timing in children. *Developmental Science*.
- [308] Monier, F., & Droit-Volet, S. (2019). Development of sensorimotor synchronization abilities: motor and cognitive components. *Child Neuropsychology*, e12821.
- [309] Monier, F., & Droit-Volet, S. (2016). Synchrony and Emotion in Children and Adults. *International Journal of Psychology*, 53, 3, 184-193.
- [309] Morelen, D., & Suveg, C. (2012). A real-time analysis of Parents-Child emotion discussions: the interaction is reciprocal. *Journal of Family Psychology*, 26, 6, 998-1003.

- [310] Morillon, B., Schroeder, C. E., & Wyart, V. (2014). Motor contributions to the temporal precision of auditory attention. *Nature Communications*, 5, 5255.
- [311] Muller, T., & Nobre, A. C. (2014). Perceiving the passage of time: neural possibilities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1326, 1, 60-71.
- [312] Nachev, P., Kennard, C., & Husain, M. (2008). Functional role of the supplementary and pre-supplementary motor areas. *Nature Review of Neuroscience*, 9, 856-869.
- [313] Niedenthal, P. M., Krauth-Gruber, S., & Ric, F. (2006). *Psychology of Emotion*, (pp:152-160). New-York: Psychology press.
- [314] Niki, H., and Watanabe, M. (1979). Prefrontal and cingulate unit activity during timing behavior in the monkey. *Brain Res.* 171, 213–224.
- [315] Nozaradan, S., Peretz, I., Missal, M., & Mouraux, A. (2011). Tagging the neuronal entrainment to beat and meter. *Journal of Neuroscience*, 31, 10234–10240.
- [316] Oberman, L. M., Winkielman, P., & Ramachandran, V. S. (2007). Face to face: Blocking facial mimicry can selectively impair recognition of emotional expressions. *Social Neuroscience*, 2, 3, 167-178.
- [317] Ogden, R. S., Samuels, M., Simmons, F., Wearden, J., & Montgomery, C. (2017). The differential recruitment of short-term memory and executive functions during time, number, and length perception: an individual differences approach. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 71, 657-669, 16.
- [318] Ogden, R. S., Wearden, J. H., & Jones, L. A. (2008). The remembrance of times past: Interference in temporal reference memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34, 6, 1524.
- [319] Ortega, L., & Lopez, F., (2008). Effects of visual flicker on subjective time in a temporal bisection task. *Behavioral Processes*, 78, 380-386.

- [320] Pashler, H. (2001). Perception and production of brief durations: beat-based versus interval-based timing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 2, 485.
- [321] Patel, A. D. (2006). Musical rhythm, linguistic rhythm, and human evolution. *Music Perception*, 24, 99–104.
- [322] Patel, A. D., & Iversen, J. R. (2014). The evolutionary neuroscience of musical beat perception: the Action Simulation for Auditory Prediction (ASAP) hypothesis. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8, 57.
- [323] Paton, J. J., & Buonomano, D. V. (2018). The neural basis of timing: distributed mechanisms for diverse functions. *Neuron*, 98, 4, 687-705.
- [324] Paus, T. (2005). Mapping brain maturation and cognitive development during adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 2, 60-68.
- [325] Pérez, O., & Merchant, H. (2018). The synaptic properties of cells define the hallmarks of interval timing in a recurrent neural network. *Journal of Neuroscience*, 38, 4186-4199.
- [326] Pfeuty, M., Ragot, R., & Pouthas, V. (2003a). When time is up: CNV time course differentiates the roles of the hemispheres in the discrimination of short tone durations. *Experimental Brain Research*, 151, 3, 372-379.
- [327] Pfeuty, M., Ragot, R., & Pouthas, V. (2003b). Processes involved in tempo perception: a CNV analysis. *Psychophysiology*, 40, 1, 69-76.
- [328] Phelps, E. A., & LeDoux, J. E. (2005). Contributions of the amygdala to emotion processing: from animal models to human behavior. *Neuron*, 48, 2, 175-187.
- [329] Phillips-Silver, J., & Trainor, L. J. (2005). Feeling the beat: movement influences infant rhythm perception. *Science*, 308, 5727, 1430-1430.

- [330] Phillips-Silver, J., & Trainor, L. J. (2007). Hearing what the body feels: Auditory encoding of rhythmic movement. *Cognition*, 105, 3, 533-546.
- [331] Piaget, J. (1946). *La genèse du temps chez l'enfant*. Paris: Presses Universitaires de France.
- [332] Pickering, S. J. (2001). The development of visuo-spatial working memory. *Memory*, 9, 423-432.
- [333] Pineda, J. A., & Hecht, E. (2009). Mirroring and mu rhythm involvement in social cognition: are there dissociable subcomponents of theory of mind? *Biological Psychology*, 80, 3, 306-314
- [334] Piras, F., & Coull, J. T. (2011). Implicit, predictive timing draws upon the same scalar representation of time as explicit timing. *PLoS ONE*, 6, 3, e18203.
- [335] Pöppel, E. (1978). Time perception. *Perception*, 713-729.
- [336] Pouthas, V. (1985). Timing behavior in young children: A developmental approach to conditioned spaced responding, in J. Michon et J. Jackson (Edit.), *Time, mind and behavior*, Berlin, Springer- Verlag, 100-109.
- [337] Pouthas, V. (2008). Localization and Dynamics of Cerebral Activations Involved in Time Estimation: Studies Combining PET, fMRI, and EEG Data. *Advances in Cognitive Science*, 2, 224.
- [338] Pouthas, V., Droit S., Jacquet A. Y., & Wearden J. (1990). Temporal differentiation of response duration in children of different ages: Developmental changes in relations between verbal and nonverbal behavior. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 53, 21-31.
- [339] Praamstra, P., & Pope, P. (2007). Slow brain potential and oscillatory EEG manifestations of impaired temporal preparation in Parkinson's disease. *Journal of Neurophysiology*, 98, 5, 2848-2857.

- [340] Prinz, W. (1990). A common coding approach to perception and action. *Relationships between Perception and Action*, 167-201.
- [341] Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9, 2, 129-154.
- [342] Provasi, J. R. H. (1988). *Capacités et apprentissages de régulations temporelles chez le nourrisson dans l'activité de succion* (Doctoral dissertation).
- [343] Provasi, J., Anderson, D. I., & Barbu-Roth, M. (2014). Rhythm perception, production, and synchronization during the perinatal period. *Frontiers in Psychology*, 5, 1048.
- [344] Provasi, J., & Bobin-Bègue, A. (2003). Spontaneous motor tempo and rhythmical synchronization in 2 1/2- and 4-year-old children. *International Journal of Behavioral Development*, 27, 3, 220-231.
- [345] Provasi, J., & Bobin-Bègue, A. (2008). Régulation rythmique avant 4 ans: effet d'un tempo auditif sur le tempo moteur. *L'Année Psychologique*, 108, 4, 631-658.
- [346] Provasi, J., Doyère, V., Zélanti, P. S., Kieffer, V., Perdry, H., El Massioui, N., Brown, B. L., Dellatolas, G., Grill, J. & Droit-Volet, S. (2014). Disrupted sensorimotor synchronization, but intact rhythm discrimination, in children treated for a cerebellar medulloblastoma. *Research in Developmental Disabilities*, 35, 9, 2053-2068.
- [347] Provasi, J., Lemoine-Lardennois, C., Orriols, E., & Morange-Majoux, F. (2017). Do preterm infants perceive temporal synchrony? An analysis with the eye-tracking system. *Timing & Time Perception*, 5, 2, 190-209.
- [348] Rakitin, B. C., Gibbon, J., Penney, T. B., Malapani, C., Hinton, S. C., & Meck, W. H. (1998). Scalar expectancy theory and peak-interval timing in humans. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 24, 1, 15.
- [349] Rammsayer, T. (1989). Is there a common dopaminergic basis of time perception and reaction time? *Neuropsychobiology*, 21, 1, 37-42.

- [350] Ramus, F., Nespors, M., & Mehler, J. (1999). Correlates of linguistic rhythm in the speech signal. *Cognition*, 73, 3, 265-292.
- [351] Rattat, A. C. (2010). Bidirectional interference between timing and concurrent memory processing in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106, 145-162.
- [352] Rattat, A. C., & Droit-Volet, S. (2002). Le transfert d'un apprentissage de durée d'action chez le jeune enfant: l'effet facilitateur de la variété des actions? *Enfance*, 54, 2, 141-153.
- [353] Rattat, A. C., & Droit-Volet, S. (2005). La mémoire à long terme des durées: Fonctionnement et développement. *Psychologie Française*, 50, 99-116.
- [354] Rattat, A. C., & Droit-Volet, S. (2001). Variability in 5-and 8-year-olds' memory for duration: An interfering task in temporal bisection. *Behavioural Processes*, 55, 2, 81-91.
- [355] Rattat, A. C., & Droit-Volet, S. (2010). The effects of interference and retention delay on temporal generalization performance. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72, 1903-1912.
- [356] Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin and Review*, 12, 969-992.
- [357] Repp, B. H., & Keller, P. E., (2004). Adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization: effects of intention, attention, and awareness, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 57A, 499-521.
- [358] Repp, B. H., & Penel, A. (2004). Rhythmic movement is attracted more strongly to auditory than to visual rhythms. *Psychological Research*, 68, 4, 252-270.
- [359] Repp, B. H., & Su, Y. H. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006–2012). *Psychonomic Bulletin and Review*, 20, 403-452.

- [360] Rohenkohl, G., Coull, J. T., & Nobre, A. C. (2011). Behavioural dissociation between exogenous and endogenous temporal orienting of attention. *Plos ONE*, 6, 1, e14620.
- [361] Rosen, S. (1992). Temporal information in speech: acoustic, auditory and linguistic aspects. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 336, 367-373.
- [362] Rosenberg, E. L., & Ekman, P. (1995). Conceptual and methodological issues in the judgment of facial expressions of emotion. *Motivation and Emotion*, 19, 2, 111-138.
- [363] Rubia, K. (2013). Functional brain imaging across development. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 22 12, 719-731.
- [364] Rubia, K., Overmeyer, S., Taylor, E., Brammer, M., Williams, S. C. R., Simmons, A., ... & Bullmore, E. T. (2000). Functional frontalisation with age: mapping neurodevelopmental trajectories with fMRI. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 24, 1, 13-19.
- [365] Schachner, A. (2010). Auditory-motor entrainment in vocal mimicking species. *Communicative & Integrative Biology*, 3, 290-293.
- [366] Schlerf, J. E. R., Spencer, M. C., Zelaznik, H. N., & Ivry, R. B. (2007). Timing of rhythmic movements in patients with cerebellar degeneration. *The Cerebellum*, 6, 221-231.
- [367] Schubotz, R. I., Friederici, A. D., & Von Cramon, D. Y. (2000). Time perception and motor timing: A common cortical and subcortical basis revealed by fMRI. *Neuroimage*, 11, 1-12.
- [368] Schulze, H. H. (1989). Categorical perception of rhythmic patterns. *Psychological Research*, 51, 1, 10-15.
- [369] Schwartze, M., Rothermich, K., & Kotz, S.A. (2012). Functional dissociation of pre-SMA and SMA-proper in temporal processing. *Neuroimage*, 60, 290-298, 9.

- [370] Schweickert, R., Fortin, C., & Sung, K. (2007). Concurrent visual search and time reproduction with cross-talk. *Journal of Mathematical Psychology*, 5, 1, 99-12, 11.
- [371] Serrien, D. J., Sovijärvi-Spapé, M. M., & Rana, G. (2014). Developmental changes in motor control: Insights from bimanual coordination. *Developmental Psychology*, 50, 1, 316–323.
- [372] Shuler, M. G., & Bear, M. F. (2006). Reward timing in the primary visual cortex. *Science*, 311, 1606-1609.
- [373] Soares, S., Atallah, B. V., & Paton, J. J. (2016). Midbrain dopamine neurons control judgment of time. *Science* 354, 1273-1277.
- [374] Sowell, E. R., Delis, D., Stiles, J., & Jernigan, T. L. (2001). Improved memory functioning and frontal lobe maturation between childhood and adolescence: A structural MRI study. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 7, 312-322.
- [375] Spencer, R. M., Zelaznik, H. N., Diedrichsen, J., & Ivry, R. B. (2003). Disrupted timing of discontinuous but not continuous movements by cerebellar lesions. *Science*, 300, 5624, 1437-1439.
- [376] Staddon, J. E. R., & Higa, J. J. (1999). Time and memory: Towards a pacemaker-free theory of interval timing. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 71, 2, 215-251.
- [377] Stern, W. (1900). *Über psychologie der individuellen differenzen*. Leipzig, Germany: Verlag von Johann Ambrosius Barth.
- [378] Su, Y. H., & Pöppel, E. (2012). Body movement enhances the extraction of temporal structures in auditory sequences. *Psychological Research*, 76, 3, 373-382.
- [379] Taatgen, N., & van Rijn, H. (2011). Traces of times past: representations of temporal intervals in memory. *Memory & Cognition*, 39, 8, 1546-1560.

- [380] Tal, I., Large, E. W., Rabinovitch, E., Wei, Y., Schroeder, C. E., Poeppel, D., & Golumbic, E. Z. (2017). Neural Entrainment to the Beat: the “Missing Pulse” Phenomenon. *Journal of Neuroscience*, 2500-16.
- [381] Tanj, J. (2001). Sequential organization of multiple movements: involvement of cortical motor areas. *Annual Review of Neurosciences*, 24, 631-651, 6.
- [382] Tartas, V. (2008). *La construction du temps social par l'enfant*, (Vol. 143). Peter Lang.
- [383] Tartas, V. (2010). Le développement de notions temporelles par l'enfant. *Développements*, 1, 17-26.
- [384] Teki, S., Grube, M., Kumar, S., & Griffiths, T. D. (2011). Distinct neural substrates of duration-based and beat-based auditory timing. *Journal of Neuroscience*, 31, 10, 3805-3812.
- [385] Thelen, E. (1979). Rhythmical stereotypies in normal human infants. *Animal Behaviour*, 27, 699-715.
- [386] Thomson, J. M., & Goswami, U. (2008). Rhythmic processing in children with developmental dyslexia: auditory and motor rhythms link to reading and spelling. *Journal of Physiology*, 102, 1-3, 120-129.
- [387] Thompson, E. C., White-Schwoch, T., Tierney, A., & Kraus, N. (2015). Beat synchronization across the lifespan: intersection of development and musical experience. *PloS one*, 10, 6.
- [388] Tierney, A. T., & Kraus, N. (2013). The ability to tap to a beat relates to cognitive, linguistic, and perceptual skills. *Brain and Language*, 124, 3, 225-231.
- [389] Tierney, A., Kraus, N., (2015). Neural entrainment to the rhythmic structure of music. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27, 400-408.

- [390] Timmann, D., Watts, S., & Hore, J. (1999). Failure of cerebellar patients to time finger opening precisely causes ball high-low inaccuracy in overarm throws. *Journal of Neurophysiology*, 2, 103-114.
- [391] Trehub, S. E., Trainor, L. J., & Unyk, A. M. (1993). Music and speech processing in the first year of life. *Advances in Child Development and Behavior*, 24, 1-35.
- [392] Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the "internal clock". *Psychological Monographs: General and Applied*, 77, 13, 1.
- [393] Treisman, M. (2013). The information-processing model of timing (Treisman, 1963): Its sources and further development. *Timing & Time Perception*, 1, 2, 131-158.
- [394] Treisman, M., Faulkner, A., Naish, P. L., & Brogan, D. (1990). The internal clock: Evidence for a temporal oscillator underlying time perception with some estimates of its characteristic frequency. *Perception*, 19, 6, 705-742.
- [395] Triviño, M., Arnedo, M., Lupiáñez, J., Chirivella, J., & Correa, Á. (2011). Rhythms can overcome temporal orienting deficit after right frontal damage. *Neuropsychologia*, 49, 14, 3917–3930.
- [396] Troche, S. J., & Rammsayer, T. H. (2009). The influence of temporal resolution power and working memory capacity on psychometric intelligence. *Intelligence*, 37, 5, 479-486.
- [397] Van Wassenhove, V. (2009). Minding time in an amodal representational space. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364, 1525, 1815-1830.
- [398] Van Rijn, H. (2016). Accounting for memory mechanisms in interval timing: a review. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 245-249.

- [399] Van Rijn, H., Kononowicz, T. W., Meck, W. H., Ng, K. K., & Penney, T. B. (2011). Contingent negative variation and its relation to time estimation: a theoretical evaluation. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 5, 91.
- [400] Vierordt, K. (1868). *Der Zeitsinn nach Versuchen*. Tübingen, Germany: Laupp.
- [401] Walter, W. G. (1964). Contingent negative variation: an electric sign of sensori-motor association and expectancy in the human brain. *Nature*, 230, 380-384.
- [402] Wearden, J. H. (1992). Temporal generalization in humans. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 18, 134-144.
- [403] Wearden, J.H. (2005). Origines et développement des théories d'horloge interne du temps psychologique. *Psychologie Française*, 50, 1, 7-25.
- [404] Wearden, J. H. (2016). *The psychology of time perception*. Springer.
- [405] Wearden, J. H., & Ferrara, A. (1995). Stimulus spacing effects in temporal bisection by humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48, 4, 289-310.
- [406] Wearden, J. H., & Ferrara, A. (1996). Stimulus range effects in temporal bisection by humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, Section B*, 49, 1, 24-44.
- [407] Wearden, J. H., & Grindrod, R. (2003). Manipulating decision processes in the human scalar timing system. *Behavioural Processes*, 61, 47-56.
- [408] Wearden, J. H., & Lejeune, H. (2008). Scalar properties in human timing: conformity and violations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61, 4, 569-587.
- [409] Wearden J. H, & Penton-Voak, I. S. (1995). Feeling the heat: Body temperature and the rate of subjective time, revised. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48B, 2, 129-141.
- [410] Wearden, J. H., Smith-Spark, J. H., Cousins, R., Edelstyn, N. M .J., Cody, F. W. J., & O'Boyle, D. J. (2008). Effect of click trains on duration estimated by people with Parkinson's disease. *Brain and Cognition*, 67, 3, 264-279.

- [411] Weinberg, H., Walter, W. G., Cooper, R., & Aldridge, V. J. (1974). Emitted cerebral events. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 36, 449-456.
- [412] Whitaker, S., Lowe, C. F., & Wearden, J. H. (2003). Multiple-interval timing in rats: Performance on two-valued mixed fixed-interval schedules. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 29, 4, 277.
- [413] Wieland, E. A., McAuley, J. D., Dilley, L. C., & Chang, S. E. (2015). Evidence for a rhythm perception deficit in children who stutter. *Brain and Language*, 144, 26-34
- [414] Wiener, M., & Kanai, R. (2016). Frequency tuning for temporal perception and prediction. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 1-6.
- [415] Wiener, M., Klotz, D., Turkeltaub, P. E., Hamilton, R. H., Wolk, D. A., & Coslett, H. B. (2012). Parietal influence on temporal encoding indexed by simultaneous transcranial magnetic stimulation and electroencephalography. *Journal of Neuroscience*, 32, 12258-12267.
- [416] Wiener, M., Matell, M. S., & Coslett, H. B. (2011). Multiple mechanisms for temporal processing. *Frontiers in Neuroscience*, 5, 31.
- [417] Wiener, M., Turkeltaub, P., & Coslett, H. B. (2010). The image of time: a voxel-wise meta-analysis. *Neuroimage*, 49, 1728-1740, 7.
- [418] Wing, A. M., & Kristofferson, A. B. (1973). Response delays and the timing of discrete motor responses. *Perception & Psychophysics*, 14, 1, 5-12.
- [419] Winkler, I., Háden, G. P., Ladinig, O., Sziller, I., & Honing, H. (2009). Newborn infants detect the beat in music. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 7, 2468-2471.
- [420] Wittmann, M. (2013). The inner sense of time: how the brain creates a representation of duration. *Nature Reviews Neuroscience*, 14, 3, 217.

- [421] Wittmann, M., Simmons, A. N., Aron, J. L., & Paulus, M. P. (2010). Accumulation of neural activity in the posterior insula encodes the passage of time. *Neuropsychologia*, 48, 10, 3110-3120.
- [422] Wittmann, M. (2015). Modulations of the experience of self and time. *Consciousness and Cognition*, 38, 172-181.
- [423] Wittmann, M., & van Wassenhove, V. (2009). The experience of time: neural mechanisms and the interplay of emotion, cognition and embodiment. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 364, 1525.
- [424] Xavier, J., Tilmont, E., & Bonnot., O. (2013). Children's synchrony and rhythmicity in imitation of peers : Toward a developmental model of empathy. *Journal of Physiology*, 107, 291-297.
- [425] Yarrow, K., Haggard, P., Heal, R., Brown, P., & Rothwell, J. C. (2001). Illusory perceptions of space and time preserve cross-saccadic perceptual continuity. *Nature*, 414, 302–305.
- [426] Yarrow, K., & Rothwell, J. C. E. (2003). Manual chronostasis: Tactile perception precedes physical contact. *Current Biology*, 13, 1134–1139.
- [427] Zakay, D. (1989). Subjective time and attentional resource allocation: An integrated model of time estimation. *Advances in Psychology*, 59, 365-397.
- [428] Zakay, D., & Block, R. A. (1996). The role of attention in time estimation processes. *Advances in Psychology*, 115, 143-164.
- [429] Zakay, D., & Block, R. A. (1998). New perspective on prospective time estimation. In V. De Keyser, G. d'Ydewalle, & A. Vandierendonck (Eds.). *Time and the dynamic control of behavior* (pp. 129-141). Ashland, OH, US: Hogrefe & Huber Publishers.

- [430] Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music: auditory–motor interactions in music perception and production. *Nature Reviews in Neuroscience*, 8, 7, 547.
- [431] Zélanti, P. & Droit-Volet, S. (2012). Auditory and visual differences in time perception? An investigation from a developmental perspective with neuropsychological tests. *Journal of Experimental Child Psychology*, 112, 296-311, 22.
- [432] Zélanti, P., & Droit-Volet, S. (2011) Cognitive abilities explaining age-related changes in time perception of short and long durations. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109, 143-157, 21.