



HAL
open science

Capacité de traitement temporel des durées courtes chez l'enfant entre 1 & 4 ans

Anne Bobin-Bègue

► **To cite this version:**

Anne Bobin-Bègue. Capacité de traitement temporel des durées courtes chez l'enfant entre 1 & 4 ans. Neurosciences [q-bio.NC]. Ecole pratique des hautes études - EPHE PARIS, 2002. Français. NNT : . tel-00111689

HAL Id: tel-00111689

<https://theses.hal.science/tel-00111689>

Submitted on 6 Nov 2006

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.

ECOLE PRATIQUE DES HAUTES ETUDES
Sciences de la Vie et de la Terre

Thèse de Doctorat
présentée par
Anne BOBIN-BÈGUE

Décembre 2002

CAPACITES DE TRAITEMENT TEMPOREL
DES DUREES COURTES
CHEZ L'ENFANT ENTRE 1 ET 4 ANS

Sous la direction de François JOUEN, directeur au LPBD (EPHE)
Et le tutorat de Joëlle PROVASI, maître de conférences au LPBD (EPHE)

Composition du jury :

Carolyn Drake	Laboratoire de Psychologie expérimentale, Université Paris 5 (rapporteur)
Sylvie Droit-Volet	Laboratoire de Psychologie Sociale de la Cognition, Université de Clermont-Ferrand (rapporteur)
Marie-Christine Lombard	Laboratoire de Physiopharmacologie de la Douleur, EPHE
Viviane Pouthas	Unité de Neurosciences Cognitives & Imagerie Cérébrale, Hôpital de la Salpêtrière



Laboratoire de PsychoBiologie du Développement (LPBD), EPHE
41, rue Gay-Lussac 75005 PARIS

REMERCIEMENTS

Avant d'entrer dans le vif du sujet, je tiens à exprimer tous mes remerciements à un certain nombre de personnes, sans qui cette thèse n'aurait pu être réalisée.

En premier lieu, je tiens évidemment à remercier tous les membres du jury qui ont consacré de leur temps à évaluer ce travail.

Cette thèse n'aurait pu être accomplie sans la confiance que m'a accordée Henriette Bloch lorsqu'elle m'a proposé ce sujet au sein de ce laboratoire, confiance qui m'a été renouvelée par la suite par François Jouen.

Mais ce travail est avant tout le résultat d'une collaboration étroite et complice avec Joëlle Provasi que je tiens à remercier très sincèrement pour sa disponibilité, son amitié (et sa bonne humeur) et bien entendu son aide en toute circonstance. Toutes ses qualités ont permis d'effectuer un travail parfaitement encadré, guidé et à l'origine de nombreux échanges.

Je souhaite aussi remercier Isabelle Carchon, Françoise Morange, Marianne Barbu-Roth, Marie-Thérèse David, Céline Leblond, Florence, Elsa et toutes les autres personnes qui ont fait ou qui font partie de ce laboratoire pour leur accueil et leur amitié ayant contribué à une atmosphère de travail motivante.

Ma gratitude va aussi vers Claude Kervella et Pierre Canet qui par leur soutien technique et leur aide ont permis à ce travail de bien débuter. Ce travail résulte aussi de la contribution des responsables des crèches et écoles maternelles sollicitées (Mme Gallois, M. Martin¹ et Mme Berruer²) ainsi que celles des parents et de leurs enfants ayant participé aux expériences. Merci particulièrement à Brigitte, Sylvie et Catherine que j'ai tellement souvent dérangées dans leurs activités de classe mais surtout je tiens à les remercier pour leur participation active et enthousiaste. Je n'oublie pas toutes les personnes de ces structures qui m'ont toujours très bien accueilli.

Enfin je pense aussi à toutes les personnes de mon entourage, et mon mari Christophe avant tout, mes parents, mon frère Pierre, Marianne, Clotilde, ma belle-famille et tous mes amis pour leur soutien.

¹ Ecole maternelle St Jacques, Paris 5^{ème}

² Crèche de Marly le Roi

RESUME

La dimension temporelle est fondamentale pour la vie des organismes vivants. En l'absence d'organe dédié à la perception de cette grandeur physique, comment ces organismes parviennent à extraire cette information de leur milieu. Les connaissances actuelles permettent de catégoriser différents modes de traitement temporel en fonction de l'échelle de temps à évaluer. Les durées les plus communément traitées sont les durées dites courtes (inférieures à l'heure). Il existe au sein de ces durées courtes une distinction relative au mode de traitement : perception et estimation de la durée. La perception de la durée concerne les durées inférieures à la seconde et consiste à extraire des informations perçues de l'environnement pendant ce présent subjectif une représentation mentale de cette durée qui pourra être exploitée par l'individu. Les données de la littérature convergent en faveur d'un mécanisme central de traitement possédant à sa source une base de temps. De nombreuses expériences ont permis de déterminer les caractéristiques psychophysiques et neurobiologiques du fonctionnement de cette horloge interne. Ces informations ont permis l'élaboration de modèles théoriques plus ou moins aboutis. Les connaissances actuelles sont synthétisées dans une première partie de ce document. Elles permettent notamment de mettre en évidence des lacunes et des contradictions quant à la mise en place de ce système de traitement au cours de la petite enfance.

Selon un modèle développemental, le traitement temporel repose sur une période de référence. La sensibilité du système de traitement temporel serait meilleure pour des durées proches de cette période endogène particulière. Compte-tenu des ambiguïtés soulevées par les données de la littérature, nous nous sommes attachés à étudier ces paramètres du traitement temporel (période de référence et seuil de sensibilité) chez les enfants entre 1 et 4 ans par des tâches de perception et de production. Nos résultats ont permis de déterminer les étapes développementales de la mise en place du système de traitement et d'énoncer de nouvelles hypothèses, valables pour cette période critique du développement psychomoteur, cognitif et neurobiologique, quant à ces paramètres fondamentaux. Ainsi, la période de référence, reflet de la base de temps de l'horloge, reste constante pendant la petite enfance mais gagnerait en stabilité. Parallèlement, un seuil de sensibilité deviendrait effectif. Il a été retrouvé à la fois lors de tâches de production et de perception et il ne permet pas de vérifier que le traitement est meilleur à proximité de la période de référence. Par contre, nos résultats suggèrent que ce seuil de sensibilité doit être considéré en valeur absolue et non en valeur relative.

SOMMAIRE

INTRODUCTION : LE TRAITEMENT DES DUREES COURTES

PARTIE 1 : REVUE DE LA RECHERCHE

1	SPECIFICITES DE L'ETUDE DU TRAITEMENT DES DUREES COURTES	6
1.1	Perception & estimation temporelle	6
1.2	Mode de traitement en unité perceptive	7
1.3	Relation entre perception et production de durées courtes	9
1.4	Les paramètres d'étude du traitement des durées courtes	10
1.5	Influence de la modalité sensorielle	11
2	DONNEES DE LA PSYCHOLOGIE EXPERIMENTALE ET LES ANALYSES PSYCHOPHYSIQUES	13
2.1	L'existence d'un rythme endogène : le Tempo Moteur Spontané	13
2.2	Perception et discrimination temporelle	17
2.3	Reproduction et synchronisation	23
2.4	Tâche de continuation	28
2.5	Informations apportées par l'étude de la variabilité	30
2.6	Interaction avec d'autres processus cognitifs	33
3	LES DONNEES NEUROLOGIQUES	37
3.1	Le cervelet	37
3.2	Les noyaux gris centraux	41
3.3	Le cortex	45
3.4	Les noyaux suprachiasmatiques	47
3.5	Les neurotransmetteurs	48
4	MODELES DU TEMPS PSYCHOLOGIQUE	52
4.1	Le multiple timer model (Ivry & Richardson, 2002)	53
4.2	Le striatal beat frequency model (Matell & Meck, 2000)	55
4.3	Le modèle développemental issu de la Théorie de l'Attention Dynamique (Drake, Jones & Baruch, 2000)	57
5	BILAN & PROBLEMATIQUE	60
5.1	Synthèse sur le mécanisme de traitement des durées courtes	60
5.2	Caractéristiques et sensibilité du traitement des durées courtes	61
5.3	Questions relatives au fonctionnement de l'horloge avant 4 ans	63

PARTIE 2 : CONTRIBUTION EXPERIMENTALE

1	DEVELOPPEMENT DES CAPACITES PERCEPTIVES DES ENFANTS ENTRE 3 ET 4 ANS : ETUDE DE LA DISCRIMINATION DE TEMPO	70
1.1	Méthode	73
1.2	Résultats	77
1.2.1	Adéquation du protocole	77
1.2.2	Evolution des performances au cours des séances	78
1.2.3	Comparaison des performances entre les séances	79
1.2.4	Comparaison des groupes d'âge	79
1.2.5	Comparaison des performances de chaque groupe d'âge en fonction des séances	81
1.3	Discussion	81
2	DEVELOPPEMENT DES CAPACITES DE PRODUCTION D'INTERVALLES RAPIDES ENTRE 1 ET 4 ANS : INFLUENCE DE STIMULATIONS RAPIDES	87
2.1	Méthode	91
2.2	Résultats	96
2.2.1	Analyses statistiques	96
2.2.2	Absence d'influence de la démonstration par l'expérimentateur	96
2.2.3	Analyse du TMS et de sa variabilité	97
2.2.4	Etude de la médiane réduite des IRI	98
2.2.5	Etude de la variabilité	104
2.2.6	Analyse du renforcement	108
2.3	Discussion	112
3	DEVELOPPEMENT DES CAPACITES DE PRODUCTION D'INTERVALLES LENTS ENTRE 1 & 4 ANS : INFLUENCE DE STIMULATIONS LENTES	119
3.1	Méthode	120
3.2	Résultats	122
3.2.1	Absence d'influence de la démonstration	122
3.2.2	Analyse du TMS et de sa variabilité	122
3.2.3	Etude de la médiane réduite des IRI	124
3.2.4	Etude de la variabilité intra-individuelle	127
3.2.5	Analyse du renforcement	132
3.3	Discussion	133
4	COMPARAISON ENTRE LES SEANCES A ET R	139
4.1	Absence d'effet de l'ordre de passage des séances	139
4.2	TMS1	139
4.3	Comparaison des TMS2	141
4.4	Comparaison pour les 2 séances du premier essai de synchronisation avec le TMS initial	141
4.5	Comparaison de la médiane des IRI pendant la phase de synchronisation	142
4.6	Comparaison de la variabilité au cours de la phase de synchronisation	143
4.7	Comparaison du renforcement	145
4.8	Bilan	146

PARTIE 3 : DISCUSSION GENERALE, CONCLUSIONS & PERSPECTIVES EXPERIMENTALES

1	DISCUSSION GENERALE	150
1.1	Evolution de la période de référence entre 1 et 4 ans	150
1.2	Seuil de sensibilité du fonctionnement de l'horloge	157
1.3	Analyse du fonctionnement du système de traitement	159
1.4	Influence sur le rythme endogène	161
1.5	Interactions avec d'autres paramètres	162
2	CONCLUSIONS	164
3	PERSPECTIVES DE RECHERCHES	167

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

INDEX DES TABLEAUX

INDEX DES ILLUSTRATIONS

INTRODUCTION

La 4^{ème} dimension de notre univers reste à l'heure actuelle la plus énigmatique. Sans aborder les considérations philosophiques, cette dimension est indispensable à l'appréhension des 3 autres qui constituent l'espace. Sans temps, il ne peut y avoir mouvement, ni changement d'état et la conséquence la plus basique serait un univers figé ; il va sans dire que les implications seraient en fait inconcevables. Le temps, parce qu'il fait partie intégrante de tous les phénomènes physico-chimiques, est aussi fondamental dans la vie des organismes. Chaque organisme expérimente ainsi en permanence les modifications de son environnement. L'intégration de l'information temporelle permet à l'organisme d'adapter son comportement à son environnement. Une souris s'étant camouflée à la vue d'un danger potentiel va devoir laisser s'écouler un délai optimal pour sa survie avant de poursuivre sa quête de nourriture. La question essentielle est alors de savoir par quels moyens un organisme est capable d'extraire ce type d'information. Il n'existe aucune grandeur physique autre que le temps lui-même pour appréhender cette dimension. Ainsi, cette extraction ne peut se faire qu'à partir des informations perçues par les sens, suivie par un traitement spécifique au niveau central. Le temps apparaît comme une dimension impalpable et pourtant fondamentale à prendre en compte pour un organisme.

L'information temporelle peut être de 2 natures : elle concerne soit l'ordre des événements (Carr & Wilkie, 1997 ; Wittman, 1999), soit leur durée. Cette dernière caractéristique est particulièrement intéressante. Une durée n'est informative que si elle peut être comparée de façon relative ou absolue à d'autres durées de référence. Au quotidien, cette nécessité correspond à la question de savoir à partir de quel moment il n'est plus nécessaire d'attendre un événement, comme par exemple l'arrivée d'un ascenseur après avoir appuyé sur le bouton d'appel. Dans cet exemple, même en l'absence de signe perceptible de modification de notre environnement immédiat, nous sommes capables de juger que le délai usuel est écoulé et de conclure que l'ascenseur est probablement en panne. Sans multiplier ici les exemples, cette capacité est utilisée de façon permanente et ce pour des durées très variables.

Une caractéristique de cette dimension est d'ailleurs l'étendue des échelles de temps. Elles sont très nombreuses et pour notre quotidien, elles s'étendent de la fraction de seconde lorsque nous arrivons à rattraper un verre en train de tomber, à quelques secondes qui fait que nous savons que nous pouvons traverser la route devant cette voiture qui arrive, à quelques

minutes qui nous permettent d'enclencher la première vitesse juste avant que le feu ne passe au vert. Au partir de durées de l'ordre de l'heure, les points de repère tels que la luminosité prennent le relais, et le jugement temporel ne découle plus uniquement de ce que nous percevons. Et si nous nous réveillons juste avant la sonnerie du réveil, c'est par le mécanisme spécifique de notre horloge circadienne qui cale nos activités physiologiques à l'échelle de la journée. Le traitement des durées circadiennes et des durées ultradiennes, que nous appellerons durées courtes (allant jusqu'à plusieurs minutes), présente des caractéristiques différentes. Le traitement des durées courtes est en effet moins précis relativement au traitement circadien, mais il est par contre bien plus flexible (Meck, 1996). Il suffit de penser aux conséquences d'un décalage horaire. Notre horloge circadienne possède une forte inertie, qui la rend longue à s'adapter. Par contre, elle est précise : si nous nous réveillons avec une précision inférieure à 10 minutes par rapport à l'heure du réveil, alors cette horloge circadienne possède une marge d'erreur inférieure à 0,5% ! A l'inverse, nous sommes capables de juger n'importe quelle durée courte, mais avec une erreur relative plus importante. Une heure à patienter dans la salle d'attente du médecin sera évaluée avec une erreur de quelques minutes, soit de l'ordre de 10%. Il s'agit de 2 mécanismes de traitement bien différents, chacun faisant l'objet d'études spécifiques.

Parmi ces 2 échelles de temps, les durées courtes sont celles que notre cerveau traite en permanence à partir d'une multitude d'informations qu'il perçoit. Intuitivement, il est facile d'imaginer que les processus de mémorisation, l'expérience, les stratégies cognitives ou même l'attention interviennent dans la quantification de durées et particulièrement celles supérieures à quelques secondes. La mémorisation, qu'elle soit à long ou à court terme, intervient systématiquement lorsqu'il s'agit d'expérimenter une durée très usuelle (le moment où la bouilloire va siffler) mais aussi lorsque dans une situation plus inédite vous devez comparer 2 délais, l'un servant de référence à l'autre (lors de l'attente à un arrêt de bus, vous comparez le délai qui s'écoule entre 2 bus successifs pour 2 lignes différentes). Un joueur de tennis expérimenté saura évaluer le moment où la balle, arrivant à grande vitesse, va arriver sur lui et se placera en conséquence pour la renvoyer de façon à marquer le point ; ce type de tâches ne peut être réalisé avec la même précision chez un débutant. Ces 2 exemples illustrent le fait que l'expérience puisse améliorer l'évaluation des durées. Par ailleurs, les stratégies cognitives prennent facilement le relais d'un traitement intuitif. Le comptage est la stratégie la plus évidente, comme dans le cas de l'exécution d'une instruction du type « attendre 5 secondes ». Il ne faut pas oublier les stratégies indirectes, comme de se référer à la densité de personnes à attendre sur le quai pour juger que le métro est en retard. Enfin, il est aussi facile

de mesurer l'influence des phénomènes attentionnels. Ce feu de circulation en sortant de chez vous, vous paraît terriblement long le jour où vous êtes très en retard ; dans ce cas, votre attention est complètement dédiée au délai du feu. A l'opposé, une émission de radio intéressante fera paraître votre trajet quotidien plus court que d'autres jours, parce que votre attention a été partagée. L'évaluation d'une durée apparaît donc comme le résultat d'un ensemble de phénomènes complexes où des processus additionnels peuvent prendre le relais ou concurrencer notre évaluation directe, intuitive.

Cependant, si les durées sont beaucoup plus courtes (quelques centaines de millisecondes), les traitements parallèles cités ci-dessus ne disposent pas d'assez de temps pour être exécutés. Il ne nous est absolument pas possible de compter pour évaluer ces durées. Or, nous sommes tout à fait capables de déterminer précisément ce type de durées courtes : les spectateurs lors d'un rappel applaudissent de façon parfaitement synchronisée ; il est facile aussi de battre la mesure, que se soit avec le pied ou avec la main, d'une musique, même inconnue. Dans ce cas, l'évaluation est donc le résultat d'un traitement direct des informations : nous mettons en œuvre uniquement le processus mental à la base de nos jugements temporels. Ce processus correspond à un mécanisme capable de mesurer le temps entre 2 événements qui marquent le début et la fin de la durée. Ce processus est donc assimilable formellement à une **horloge interne**, avec à sa source un mécanisme de chronométrage. Elle doit donc posséder une base de temps, des événements qui se produisent à intervalles réguliers, qui permettent à l'horloge de quantifier le temps écoulé. Cette vue est actuellement la plus répandue mais d'autres hypothèses alternatives existent. Ce mécanisme de base est complété par des mécanismes périphériques permettant l'acquisition et le traitement des informations sensorielles tout autant que l'exécution de comportements.

Pour comprendre comment nous sommes capables de traiter ces durées, **l'objectif premier est d'élucider le fonctionnement propre de ce système de traitement**. Des études sont menées depuis longtemps pour préciser nos capacités à percevoir et à produire des durées brèves et à en modéliser les processus. Parallèlement, d'autres études visent à identifier les mécanismes et les structures biologiques de ces processus. Expérimentalement, les durées très courtes sont privilégiées car elles présentent l'avantage de minimiser les artefacts (Church, 1997) en limitant les processus parallèles comme les stratégies cognitives (telle que le comptage). Par ailleurs, puisque les durées sont courtes, il faut tenir compte du fait que les performances mesurées sont très dépendantes des techniques d'études : l'émergence de l'informatique a permis d'obtenir des données plus en plus précises. Enfin, la compréhension

de ces processus de traitement ne peut se faire sans intégrer les données neurologiques. L'ensemble des données doit aboutir à l'élaboration de modèles devant avoir une réalité biologique.

Un autre point fondamental est de s'intéresser au **développement des compétences du traitement temporel au cours des premières années de la vie**. Les études montrent que nos capacités d'évaluation des durées courtes varient sensiblement au cours de notre vie d'adulte (Vanneste, 1996 ; Vanneste, Pouthas & Wearden, 2001) mais aussi et surtout pendant l'enfance. La notion de temps mets plusieurs années à être assimilée explicitement (Droit-Volet, 2000). Mais, dès les premières années de la vie, le cerveau de l'enfant est capable de traiter l'information temporelle intuitivement ne serait-ce que par son comportement. Quel est le profil d'évolution des compétences ? Quelle est l'aptitude développée en premier ? Avec quelle précision l'enfant traite-t-il l'information de durée ? Si les connaissances concernant l'adulte permettent de construire un modèle de fonctionnement de l'horloge, les données développementales apportent des informations complémentaires. Hormis la détermination propre des compétences de l'enfant, elles conduisent pour l'essentiel à décrire la chronologie de la mise en place des différents processus et à faire un parallèle avec la maturation des structures cérébrales impliquées. Ces informations conduisent aussi à préciser les hypothèses sur le fonctionnement de l'horloge.

Le travail expérimental présenté ici s'intéresse directement au développement fonctionnel du système de traitement des durées courtes. L'objectif est d'apporter des données sur les capacités de traitement temporel des jeunes enfants. Ces toutes premières années de la vie ont été très peu étudiées alors même qu'au cours de cette période s'élabore l'essentiel du développement cognitif et psychomoteur. L'intérêt et les implications de ce travail expérimental seront précisés dans une première partie de cet ouvrage consacrée à une revue des connaissances actuelles.

PARTIE 1

Revue de la littérature

1 Spécificités de l'étude du traitement des durées courtes

Comme il vient de l'être mentionné, l'évaluation du temps qui s'écoule est de nature complexe. Le sujet de cette étude est de participer à la compréhension du traitement des durées courtes. En conséquence, ce premier paragraphe est destiné à décrire les caractéristiques et les limites propres à l'étude du traitement des durées courtes.

1.1 Perception & estimation temporelle

Spontanément, nous faisons une distinction entre 2 échelles de durées courtes. Ainsi, pour les durées de plusieurs minutes, nous disons « combien de temps estimez-vous avoir à passer pour lire ce document ? » alors que pour les durées plus brèves, nous disons plutôt « j'ai perçu ce son pendant une fraction de seconde ». A partir de ce type de constatations, Fraisse (1948) a défini une catégorisation : « La durée est dite perçue lorsque nous croyons saisir du même coup ses limites et tous les événements qui la remplissent » (page 199) renvoyant à la notion de présent subjectif (James, 1890 ; Wundt, 1911 cité dans Szelag, Kowalska, Rymarczyk & Pöppel, 2002). Lorsque la durée dépasse la limite ainsi définie, la durée est estimée. Pour la mesurer sans instrument, il nous est indispensable, toujours selon Fraisse, de recourir à des moyens indirects et de faire appel à notre expérience : position du soleil, sensation de faim ou de fatigue, impatience lors d'une attente ou sensation de brièveté d'une activité de loisir.

La limite entre perception et estimation se situe pour de nombreux auteurs autour de quelques secondes, 1 à 3 secondes le plus souvent (Block, 1990 ; Fraisse, 1984 ; Pöppel, 1978, 1994, 1997), bien que la limite maximum postulée ait été 7 à 8 secondes (Fraisse, 1948 et pour une revue Wittmann, 1999). En se référant à la définition de Fraisse, il est difficilement envisageable que nous soyons capables d'appréhender tous les événements remplissant une période de 7 secondes. Une démonstration simple consiste à compter seconde par seconde jusqu'à 7. Non seulement, nous mettons en œuvre une stratégie cognitive, mais les événements qui nous servent à compter sont indépendants et ne peuvent faire partie d'un même présent subjectif. **La limite entre durée perçue et durée estimée est donc plus probablement proche de la seconde.**

Cette distinction se matérialise expérimentalement. La loi de Vierordt (1868, cité dans Szelag & al., 2002) montre que les durées brèves sont surévaluées et les durées plus longues sont sous-évaluées, tandis que les durées de 2 à 3 secondes sont les mieux évaluées. Cette loi

souligne l'existence d'un seuil temporel pour lequel les phénomènes physiques et subjectifs à l'origine de ce biais s'équilibrent. Les protocoles expérimentaux s'intéressent soit à des durées de plusieurs centaines de millisecondes soit à des durées supérieures à la seconde et jusqu'à quelques minutes. Ces 2 types approches sont aussi corrélées au fait que lors de l'étude des durées les plus courtes, il est quasiment impossible que le sujet puisse biaiser sa réponse par l'intervention de stratégies cognitives (Church, 1997) ou par l'exécution de séquences comportementales calibrées (observé en particulier chez les animaux, mais aussi chez l'homme). La perception fait intervenir un minimum de processus cognitifs. La distinction entre l'étude de **la perception** et celle de **l'estimation temporelle** renvoie ainsi à des questions théoriques différentes qui **doivent être abordées expérimentalement par des études spécifiques**.

Cette catégorisation renvoie donc aussi à l'existence de 2 modes de traitement spécifiques. Une durée perçue est traitée comme un tout. Lorsqu'une durée est estimée, nous devons en plus mettre en œuvre des références comme indice de mesure et donc faire intervenir en complément des processus cognitifs (Rammsayer & Lima, 1991). Fraisse (1948) remarque que « tout se passe comme si la perception à mesure que la durée s'accroît devenait de plus en plus imprécise et comme si nous recourrions insensiblement aux moyens indirects de l'estimation » (p. 200). Compte-tenu de cette relative continuité et d'une frontière assez floue, il est envisageable que le même processus régisse l'ensemble du traitement des durées courtes. Une horloge interne serait l'instrument de base de la mesure de la durée. Avec l'augmentation de la durée à traiter, d'autres processus prendraient progressivement le relais et viendraient préciser le traitement réalisé par l'horloge interne. Pourtant, on ne peut exclure totalement la possibilité de 2 mécanismes indépendants. L'étude du traitement des durées courtes est donc soumise à cette ambiguïté. **La suite de cette revue privilégiera donc les études impliquant des durées inférieures à la seconde dans la mesure où elles permettent d'approcher au mieux le mode de traitement des durées courtes.**

1.2 Mode de traitement en unité perceptive

Les durées perçues sont donc limitées à une durée maximum d'une seconde et sont analysées comme un tout, appartenant à notre présent subjectif. La quantification d'une durée requiert par ailleurs l'analyse des informations issues de l'environnement, ne serait-ce que pour identifier les événements qui délimitent cette durée. Dès lors, comment arrivons-nous à traiter

du même coup un ensemble d'informations pour en extraire une évaluation d'une durée perçue ?

Stroud (1955, cité dans Burle & Bonnet, 1997) a émis l'hypothèse que le système sensoriel segmente le flot continu d'informations en épisodes perceptifs. Dans ce délai, les événements successifs sont vus comme appartenir à un même groupe temporel, quels que soient leur niveau d'organisation ou leur modalité. Au-delà de la limite de cette fenêtre temporelle (Fraisse, 1957), ils sont traités comme des événements isolés, même s'ils se produisent périodiquement (Fraisse, 1957 ; Povel, 1981).

La fenêtre temporelle qui délimite ce traitement en épisodes ou unités perceptives possède certaines caractéristiques qui ont pu être déterminées expérimentalement. Ainsi, pour un même type de tâche, l'étendue de la fenêtre temporelle est relativement stable au cours du développement, tout au moins à partir de 6 ans (Szelag & al., 2002). Toutefois, les capacités de traitement temporel au sein de cette fenêtre temporelle est lui dépendant du développement cognitif et donc de l'âge (Szelag & al., 2002). Ces caractéristiques sont fondamentales dans la mesure où elles suggèrent que lors d'une étude développementale, les résultats expérimentaux puissent être comparés entre eux et que **les interprétations de ces résultats ne sont pas liées à la quantité d'information perçues mais bien aux spécificités développementales du traitement temporel.**

Pour être traitées, les informations sont incorporées dans une **mémoire de travail**. Cette zone tampon maintient transitoirement les informations acquises. Les processus de traitement supérieurs (codage, analyse) ont ainsi accès à ces informations tant qu'elles y sont maintenues (Preusser, 1972). Les nouvelles informations remplaceraient progressivement les anciennes au fur et à mesure qu'elles sont perçues.

Ce système présente l'avantage de ne pas générer de surcharge mnésique et de permettre une analyse efficace de l'information. En comparaison, si les informations étaient stockées de façon indépendante et cumulative, le traitement des informations en temps réel nécessiterait une importante capacité de mémorisation et serait moins efficace du fait des délais successifs de transduction et de traitement. Le groupement des informations perçues en unité perceptive permet non seulement une analyse au sein d'une même unité mais aussi entre unités (Lashley, 1951, cité dans Drake, 1998). Une telle organisation qui optimise les ressources est donc tout à fait cohérente avec la fugacité et la complexité des informations à traiter. Le même type de segmentation temporelle, en unité perceptive, a été démontrée dans différents types de tâche nécessitant une intégration temporelle, comme la parole, la synchronisation sensorimotrice ou

encore des tâches perceptives et cognitives (Szelag & al., 2002). Cette convergence renforce l'hypothèse que des processus neuraux communs contrôlerait la perception, l'action et la parole (Szelag & al., 2002).

La compréhension de la perception des durées nécessite en premier lieu d'étudier ce mode de traitement en unités perceptives. **L'étude des durées inférieures à la seconde apparaît donc prioritaire pour élucider ce mode de traitement particulier.**

1.3 Relation entre perception et production de durées courtes

Empiriquement, postuler un mécanisme de traitement temporel commun entre la perception et l'action n'est pas illusoire. Une très bonne illustration est la performance des musiciens capables de reproduire des schémas rythmiques qu'ils ont préalablement entendus. Ces musiciens possèdent une représentation mentale de l'information temporelle. Elle est créée à partir des informations perçues lors de l'acquisition du schéma rythmique. Elle leur permet d'élaborer un programme moteur nécessaire à toutes productions motrices. **Cette représentation mentale constitue un lien entre perception et production de la durée.**

Toutes les études expérimentales convergent en faveur d'un **mécanisme commun responsable de la perception et de la production des durées courtes** (par exemples : Fraisse, 1963 ; Michon, 1967 ; Keele, Pokorny, Corcos & Ivry, 1985 ; Summer, Bell & Burns, 1989 ; Treisman, Faulkner & Naish, 1992 ; Ivry & Hazeltine, 1995). Dans une tâche de perception, la durée est extraite à partir des informations sensorielles afférentes. La réponse à cette tâche dépend uniquement de l'information temporelle perçue et n'engage pas de processus supplémentaire. **L'étude de la perception des durées est donc un moyen fiable d'avoir accès à la représentation mentale des sujets.** Dans une tâche de production d'une durée, le sujet doit le plus souvent se construire une représentation mentale de la durée pour pouvoir ensuite la produire. L'exécution de la tâche de production implique nécessairement des processus temporels. La réponse va donc être dépendante et de la performance de perception du sujet, et de sa performance d'exécution. Pour comprendre comment le cerveau parvient à mesurer une durée, l'approche perceptive apparaît la plus directe. Cependant, **les tâches de production présentent des avantages pratiques qui tiennent essentiellement à la simplicité des tâches expérimentales.** Notamment, elles sont bien adaptées à l'étude du traitement temporel chez les jeunes enfants chez qui la notion de temps n'est maîtrisée que tardivement (Droit-Volet, 2000).

La représentation mentale de la durée peut donc être analysée au travers de tâches de production ou de perception selon la question posée.

1.4 Les paramètres d'étude du traitement des durées courtes

Il convient ici de spécifier les paramètres dont vont dépendre les études expérimentales. Une durée est caractérisée par la durée de l'événement (au sens large) qui la constitue mais aussi par sa date d'arrivée par rapport aux autres événements perçus dans la fenêtre temporelle. Ces informations ne sont pas les seules à être pertinentes et un certain nombre de paramètres peuvent influencer la perception.

Ainsi, pour les durées courtes, il apparaît qu'**un intervalle dit vide**, c'est-à-dire délimité par 2 signaux, **est perçu plus précisément** qu'un intervalle dit plein (un signal continu) (Grondin, Meilleur-Wells, Oulette & Macar, 1998). D'autre part, compte-tenu de la brièveté des durées à étudier, l'utilisation de plusieurs intervalles successifs plutôt qu'un intervalle unique est plus approprié. En effet, il a été montré que **les performances du traitement temporel sont d'autant plus précises que le nombre d'intervalles augmentent**. Selon le modèle d'observations multiples de Drake & Botte (1993), le sujet affine la trace mnésique de la durée de l'intervalle en moyennant les intervalles successifs et en déterminant un indice de leur dispersion, plutôt que de garder en mémoire la durée de chaque intervalle successif. **Les séquences isochrones appelées tempi sont donc le moyen privilégié pour étudier le traitement temporel des durées courtes.**

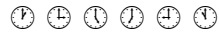
Les tempi sont caractérisés par leurs propres paramètres. Le principal est l'intervalle entre 2 stimuli successifs (noté ISI pour Inter Stimuli Interval) qui définit la durée étudiée : un tempo d'ISI de 300 ms ou plus simplement de 300 ms correspond à un stimulus qui se reproduit à l'identique toutes les 300 ms. Le stimulus définit ainsi un intervalle vide dont la durée est de 300 ms et qui est répété à plusieurs reprises. Seul ce paramètre d'ISI est discriminant ; ni la durée des stimuli, dans la mesure où elle est suffisamment différente de celle des intervalles, et donc ni la durée qui sépare la fin d'un stimulus du début d'un autre, ni même la durée totale de la séquence n'interviennent dans les performances du sujet (Drake & Botte, 1993 ; Schultze, 1989 ; Vos, Mates & van Kruysbergen, 1995). Il est à noter que par contre, dans un contexte d'étude de séquences rythmiques ou musicales, c'est-à-dire où la durée entre les événements n'est plus la seule caractéristique pour définir la séquence, d'autres paramètres peuvent influencer la perception, comme la hauteur des sons, le type de fin de la séquence ou les accents musicaux (Boltz, 1992, 1995, 1998).

Compte-tenu de la plus grande facilité de traitement des durées lorsqu'elles sont présentées sous forme de tempo, ce type de séquence isochrone est l'outil expérimental qui apporte le plus d'informations précises sur les capacités de traitement temporel et donc sur le mode de fonctionnement de la perception de la durée. La très grande majorité **des résultats expérimentaux qui seront présentés dans cette partie et tous ceux qui ont été utilisés dans nos études expérimentales sont basés sur l'utilisation de tempi.**

1.5 Influence de la modalité sensorielle

En l'absence d'organe dédié à la perception du temps (comme les yeux pour la vue, la langue pour le goût, etc...), l'information temporelle est extraite à partir des informations sensorielles disponibles. La question est de savoir si toutes les modalités sensorielles, et essentiellement la vision et l'audition, permettent des perceptions équivalentes entre elles. La précision de la perception est fondamentale pour comprendre précisément quelles sont les capacités du système central de l'horloge afin de pouvoir en modéliser son fonctionnement. **La modalité sensorielle utilisée pour les études expérimentales est donc un facteur à prendre en compte.**

Le temps de transduction d'une information varie d'une modalité à l'autre : alors que les cellules ciliées de l'audition transmettent le signal en 0,1 ms, les photorécepteurs de la rétine mettent 10 à 50 ms (Torre, Ashmore, Lamb & Menini, 1995). Comme nous nous intéressons à des durées courtes, ces différences de temps de transduction au niveau périphérique ont donc des conséquences sur le temps de traitement global. La réponse du sujet enregistrée expérimentalement dépend donc de la modalité utilisée. Ainsi par exemple, 2 événements auditifs successifs seront perçus comme distincts s'ils sont séparés dans le temps par environ 17 ms. Pour 2 événements perçus par le système somesthésique, il faudra qu'ils soient séparés par 2 fois plus de temps, et 4 fois plus de temps lorsqu'ils sont perçus par le système visuel (Artieda & Pastor, 1996). Dans cette tâche, la résolution temporelle en modalité auditive est donc nettement supérieure à celle des autres modalités et les résultats expérimentaux en seront d'autant plus précis. Cette plus grande précision de la modalité auditive par rapport à la modalité visuelle a été confirmée dans d'autres types de tâches temporelles, en particulier en discrimination (Grondin & al., 1998 ; Drake & Botte, 1993). **L'étude précises du traitement des durées courtes est donc optimale lorsque les stimulations sont auditives.**



En résumé, pour comprendre comment nous sommes capables d'évaluer les durées courtes, **les études expérimentales doivent prendre en compte 3 aspects.**

En premier lieu, il existe une frontière entre les durées perçues et les durées estimées qui se situe autour de 1 seconde. Lors de la perception d'une durée, notre cerveau intègre sous forme d'unité perceptive les informations perçues par notre système sensoriel. Au-delà de cette limite, les mécanismes perceptifs qui nous permettent de chronométrer une durée sont relayés par d'autres mécanismes, dont l'importance relative est encore indéterminée. Les recherches expérimentales doivent donc donner la priorité à **l'étude du traitement des durées inférieures à la seconde.**

En second lieu, pour obtenir des données précises sur nos capacités de traitement, il est indispensable de réunir les conditions expérimentales adéquates. Tout d'abord, pour que le sujet perçoive le plus précisément possible une durée fixée, les études montrent que les durées doivent correspondre à des intervalles vides, c'est-à-dire délimité par 2 événements courts et que cet intervalle doit être répété. **Le meilleur outil est donc un tempo.**

Enfin, toujours dans l'objectif d'obtenir des données précises, **la modalité auditive est la plus appropriée.** La large majorité des études présentées ci-après concerne donc des tempi auditifs. Cet outil expérimental privilégié a permis de mettre en évidence les caractéristiques psychophysiques du traitement des durées.

2 Données de la psychologie expérimentale et les analyses psychophysiques

Les études de psychologies expérimentales ont permis de mettre en évidence les performances du traitement temporel relativement à différentes catégories de compétences et de tâches temporelles. Ce paragraphe aborde ces capacités de traitement et souligne les informations qu'elles apportent sur le fonctionnement formel du système de traitement.

2.1 L'existence d'un rythme endogène : le Tempo Moteur Spontané

Sans revenir sur l'omniprésence des rythmicités dans notre quotidien, force est de constater que nous sommes capables de produire des séquences temporelles d'une régularité remarquable, sans aucun indice extérieur, et ce dès le plus jeune âge (Pouthas, Provasi & Droit, 1996). **Notre système de traitement des durées courtes possède donc, dès la naissance, une base de temps** qui lui permet de générer ces intervalles comportementaux très réguliers. Les particularités de cette aptitude peuvent être étudiées au travers d'une tâche spécifique : le Tempo Moteur Spontané (TMS). Il constitue un indice de référence très utilisé dans les études de traitement temporel.

Définition

La tâche consiste à demander à chaque sujet de frapper, le plus souvent avec la main, à la cadence qui lui est la plus confortable (i.e. spontanée). Cette tâche est indépendante de l'effecteur utilisé (Keele & al., 1985 ; Collyer, Broadbent, Church, 1992), ce qui est conforme à l'idée d'un unique mécanisme central de traitement. Le TMS reflète donc la sortie motrice d'un mécanisme central capable de générer des intervalles de temps régulier, en l'absence de toute autre information. Ce concept, issu de la terminologie de Fraisse, est décliné en fonction des auteurs en « rythme de frappe auto-entretenu » par Collyer, Broadbent et Church (1994) ou encore en l'expression motrice de ce qui est appelé « tempo interne » ou « personnel » par Semjen, Vorberg & Schulze (1998). **La détermination des performances du TMS constitue donc une source d'informations essentielle pour déterminer les spécificités de la base de temps** du système de traitement.

Valeurs chez l'adulte

Pour la grande majorité des adultes, le TMS est situé autour de 600 ms, c'est-à-dire que l'intervalle entre les frappes successives (noté IRI pour Inter Response Intervals) est de 600 ms (Fraisse, 1974 ; Drake, Jones & Baruch, 2000). Le TMS est une valeur très stable chez un même individu (faible variabilité intra-individuelle). Par contre, les différences inter-individuelles sont, elles, très importantes, tout au moins à l'âge adulte (Fraisse, 1974 ; Gérard & Rosenfeld, 1995). Le TMS varie ainsi selon les individus de 380 ms à 880 ms (Fraisse, 1974). **Le TMS est donc une valeur caractéristique d'un individu** et fondamentale dans la mesure où elle reflète le fonctionnement de l'horloge d'un individu en particulier. Cette variabilité inter-individuelle doit donc être considérée pour comprendre voire expliquer les performances individuelles.

Une analyse plus fine a révélé que la distribution des IRI, tout sujet et tout essai confondus, était bimodale plutôt qu'unimodale. Elle correspondrait à la combinaison de 2 distributions normales, avec un mode à 272 ms et le second à 450 ms (Collyer & al., 1994). Ces 2 valeurs de mode sont plus faibles que celles rapportées habituellement dans la littérature (en moyenne 600 ms). Dans cette analyse, les valeurs de TMS ont été moyennées sur tous les sujets et il est à noter que ces valeurs diminuaient au cours des séances, expliquant probablement ces valeurs plus faibles que celles communément trouvées dans la littérature. Ces résultats ont été mentionnés ici, bien que seuls ces auteurs les aient rapportés, car ils ont permis l'élaboration d'un modèle intéressant à considérer et qui sera évoqué plus loin (§ 2.4).

Description de l'évolution du TMS avec l'âge

Dès 1954, Fraisse s'est intéressé à l'évolution du TMS au cours de l'enfance (entre 7,5 ans et 12,5 ans). Ses résultats ont montré un ralentissement progressif du TMS de 365 à 550 ms. A remarquer dans cette étude, la courbe d'évolution du TMS avec l'âge fait apparaître une légère dépression (environ 150 ms d'amplitude) centrée autour de 7,5 ans ; jusqu'à cet âge, le TMS s'accélère (jusqu'à une valeur moyenne de 350 ms) pour ralentir ensuite.

L'évolution du TMS au cours du développement a été confirmée par des études ultérieures. Globalement, il est inférieur à 450 ms avant 6 ans (Provasi & Bobin-Bègue, 2003, Drake & al., 2000 ; Jacquet, Gérard & Pouthas, 1994) puis supérieur à 450 ms après cet âge (Drake & al., 2000) (Figure 1).

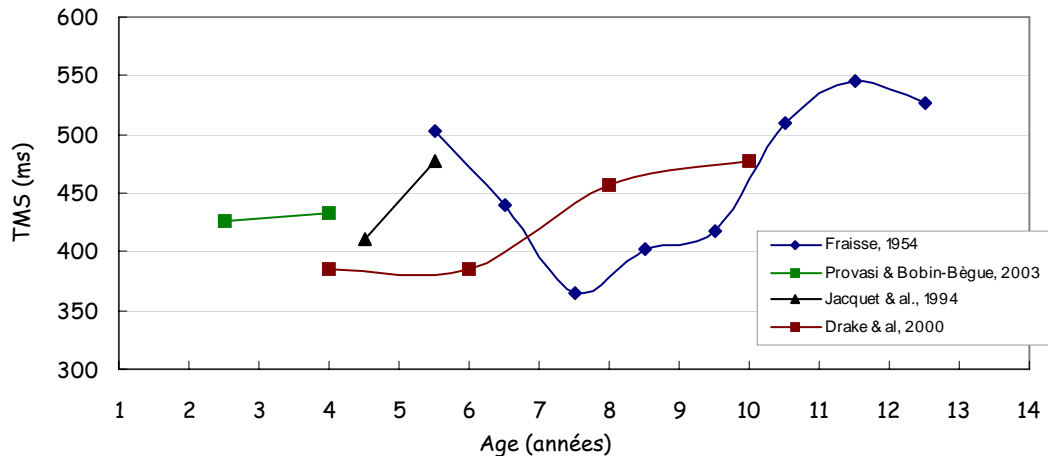


Figure 1 :
Synthèse des données de différentes études
concernant l'évolution du TMS au cours de l'enfance

Dans le détail, les données sont assez divergentes et la tendance de l'évolution n'est pas claire, particulièrement avant 6 ans. Le développement de la capacité à exécuter le TMS n'intervient probablement que très peu dans une tâche aussi simple et ce d'autant plus qu'elle est parfaitement non contrainte. Un autre argument est l'omniprésence des mouvements rythmiques dès la naissance (Pouthas & al., 1996), conférant une certaine expérience des mouvements réguliers et spontanés au jeune enfant. Les valeurs de TMS devraient donc être relativement homogènes d'une étude à l'autre. De plus, comme la variabilité inter-individuelle augmente avec l'âge (Drake & al., 2000), ce facteur ne devrait pas influencer sur le calcul des moyennes rapportées par ces différentes études. La tâche étant relativement simple, les moyens utilisés pour le chronométrage des frappes sont probablement peu impliqués. L'évolution du TMS chez l'enfant est donc encore mal connue. Par ailleurs, les données sont rares voire non disponibles avant l'âge de 3 ans.

Cependant, il faut remarquer que l'amplitude des différences rapportées est au maximum de 100 ms pour un âge donné, ce qui est plus faible que la gamme de TMS observée chez l'adulte (amplitude de 500 ms, allant de 300 ms à 800 ms). Les valeurs, du même ordre de grandeur pendant l'enfance, sont ainsi nettement plus faibles que les valeurs moyennes obtenues chez l'adulte. Ainsi, grossièrement, ces résultats confirment l'hypothèse d'un ralentissement du TMS avec l'âge à l'échelle de la vie d'un individu. Cette hypothèse d'un ralentissement continu au cours de la vie est d'ailleurs confirmée par le fait que ce ralentissement est aussi observé au cours du vieillissement adulte. En effet, les jeunes adultes

(âge moyen : 26 ans) ont un TMS significativement plus rapide que des personnes plus âgées (âge moyen : 69 ans) : il passerait en moyenne sur tous les sujets de 536 ms à 747 ms (Vanneste & al., 2001).

Un autre paramètre intéressant concerne la variabilité intra-individuelle. Elle caractérise la régularité des frappes et est donc un bon indicateur de la stabilité du système. Au cours de l'enfance, la régularité des frappes augmente avec l'âge (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Parallèlement, la variabilité inter-individuelle augmente avec l'âge (Drake & al., 2000). Enfin, aucune différence liée au sexe n'a été rapportée.

Manipulations du TMS

Puisque le TMS est l'expression d'un mécanisme central, des expériences dérivées de la tâche de TMS constituent un autre moyen d'appréhender le fonctionnement de ce mécanisme. Ainsi, l'étude des vitesses de frappe maximum et minimum permet de donner une limite aux capacités « périphériques » à la base de temps et principalement à la composante motrice mais aussi à la composante attentionnelle.

Le tempo le plus rapide qui peut être généré par un individu donne la limite motrice de la production d'intervalles réguliers. Il a été montré que ce tempo maximum accélère peu avec l'âge. A 4 ans, il est à peine inférieur au propre TMS de l'enfant et à l'âge adulte, il est aux environs de 150 ms (Drake & al., 2000). Ces informations indiquent que le TMS n'est pas contraint par les capacités motrices ; mais par contre, il est proche de cette limite motrice chez le jeune enfant.

Le tempo le plus lent qui peut être généré est quant à lui une bonne indication de la limite maximum pour que 2 événements successifs constituent une séquence. Pour l'adulte, elle est de 2 secondes. Cette valeur rejoint celle de la fenêtre temporelle (Slezag & al., 2002 ; Drake & al., 2000 ; Wittman, 1999 ; Drake, 1998). Du point de vue développemental, c'est à partir de 6 ans que ce tempo minimum ralentit nettement : il passe de 600 ms avant 6 ans à 1,2 secondes dès 8 ans. Il est nécessaire de préciser qu'il est admis que les enfants ont beaucoup de mal à inhiber un comportement, et ce d'autant plus qu'ils sont jeunes. Le TMS étant une valeur robuste chez les individus, il apparaît normal que le TMS minimum chez l'enfant soit plus rapide que chez l'adulte, l'inhibition de leurs frappes étant difficile. Cette notion interfère donc avec les données issues du tempo minimum et doit être prise en compte dans l'interprétation de ce type de données.

La gamme entre le tempo le plus rapide et le plus lent s'élargit donc très fortement avec l'âge, en s'écartant de plus en plus de la valeur du TMS enregistrée pour chaque âge (Drake & al., 2000).

En résumé, le TMS, en tant que valeur privilégiée de sortie du système, représente un indice fondamental pour caractériser la base de temps de notre système de traitement des durées. Cette base de temps semble exister dès la naissance et se ralentir avec l'âge. Cependant, les informations concernant les caractéristiques de son évolution au cours de la petite enfance ne sont pas déterminées précisément. **Des investigations complémentaires du TMS sont nécessaires, en particulier avant 6 ans, pour spécifier si cette base de temps se met en place progressivement et dans ce cas pour en déterminer les étapes de sa mise en place.**

D'autre part, s'il existe une base de temps à la source du traitement temporel, d'autres processus complémentaires sont nécessaires pour réaliser d'autres tâches temporelles.

2.2 Perception et discrimination temporelle

Percevoir une durée est une tâche plus complexe que la tâche de TMS car le système de traitement doit intégrer des informations du milieu extérieur pour réaliser le traitement adéquat. Notamment, les informations les plus pertinentes sont celles qui délimitent la durée à traiter. Les tâches de traitement perceptif représentent donc une source d'information additionnelle pour comprendre l'ensemble du mécanisme de traitement des durées courtes. Plusieurs grands types de paradigmes expérimentaux sont utilisés pour en évaluer les performances :

1. **L'estimation verbale** : le sujet doit donner la valeur absolue (et non pas relative) de la durée qu'il vient de percevoir. Cette procédure nécessite d'avoir une notion explicite du temps et d'en avoir une certaine expérience. En conséquence, elle ne peut pas être utilisée chez les enfants ou les animaux. Cette tâche est en outre très difficile pour des durées inférieures à la seconde.

2. **La généralisation temporelle** : cette procédure est issue d'expériences réalisées chez les animaux. Le sujet est habitué à une durée standard. Puis des durées variées lui sont présentées. Sa réponse consiste à signifier s'il a perçu la durée présentée comme étant identique au standard. Là encore, cette tâche demande que le sujet connaisse une durée de

façon absolue et non pas relative. D'autre part, une phase d'apprentissage est nécessaire. De plus, il est difficile d'utiliser cette procédure pour des durées inférieures à la seconde.

3. **La bisection temporelle** : le sujet a appris à maîtriser 2 durées standards très différentes. A la présentation de durées tests, le sujet doit les assimiler à l'un des 2 standards. Cette procédure nécessite un véritable jugement. De plus, elle nécessite de garder en mémoire la représentation mentale de chacun des standards, ce qui requiert des ressources supplémentaires. De plus, un processus de comparaison doit être mis en oeuvre. Même si cette tâche peut convenir aux durées courtes, elle est caractérisée par l'engagement de processus additionnels qui ne sont pas adaptés à l'exploration du fonctionnement de base du traitement temporel.

4. **La comparaison de durée** : une paire de durées est présentée et le sujet doit signifier si la seconde durée présentée est plus courte, égale ou plus longue que la 1^{ère}. Des procédures plus simples peuvent être envisagées, comme uniquement demander au sujet quelle est la durée la plus courte. Dans ce type de tâche, il faut que le sujet sache ce qu'est une durée plus courte et donc doit avoir acquis une notion de temps. La comparaison de durée est donc utilisable de façon fiable uniquement chez l'adulte.

5. **La discrimination** : le sujet doit signifier si les durées sont identiques ou non. Elle ne demande pas de quantification du temps écoulé. La charge mnésique est par ailleurs limitée. Cette tâche nécessite le minimum de pré requis et un minimum d'instructions. Cette tâche peut être facilement adaptée aux enfants, même très jeunes.

Chaque grand type de procédures brièvement décrit ci-dessus est évidemment spécifique de la question théorique posée par une expérience, des variantes pouvant être proposées en fonction des contraintes expérimentales. La discrimination de durée est le type de procédure le plus simple et le plus universellement applicable pour connaître les limites des performances du système de traitement. Parmi ses avantages, elle ne nécessite pas d'apprentissage d'une valeur particulière, ce qui impliquerait d'autres fonctions cognitives. Elle ne nécessite de ne mettre en œuvre qu'une comparaison immédiate. Par ailleurs, elle n'implique pas d'avoir de véritable notion du temps, elle peut donc être utilisée chez l'enfant sans difficulté. Enfin, elle est parfaitement adaptée à l'étude de la perception des durées de quelques centaines de millisecondes, par l'utilisation de tempo.

Mais l'avantage le plus intéressant de cette procédure est la **détermination du seuil de discrimination**. En réduisant la différence entre les 2 durées à discriminer, il est possible de déterminer la limite à partir de laquelle 2 durées sont perçues comme différentes (et en

dessous de laquelle ces 2 durées sont traitées comme identiques). Les valeurs limites d'un système quel qu'il soit sont de bons indicateurs du mode de fonctionnement de ce système et permettent d'en déterminer la sensibilité. L'étude des performances et surtout des seuils de discrimination représente donc un très bon outil pour appréhender le fonctionnement du système de traitement des durées.

Caractéristiques des performances de discrimination

Lorsque la tâche consiste à demander à un sujet de comparer la durée de 2 d'intervalles simples (qu'ils soient pleins ou vides) l'adulte est capable de discriminer une différence de 6 à 10% entre les 2 durées qu'il a perçues (Allan, 1979 ; Creelman, 1962 ; Getty, 1975, 1976) mais à la condition que les intervalles soient choisis dans une gamme de 200-2000 ms. La même précision a été trouvée lorsque la tâche consistait à détecter un changement dans la durée de 1 ou 2 intervalles d'une séquence qu'elle soit régulière ou rythmique (Drake & Botte, 1993). Par contre, conformément au modèle d'observation multiple, la précision est supérieure lorsqu'il faut comparer 2 tempi (que la comparaison porte sur les ISI des tempi qui sont différents ou sur un décalage de phase du second tempo par rapport au premier entendu). Dans ces cas, la précision est de l'ordre de 3% (Drake & Botte, 1993 ; Michon, 1964 ; McAuley & Kidd, 1998).

Il est important de noter que ces **seuils de discrimination sont très dépendants des tempi** à discriminer. Le seuil varie de 1,6 à 6% pour des tempi de 100 à 1500 ms (Drake & Botte, 1993). La meilleure performance est obtenue pour un tempo de 600 ms : les sujets ont été capables de discriminer un tempo de 600 ms d'un autre de 610 ms ce qui est d'une remarquable précision (cependant, cette excellente performance a été obtenue avec des sujets avertis après de nombreux essais). En effet, cette différence de 10 ms est de l'ordre de la valeur du seuil de détection de la simultanéité (Artieda & Pastor, 1996). Elle est par ailleurs inférieure au seuil de discrimination de 2 stimuli en modalité auditive (18,1 ms, Artieda & Pastor, 1996). Ce seuil de 1,6% de différence détectée constitue une valeur limite. Sans considérer spécifiquement cette valeur, les performances de discrimination sont inférieures à 3 % entre 300 et 800 ms (Drake & Botte, 1993). Plus globalement, **les seuils de discrimination décrivent une fonction parabolique dont le minimum se situe à 600 ms**. Toutes les études convergent vers ce profil de performances (Fraisse, 1957, 1967 ; Drake & Botte, 1993). Les discriminations les plus fines sont donc obtenues pour des tempi proches des valeurs du TMS observées chez l'adulte. Ce résultat suggère que **le tempo de traitement optimal est le tempo correspondant au TMS**. Il existe donc une dépendance entre le

processus à l'origine du TMS et celui responsable de la perception des durées. Cette dépendance est compatible avec l'idée que le système de traitement des durées utilise un processus perceptif pour fournir en entrée des informations utilisées ensuite par la base de temps pour accomplir la tâche requise.

Evolution des performances de discrimination

Ces informations sont apportées par l'étude des performances de discrimination chez les enfants, mais les données disponibles sont rares. Aucune étude ne fournit les seuils de discrimination chez les enfants. Il est donc impossible de vérifier si le système de traitement est en place très tôt au cours du développement ou s'il subit une maturation tout comme semble le subir la base de temps à l'origine du TMS et dans ce cas, d'identifier les étapes de la mise en place de ce système de traitement. Les seules informations disponibles fournissent et comparent les performances de discrimination entre des tempi qui diffèrent de 15% (qui est une valeur communément testée dans la littérature).

Ainsi, dans une de ces études, la tâche consistait à discriminer un tempo standard³ d'un tempo 15% plus rapide (Drake & Baruch, 1995). Elle a permis de montrer que les performances s'améliorent avec l'âge. Les tempi standards testés étaient 100, 300, 600, 1000 et 1500 ms. A 4 ans, les enfants ne discriminent les 2 tempi que si le standard est de 300 ms ; à 6 ans, la discrimination devient possible pour des tempi standards de 100, 300, 600 ms ; à 8 ans, ils y arrivent en plus à 1000 ms et à 10 ans, à tous ces tempi ainsi qu'à 1500 ms c'est-à-dire que leurs performances sont similaires à celles des adultes.

Ainsi, les capacités de discrimination semblent s'élargir à une gamme de tempi plus étendue avec l'âge (Drake & Baruch, 1995). Il apparaît aussi que cette gamme de tempi accessibles à la discrimination évolue de façon à toujours contenir la valeur du TMS à l'âge concerné. **Cette gamme de tempi accessibles s'élargit donc en se « recentrant » sur la valeur du TMS de l'individu selon son âge** (Drake & al., 2000). Cette tendance est observée à partir de 4 ans par cette étude.

La question qui en découle est de savoir si cette tendance peut être généralisée à des âges plus précoces. Il a été montré que les tout jeunes enfants (dès 2 mois) sont capables d'intégrer une relation temporelle entre des événements (Demany, McKenzie & Vurpillot, 1977 ; Chang & Trehub, 1977). Ils possèdent donc un système de traitement des durées courtes. A 2 mois et à

³ Le tempo standard est celui qui sert de référence pour la comparaison. Le tempo à comparer au standard est désigné « tempo variable ».

4 mois, ils discriminent un tempo de 600 ms d'un tempo 15% plus rapide, mais aucun résultat significatif n'a été obtenu pour les autres tempi testés (100, 300, 1500 ms) (Baruch & Drake, 1997).

Ces résultats sont contradictoires avec ceux obtenus chez l'enfant de plus de 4 ans. Selon les résultats de Drake & Baruch (1995), la gamme de tempi accessibles au traitement temporel s'élargit avec l'âge. L'extrapolation de cette analyse conduit à l'hypothèse que les bébés aient accès à une gamme de tempi plus limitée que celle des enfants de 4 ans voire qu'elle soit uniquement limitée au tempo correspondant à leur TMS. Or, si le TMS ralentit avec l'âge, alors le tempo correspondant au TMS devrait être inférieur à 400 ms (celui de l'enfant de 4 ans étant légèrement supérieur à cette valeur). Or, les résultats expérimentaux montrent que les bébés discriminent 2 tempi si le tempo standard est 600 ms, alors que selon l'hypothèse mentionnée plus haut, ils devraient discriminer 2 tempi si le tempo standard est de 300 ms (qui correspond à un tempo plus proche de la valeur théorique du TMS). De plus, les performances de discrimination devraient être inférieures à celles d'enfants plus âgés. Or, même pour un tempo sensé être éloigné de leur tempo de traitement optimal (le TMS) tel que 600 ms, les bébés discriminent une différence de 15%. Cette différence de 15% correspond aussi à celle discriminée par les enfants de 4 ans, mais en ce qui les concerne, uniquement pour le tempo le plus proche de leur TMS. **Il existe donc une contradiction évidente entre les données expérimentales et les hypothèses développementales formulées.**

Si l'hypothèse selon laquelle la gamme de tempi accessibles au traitement temporel contient la valeur du TMS est vraie, alors **l'hypothèse du ralentissement du TMS** de façon strictement monotone (au sens mathématique) **doit être remise en question, au moins pour les premières années de développement.** L'alternative qui consiste à remettre en question que le TMS ne soit pas inclus dans la gamme de tempi pouvant être traités est peu réaliste, dans la mesure où le TMS constitue une valeur endogène propre à chaque individu et qu'elle est issue de son système d'horloge.

Une autre information importante à prendre en compte expérimentalement concerne le sens de variation utilisé pour les procédures de comparaison. L'expérience de discrimination chez le bébé (Baruch & Drake, 1997) a mis en évidence que si les bébés discriminent un tempo 15% plus rapide que celui de 600 ms utilisé pour l'habituation, ils n'y parviennent pas si le tempo est 15% plus lent (toujours par rapport à 600 ms mais aussi par rapport aux autres tempi testés, c'est-à-dire 100, 300 et 1500 ms). **Il existe donc une dissymétrie entre les 2 sens de**

variations possibles pour tester la discrimination (en ce qui concerne les protocoles expérimentaux qui, le plus souvent, utilisent un tempo variable qui doit être comparé avec un tempo standard). Cette dissymétrie est souvent traitée comme un facteur marginal : en effet, les protocoles expérimentaux privilégient de façon quasiment exclusive le sens de l'accélération. Il est possible que ce « biais expérimental » traduise une plus grande difficulté à traiter les durées relativement plus lentes que les durées relativement plus rapides par rapport au tempo standard bien maîtrisé. Dans cette hypothèse, **cette dissymétrie apparaîtrait donc comme un facteur important à intégrer dans la compréhension du fonctionnement du traitement des durées.**

Manipulations de la perception temporelle

Marginalement au sujet qui nous intéresse ici, d'autres types d'études doivent être mentionnés. En effet, une autre façon de comprendre le fonctionnement central du traitement temporel est d'observer l'impact d'une entrée perceptive proche de celle supposée être générée au niveau central. Les résultats de ces perturbations apportent des informations qui viennent compléter les modélisations.

Ainsi, par exemple, Penton-Voak, Edwards, Percival & Wearden (1996) ont testé les effets d'une série de click émis toutes les 200 ms ou toutes les 40 ms (fréquence de 5 ou de 25 Hz) sur la durée perçue subjectivement. De précédentes recherches avaient suggéré qu'une telle manipulation puisse accélérer la base de temps de l'horloge interne du sujet et donc conduire à une sous-estimation. Les résultats montrent que lorsque les clicks précèdent les durées à juger, la longueur subjective est modifiée de manière largement cohérente avec l'idée que la vitesse de l'horloge ait pu être accélérée, en moyenne de 10%. Le même type d'expériences a été réalisé par Treisman et ses collaborateurs (Treisman, Faulkner, Naish & Brogan, 1990 ; Treisman & al., 1992 ; Treisman & Brogan, 1992) et a permis d'estimer que **les pulsations de la base de temps de l'horloge interne se produisent toutes les 20 ms environ.**

En résumé, l'étude de la perception et en particulier de la discrimination temporelle a permis de mieux comprendre le fonctionnement du système de traitement des durées courtes. Tout d'abord, le cœur du système possède une base de temps dont la fréquence de pulsation, chez l'adulte, est toutes les 20 ms. Cette base de temps est influencée par la perception (préalable) de stimulations auditives. L'étude du TMS avait montré qu'il existait un intervalle privilégié (valeur de IRI du TMS) reflétant la sortie motrice de la base de temps. L'étude de la

perception et des seuils de discrimination à montrer que le TMS correspondait aussi au tempo de traitement optimal. Le système de traitement des durées est donc plus performant pour des intervalles proches des IRI produit spontanément par l'individu. D'autre part, il apparaît que le système de traitement améliore sa sensibilité avec l'âge. En effet, la gamme de tempi traitée s'élargit avec l'âge et les résultats suggèrent l'hypothèse que les seuils de discrimination diminuent avec l'âge. Cependant, ces caractéristiques du traitement perceptif ne sont pas vérifiées du point de vue développemental soit en raison de données contradictoires, soit en raison d'une absence de données. En conséquence, aucune hypothèse ne peut être validée à propos de la mise en place du système de traitement des durées. Pourtant ces informations apporteraient un éclairage complémentaire sur le fonctionnement du traitement des durées.

2.3 Reproduction et synchronisation

Les tâches de reproduction, malgré le fait qu'elles fassent intervenir des processus supplémentaires aux travers des effecteurs, sont aussi de bons outils d'analyses. **Elles permettent de retranscrire assez précisément et indépendamment de toute notion de temps explicite, l'image mentale que le sujet s'est faite d'une durée.** La tâche consiste à demander au sujet de reproduire au travers d'un dispositif une durée qui lui a été présentée et ce, le plus fidèlement possible. Evidemment, la tâche nécessite beaucoup de précision pour les durées courtes.

De la même façon que le tempo est utilisé pour l'étude des capacités de perception d'un sujet, le tempo est là aussi un outil permettant d'obtenir des données précises via une tâche de synchronisation. Celle-ci consiste simplement à ce que le sujet reproduise en temps réel les intervalles qui lui sont présentés : les réponses du sujet doivent avoir la même périodicité et être en phase avec le tempo perçu simultanément. Elle requiert donc que le sujet adapte son rythme de frappes aux stimulations externes. Il ne s'agit donc plus d'une tâche non contrainte comme celle du TMS, mais d'une tâche contrainte. Le système de traitement temporel intègre donc la durée à produire (c'est-à-dire l'ISI) via les informations perçues et adapte le déclenchement de frappes (IRI) à cette même durée.

Performances de synchronisation

Là encore, les meilleures performances sont obtenues pour des tempi compris entre 400 et 800 ms (Fraisse, 1966). De même, **les performances s'améliorent au cours de la vie** : le

taux de synchronisation augmente avec l'âge. Dès 4 ans, les enfants, synchronisent leurs frappes avec une séquence isochrone (Fraisse, Pichot & Clairouin, 1969 ; Drake & al., 2000). Au moins à partir de 6 ans, les enfants sont capables de reproduire des durées courtes de 500 et 1000 ms aussi bien que l'adulte, si ce n'est que leurs frappes sont plus variables (Fraisse, 1948). Ils en sont capables que la durée soit pleine ou vide, confirmant qu'ils perçoivent bien la durée pour elle-même. Ces données confirment que **les enfants possèdent une bonne représentation mentale des durées**, même si la notion de temps n'est pas maîtrisée.

Avant 4 ans, les données sont rares. Les enfants de 2,5 et de 4 ans sont capables de participer à une tâche de synchronisation et de modifier leur TMS pour obtenir un renforcement (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Pourtant, à 3 ans, ils ne parviennent pas à frapper dans leurs mains de façon synchrone avec un métronome, tâche qu'ils parviennent à accomplir dès 4 ans (Fitzpatrick, Schmidt & Lockman, 1996). Les nouveau-nés, tout comme les enfants de 2 mois, sont incapables de synchroniser leur allure de succion à une allure 15% plus rapide ou plus lente que leur activité spontanée (Provasi & Marks, 1994). La tâche de synchronisation est donc difficile à réaliser chez le très jeune enfant, même si les résultats expérimentaux suggèrent qu'au moins à partir de 2,5 ans, l'enfant semble influencé par les stimulations extérieures.

Là encore, **les données suggèrent que le système de traitement des durées courtes se mette en place progressivement au cours de la petite enfance**, mais les données expérimentales très limitées ne permettent pas d'en caractériser les étapes.

Variabilité de la synchronisation

Un bon indice expérimental de la capacité à traiter une durée courte et de la sensibilité du traitement est la variabilité des frappes lors d'une tâche de synchronisation.

Les résultats expérimentaux sont contradictoires : soit la variabilité décrirait une fonction parabolique, passant par un minimum entre 300 et 800 ms (Barlett & Barlett, 1959 ; Michon, 1967 ; Peters, 1989), soit elle augmenterait brusquement pour des ISI supérieurs à 300 ms (Peters, 1989). Dans cette dernière étude, pour des ISI inférieurs à 300 ms, la variabilité reste quasiment constante et au-delà, elle augmente linéairement avec l'ISI. Cette frontière coïnciderait au passage d'un mode de frappe automatique à un mode contrôlé. Le mode de frappe automatique se produirait lors de la synchronisation avec des durées très courtes, où le facteur limitant est le délai d'exécution motrice. Pour les durées plus longues, le mode contrôlé correspondrait au véritable processus de synchronisation. L'horloge mesurerait

l'intervalle entre les frappes en tenant compte du délai moteur. **Le traitement temporel des durées dans les tâches de production ne serait donc pas réalisé avec la même sensibilité pour toutes les durées.**

Pourtant, chez le jeune enfant, il apparaît que la variabilité des frappes n'est pas dépendante de l'ISI à produire ; cependant, les frappes sont plus variables que lors d'une tâche de TMS (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Ce résultat révèle l'existence d'une évolution dans la sensibilité du traitement des durées, qui est probablement corrélée à la maturation générale du système de traitement.

Anticipation

Lors d'une tâche de synchronisation, le sujet doit anticiper son mouvement de frappe pour que cette dernière se produise simultanément au stimulus. Mais, les observations montrent qu'il existe une véritable anticipation de la frappe sur le stimulus. Les musiciens, experts en traitement des durées courtes, anticipent plus que les personnes sans expérience musicale (Gérard & Rosenfeld, 1995). Ainsi, une bonne synchronisation se matérialise par une légère avance de la frappe par rapport au début du son. L'anticipation est même inévitable pour que le sujet soit synchronisé subjectivement. Des expériences ont montré que si en cours de synchronisation, les stimuli étaient modifiés pour se produire en synchronie objective à la frappe, les sujets rétablissaient une anticipation (Fraisse & Voillaume, 1971 ; Vos & al., 1993).

Le phénomène d'anticipation peut s'interpréter comme suit. Dans une tâche de synchronisation, c'est **le centre perceptif du son⁴ qui est encodé au niveau central** (Vos & al., 1995) et c'est ce paramètre qui est utilisé par le système de traitement des durées pour la synchronisation subjective. L'horloge, en plus de calculer la durée entre les frappes, intègre les délais de transduction afférents et efférents (Mates & Aschersleben, 2000). La conséquence est cette légère anticipation de la frappe, appelée aussi asynchronie négative. Ainsi, même si le sujet parvient à frapper avec une période équivalente à celle requise, un décalage de phase va apparaître pour se maintenir ensuite. L'anticipation permet en plus d'exclure l'hypothèse selon laquelle les sujets agiraient par un processus de réaction aux stimulations (Aschersleben, 1994 cité par Semjen & al., 1998).

4 Ce paramètre varie en fonction de la durée du son, de l'intervalle entre les sons et de la forme d'attaque du son (Vos, Mates & van Kruysbergen, 1995).

Ce phénomène d'anticipation est cependant limité aux durées courtes et **son amplitude varie progressivement avec l'ISI**. A un tempo rapide (300 ms), la synchronisation est pratiquement parfaite. Pour des ISI intermédiaires (autour de 500 ms), l'anticipation varie de 20 à 40 ms (Gérard & Rosenfeld, 1995). Enfin, pour un tempo très lent (2000 ms) la frappe intervient en réaction du stimulus (Mates, Radil, Muller & Pöppel, 1994). Ainsi, pour les ISI très courts, il n'est mécaniquement pas possible au sujet d'anticiper sa frappe (matérialisé par l'absence d'anticipation à 300 ms) ; cette explication rejoint celle de Peters sur un mode de frappe automatique avant 300 ms. A l'opposé, lorsque l'ISI devient supérieur à la fenêtre temporelle de perception, c'est-à-dire quand les stimuli sont perçus indépendamment les uns des autres, le processus à l'origine de l'anticipation laisse place à un processus de temps de réaction.

L'anticipation est un phénomène bien plus informatif que la performance de synchronisation elle-même. C'est pourquoi un autre indice de performance est étudié dans les tâches de synchronisation : il s'agit du délai séparant la réponse du sujet du stimulus (Hary & Moore, 1985, 1987), couramment noté SRI (Stimulus Response Interval). Il permet d'analyser plus finement les capacités de synchronisation, en particulier lorsqu'elles sont imparfaites comme chez les enfants. Il a ainsi pu être montré que les jeunes enfants de 2,5 et de 4 ans, anticipent le stimulus auditif lorsqu'ils doivent se synchroniser avec un tempo de 600 ms, et frappent sans anticipation pour un ISI de 400 ms (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Ce résultat est synonyme d'une véritable performance de synchronisation chez le jeune enfant à 600 ms. De plus, l'absence d'anticipation à 400 ms semble indiquer qu'il est difficile à ces âges de modifier légèrement son TMS. **Ces résultats suggèrent que le mécanisme de synchronisation, et probablement aussi le système de traitement dans sa globalité deviennent plus flexibles au cours du développement**, confirmant ainsi les hypothèses issues de l'étude du traitement perceptif.

Importance du rétrocontrôle sensoriel

Bien que l'essentiel du contrôle temporel des mouvements soit traité au niveau central (Delcomyn, 1980), **les informations sensorielles jouent aussi un rôle dans la qualité de la synchronisation**. Le couplage d'un repère sensoriel issu de la réponse avec le centre perceptif du stimulus permet en retour au mécanisme central de vérifier la qualité de la synchronisation sous la forme d'un rétrocontrôle (Fraisse, Oléron & Paillard 1958 ; Mates, Radil & Pöppel., 1992 ; ; Mates & Aschersleben, 2000 ; Aschersleben & Prinz, 1995, 1997 ; Billon, Semjen, Cole & Gauthier, 1996). Le rôle de ce rétrocontrôle se vérifie expérimentalement car les

sujets maintiennent leurs frappes synchronisées même lorsque les ISI sont irréguliers (Schulze, 1992).

Le repère sensoriel le plus important est le repère kinesthésique, qui peut être appuyé par le repère tactile et avec une moindre importance, le repère auditif (Fraisse & al., 1958). Ce système d'ajustement possède une résolution plus fine que celle mise en jeu dans les traitements temporels conscients (Repp, 2000). **Une tâche de synchronisation met donc en œuvre un processus d'ajustement complexe au niveau central dont il est nécessaire de tenir compte dans la modélisation du fonctionnement de l'horloge.**

L'information issue du rétrocontrôle sensoriel peut modifier localement 1 des 2 paramètres de la synchronisation. Ces 2 paramètres sont la période des réponses (IRI), qui doit correspondre à celle requise des ISI, et la différence entre les phases de ces 2 périodes, qui doit être subjectivement nulle (elle est matérialisée par l'anticipation des frappes).

La correction de phase est une stratégie suffisante pour maintenir la synchronisation avec le tempo stable d'un métronome. Ce processus prend comme paramètre en entrée l'asynchronie précédente, voire les 2 précédentes pour des ISI rapides, et ajuste d'une fraction de cette valeur le prochain intervalle (Hary & Moore, 1987 ; Mates, 1994a, b ; Schulze, 1992 ; Vorberg & Wing, 1996 cité par Semjen & al., 1998). Une autre stratégie, qui implique des processus plus lourds, est de corriger les différences entre la période moyenne de l'horloge et la période des ISI (Mates, 1994a, b ; Michon, 1967 ; Vos & Helsen, 1992). Cette dernière hypothèse est à l'heure actuelle moins soutenue dans la mesure où les prédictions de la correction locale de la phase concordent avec les observations (Semjen, Schulze & Vorberg, 1998, 2000). Expérimentalement, ces 2 types de corrections contribuent différemment à la synchronisation, avec une prédominance pour la correction de phase. La correction de période n'intervient qu'au début de la synchronisation ou lorsque la période de la stimulation externe varie (Semjen & al., 1998, 2000).

La synchronisation est donc une tâche qui engage des processus complémentaires au fonctionnement de l'horloge (par rapport à un traitement perceptif). Elle présente l'avantage d'être facilement réalisable expérimentalement et reflète les caractéristiques de fonctionnement du système de traitement. Les études déjà réalisées ont permis de proposer des hypothèses sur le traitement des durées. Un point intéressant est que les performances apparaissent être différentes selon les durées à traiter chez l'adulte, alors que chez l'enfant, cette sensibilité différentielle n'a pas été mise en évidence. Ce résultat souligne donc que **les**

processus de traitement se mettent en place progressivement, comme l'ont déjà suggéré l'étude développementale de la perception des durées courtes et du TMS. Les tâches de synchronisation représentent ainsi une source d'information complémentaire pour construire un modèle de fonctionnement du mode de traitement des durées.

2.4 Tâche de continuation

La tâche de continuation est réalisée après une phase de synchronisation et consiste pour le sujet à maintenir son rythme de frappe en l'absence de toute stimulation externe. La phase de synchronisation permet au système d'élaborer une représentation mentale de la durée et de caler la période et la phase des frappes sur les stimulations externes. En phase de continuation, cette période doit donc être maintenue sans information de correction. Les IRI requis sont différents du TMS afin d'obtenir une image de la représentation mentale d'une durée particulière ainsi que de la façon dont elle peut être produite en l'absence d'indice externe.

Les tâches de continuation sont bien réalisées chez l'adultes : il a été montré que la distribution des IRI (tout IRI requis confondus grâce à un calcul de normalisation) est bien décrit par une loi de Laplace (Collyer & Church, 1998). Cependant, les IRI obtenus sont légèrement différents des ISI cibles (Gérard & Rosenfeld, 1995). Les analyses des IRI produits pendant la phase de continuation montrent qu'ils ne varient pas exactement proportionnellement aux ISI de la phase de synchronisation (Collyer et al., 1992, 1994). Il existe un biais résiduel systématique, spécifique à chaque sujet, très stable au cours du temps et indépendant de l'effecteur utilisé, appelé « oscillator signature » (signature d'oscillateur). Ces erreurs de reproduction traduisent la façon dont le sujet se représente et contrôle les intervalles temporels. L'importance des erreurs est fonction de l'IRI cible (i.e. l'ISI de la phase de synchronisation) : pour certaines valeurs, IRI et IRI cible sont très proches et l'erreur est donc faible ; pour d'autres valeurs d'IRI cibles, l'IRI du sujet s'écarte de la valeur requise et donc l'erreur augmente. Ces résultats démontrent que le système d'horloge ne peut se synchroniser de façon continue avec une stimulation externe ; il ne peut générer que des valeurs discrètes d'intervalles (valeurs d'IRI cible où l'erreur est faible). L'apparente continuité des valeurs des IRI est obtenue par un ajustement local entre l'intervalle endogène discret produit et l'intervalle cible (rétrocontrôle sensoriel lors des tâches de synchronisation).

D'autres auteurs suggèrent que si l'IRI requis est équivalent à un multiple du TMS, alors la performance sera meilleure que pour des valeurs quelconques. Cependant, le TMS étant une valeur endogène, cette analyse sous-entend qu'aux valeurs proches mais différentes du TMS (ou d'un de ses multiples), il sera plus facile à l'horloge de ne pas modifier sa période. Localement, l'erreur sera donc une fonction de l'IRI requis : elle devrait augmenter jusqu'à un seuil à mesure que l'IRI requis s'éloigne du TMS et être quasiment nulle lorsqu'elle est égale au TMS. Cependant, quelle que soit l'interprétation, tous ces résultats suggèrent que **les IRI produits dépendent de la capacité de l'horloge à générer les intervalles cibles et que ceux-ci ne représentent pas une fonction linéaire des IRI cibles.**

Chez l'enfant, aucune réelle donnée n'est disponible. Une étude fournit cependant des informations (Provasi & Bobin-Bègue, 2003) à interpréter avec prudence. Dans cette expérience, les enfants réalisaient une tâche de synchronisation suivie d'une tâche de TMS. Pour eux, le jeu consistait uniquement à frapper pour obtenir un renforcement. Après la phase de synchronisation, aucune information explicite ne leur permettait de savoir qu'à chaque frappe, ils obtiendraient un renforcement (tâche de TMS). Pour cette raison, cette tâche s'apparente à une tâche de continuation. Les résultats ont montré qu'à 2,5 et 4 ans, les IRI étaient modifiés significativement par rapport à leur TMS enregistré en début d'expérience, uniquement si l'ISI cible était de 800 ms (soit en moyenne 2 fois plus lent que le TMS enregistré). Lorsque l'ISI cible était de 600 ms, en l'absence de stimulations auditives, les enfants retrouvaient leur rythme de frappes spontané initial. Ces résultats suggèrent qu'il est plus facile de traiter des multiples du TMS. Cependant, 2 réserves doivent être émises concernant cette interprétation. Tout d'abord, cette expérience ne fait apparaître qu'un sens de variation pour le traitement, celui du ralentissement. Or, celui a été mentionné être probablement plus difficile à traiter que celui de l'accélération. D'autre part, cette phase expérimentale de TMS suivant une phase de synchronisation peut aussi être assimilée à une expérience de manipulation du TMS (stimulations auditives précédant une tâche de TMS).

Ainsi, synthétiquement, dans une tâche de continuation, le système d'horloge doit modifier son fonctionnement sans indice extérieur que la représentation mentale qu'il a acquise pour s'adapter à la production d'une durée imposée. Il est donc prévisible que la variabilité des frappes soit plus grande que lors d'une tâche de TMS ou de synchronisation. L'analyse de la variabilité des IRI en continuation notamment a permis d'émettre des hypothèses quant au fonctionnement général de l'horloge.

2.5 Informations apportées par l'étude de la variabilité

Dans la mesure où les tâches de traitement temporel sont généralement bien réalisées par l'adulte, **la variabilité intra-individuelle**, en particulier celle issue des tâches de TMS et de continuation, **constitue un moyen pour comprendre le fonctionnement de notre mécanisme de traitement des durées**. A l'heure actuelle, les protocoles expérimentaux permettent des relevés précis de la date des réponses et donc de leur variabilité. Ce paragraphe synthétise les informations apportées par l'étude de la variabilité relevée chez l'adulte dans différentes tâches temporelles en présentant les modèles mathématiques construits à partir de ces informations.

La loi de Weber (1834, cité dans Sternad, Dean & Newell, 2000) a été le point de départ de l'étude de la variabilité du traitement temporel (Allan & Kristofferson, 1974 ; Allan, 1979). Elle postule la proportionnalité entre le seuil de discrimination et l'intensité du stimulus, quelle que soit la modalité perceptive considérée. Un corollaire de cette loi de Weber est que la variabilité des IRI est proportionnelle (fraction de Weber) à la moyenne des IRI. En ce qui concerne l'étude du traitement temporel, **l'idée la plus communément admise est que c'est la variance qui augmente linéairement avec l'ISI** (McGill & Gibbon, 1965 ; Wing, 1980 cités dans Collyer & Church, 1998 ; Creelman, 1962). D'autres auteurs postulent eux que l'écart-type progresse linéairement en fonction de l'ISI (« Scalar Timing Theory ») (Gibbon, 1977, 1991 ; Gibbon, Church & Meck, 1984 ; Ivry & Hazeltine, 1995).

Les études pour modéliser **la variance** ont montré qu'elle **peut être décomposée en 2 sources** de variance, **l'une temporelle et l'autre non liée au temps** (Wing & Kristofferson, 1973 a, b ; Ivry & Hazeltine, 1995 ; Semjen & al., 1998, 2000). Le modèle de Wing et Kristofferson (1973a, b) a établi la relation suivante sur les délais entre les réponses (IRI) :

$$I_n = T_n^* + M_n - M_{n-1} \quad (1)$$

Pour le nième intervalle de la séquence de TMS, I_n représente le nième IRI. T_n^* est la représentation centrale du nième intervalle à produire. M_{n-1} et M_n sont les délais d'exécution motrice. Selon cette relation (1), un IRI mesuré est donc la transcription de l'intervalle généré au niveau central (T_n^*) auquel il faut ajouter le délai moteur pour produire la réponse (M_n) et soustraire le délai moteur de la frappe précédente (M_{n-1} qui marque le début de l'intervalle I_n). L'intervalle généré par l'horloge et les délais moteurs sont assimilés dans ce modèle à des variables aléatoires indépendantes de variances respectives σ_T^2 et σ_M^2 . En conséquence, la variance mesurée se décompose comme suit :

$$\text{Var}(I_n) = \sigma_T^2 + 2 \cdot \sigma_M^2 \quad (2)$$

Une source de variance des IRI est liée au fonctionnement de l'horloge interne qui génère des intervalles statistiquement équivalents. Cette source de variance dépend directement de l'intervalle cible à produire. L'autre source est liée au délai moteur qui englobe à la fois le délai de transduction du signal et la production motrice proprement dite. Cette variance est indépendante de l'intervalle à produire. Ce modèle à 2 niveaux de variances (composante centrale et composante motrice) rend compte de la propriété de linéarité issue de la loi de Weber. En effet, 1 des 2 sources de variances (la composante centrale) varie linéairement en fonction des IRI et que l'autre (la composante motrice) est constante, l'ensemble constitue donc une fonction linéaire (Wing, 1980, cité dans Wing, 2002) et permet de retrouver la loi de Weber.

Un autre point essentiel de ce modèle est qu'il repose sur l'hypothèse que les IRI adjacents sont corrélés négativement et que les IRI non adjacents ne sont pas corrélés entre eux (cf. équation (1)). La relation de covariance est la suivante :

$$\text{cov}(I_{n-1}, I_n) = - \sigma_M^2 \quad (3)$$

Pratiquement, cette corrélation permet de calculer la variance liée à la composante motrice à partir de la covariance négative entre les IRI adjacents. La variance de la composante centrale est obtenue par soustraction de la variance totale (cf. équation (2)). Ce modèle permet ainsi d'estimer la variabilité liée strictement à l'horloge, indépendamment de la composante motrice (qui peut être perturbée dans certaines études cliniques par exemple).

Le modèle résumé ci-dessus représente une première approximation du fonctionnement de l'horloge. Cependant, il est basé sur les tâches de TMS essentiellement. Ce modèle a donc été étendu par la suite aux tâches de synchronisation, afin de modéliser de façon globale le mécanisme de production d'intervalles. Ce travail a conduit à des ajustements des équations pour tenir compte de l'influence du rétrocontrôle sensoriel. Une correction linéaire de l'intervalle généré par l'horloge a ainsi été introduit (Vorberg & Wing, 1994, 1996, cités dans Semjen & al., 1998 ; Semjen, & al. 2000 ; Schulze & Vorberg, 2002). L'équation initiale (1) n'est pas modifiée, seul le terme dépendant de l'horloge l'est comme suit :

$$T_n^* = T_n - \alpha \cdot A_{n-1}$$

L'intervalle généré initialement par l'horloge est T_n . Cet intervalle est corrigé en soustrayant une proportion fixe (facteur α) de l'asynchronie précédente (A_{n-1}) (cette correction peut être

étendue aux 2 asynchronies précédentes, en faisant intervenir un facteur de proportionnalité β supplémentaire). Comme il l'a été mentionné plus haut, la période des intervalles de l'horloge est adaptée initialement (Semjen & al., 1998) et elle est stabilisée pendant la phase de synchronisation (Semjen & al., 2000). L'horloge corrige seulement les différences de phase entre les ISI et les réponses, en ajustant localement l'intervalle T_n en tenant compte de la dernière erreur de synchronisation A_n (importance du rétrocontrôle dans la phase de synchronisation). Cette nécessité d'ajustement local de la réponse est par ailleurs en accord avec l'interprétation de Collyer (Collyer & al., 1992, 1994) selon laquelle les valeurs prises par la période de l'horloge sont des valeurs discrètes.

Ce modèle est l'objet d'études spécifiques incluant le calcul d'estimateurs des différents paramètres et des simulations d'autant plus complexes que le modèle se généralise (Semjen & al., 2000). **Caractériser les intervalles produits par l'horloge (composante centrale de la variabilité) à partir des intervalles mesurés expérimentalement est donc un exercice complexe qui fait intervenir de nombreux paramètres, eux même à évaluer.**

Il doit être précisé que ces modélisations ne présagent en rien de la façon dont les intervalles T_n sont eux-mêmes produits fondamentalement. Cependant, il existe des hypothèses sur les moyens qui permettent à l'horloge de mettre en relation la valeur de l'intervalle qu'elle produit (T_n) et la valeur de l'ISI cible lors d'une tâche de synchronisation. Ces moyens sont eux-mêmes sources de variabilité car l'horloge interne doit opérer une approximation de l'intervalle cible en utilisant les ISI perçus. Selon les auteurs, les valeurs des ISI sont moyennées au fur et à mesure qu'ils sont perçus (multiple-look model, Drake & Botte, 1993) ou c'est la distribution des valeurs déjà présentées qui permet de déterminer la valeur de l'intervalle à générer (Scalar Timing Theory, Gibbon & al., 1984). Dans ce dernier cas, la réponse est produite quand le temps perçu est suffisamment proche de la valeur échantillonnée en mémoire. La proximité de l'intervalle T_n avec la valeur cible est mesurée par l'écart à la moyenne :

$$(T_n - m) / m$$

Dans cette relation, m est la valeur échantillonnée. La frappe suivante est produite lorsque ce ratio est inférieur à un seuil (par exemple : 10%).

Ces prédictions ont été confirmées par les données expérimentales (Wing, 2002) et ont donné lieu à des méthodes d'estimation de différents paramètres et à des simulations mathématiques (Kampen & Snijders, 2002). A noter qu'il semble exister un biais par rapport aux prédictions

lié à un nombre trop faible d'IRI dans la séquence (Wing, 1979 cité dans Wing2002) ; à l'inverse dans les séquences trop longues d'IRI, un effet de dérive est observé (Madison, 2001).

A l'heure actuelle, les modélisations des sources de variabilité sont en cours de développement. Leur intérêt est de formuler des hypothèses quant au fonctionnement formel de l'horloge, la question fondamentale étant de savoir comment l'intervalle T_n est mesuré au sein de l'horloge et quelles en sont les bases biologiques. Par ailleurs, ils ne rendent pas compte de tous les phénomènes et ne font pas intervenir le concept de fenêtre temporelle, ni les phénomènes cognitifs comme par exemple l'attention dédiée à la tâche de traitement temporel (Schulze & Vorberg, 2002).

2.6 Interaction avec d'autres processus cognitifs

Une tâche temporelle est rarement limitée au seul traitement de la durée. D'autres processus peuvent intervenir et de par leur déroulement s'influencer mutuellement. Sans mentionner l'effet de l'entraînement à une tâche qui résulte en un fonctionnement plus précis du mécanisme de traitement temporel (Hick & Allen, 1979 ; Hick & Miller, 1976 ; Macar & Besson, 1985) ni les stratégies cognitives (par exemple : Guay & Wilberg, 1983) qui concernent plus spécifiquement les durées supérieures à la capacité de la fenêtre temporelle, 2 autres facteurs méritent d'être évoqués.

Influence de l'attention

L'activité psychologique lors d'une tâche cognitive requiert une certaine quantité de ressources (mémoire, raisonnement, etc.). L'attention dédiée à une tâche correspond à la distribution sélective et volontaire des ressources par rapport aux tâches concurrentes (l'attention est elle-même soumise à l'état de vigilance et d'autres facteurs psychologiques). L'importance de l'attention dans les tâches de traitement temporel a été abondamment étudiée pour des durées supérieures à la limite de la fenêtre temporelle. Cependant, il apparaît qu'**un défaut d'attention affecte aussi la perception des intervalles de très courtes durées** (100 à 500 ms) (Nichelli, Clark, Hollnagel & Grafman, 1995 ; Casini, Macar & Grondin, 1992 ; Grondin & Macar, 1992 ; Zakay & Block, 1996 ; Zakay, 1992 ; Arlin, 1986).

Globalement, si l'attention est détournée pendant l'acquisition de l'information temporelle, alors la tâche non temporelle en mobilisant des ressources fait que l'intervalle est systématiquement sous-estimé. A l'inverse, lorsqu'il s'agit de reproduire une durée en ayant son attention diminuée par le traitement d'une autre tâche, alors la durée produite est plus longue que ce qu'elle devrait (Fortin & Rousseau, 1998). Les performances sont bien entendues meilleures lorsque toute l'attention est dédiée à la tâche temporelle. Cependant, son importance dépend de la durée.

Les durées courtes ont la particularité de composer une unité perceptive. La collecte d'informations est donc globale. Les informations temporelles sont incorporées dans la mémoire de travail pour être traitées. Dans ce cas, toute tâche concurrente, mobilisant des ressources et divisant donc l'attention, perturbe l'acquisition de ces informations, à l'origine par exemple d'erreurs de reproduction (Fortin & Rousseau, 1998).

Ainsi, il existe une interaction entre les processus de traitement temporel et les processus attentionnels. Pour le sujet qui nous intéresse ici, ce facteur n'est que secondaire dans la mesure où pour approcher le fonctionnement central, les protocoles d'études limitent au maximum les traitements concurrents. Le problème est par contre posé lors d'études développementales. En effet, les capacités attentionnelles varient en fonction de l'âge et les différences de performances peuvent être imputées à ce facteur (Block, Zakay & Hancock, 1998, 1999). Les enfants, en particulier pour les tâches temporelles, possèdent des ressources attentionnelles limitées par rapport à l'adulte (Zakay & Block, 1997 cité dans Szelag & al., 2002 ; Zakay, 1992). La conséquence est que, dans les études développementales, ce facteur ne peut être complètement négligé et nécessite de mettre au point des **protocoles rigoureux qui correspondent aux capacités attentionnelles des enfants**.

Par ailleurs, ces capacités varient au cours de la journée et en particuliers chez l'enfant. **Le niveau d'attention est soumis à des variations ultradiennes** (Batejat, Lagarde, Navelet & Binder, 1999) ainsi qu'à des variations au cours de la semaine. Lors d'étude chez les enfants, ce facteur doit être aussi pris en compte.

Concernant les différences interindividuelles, qui peuvent être importantes, les expériences doivent s'attacher à prendre **des populations de sujets homogénéisés**. Ainsi, une population d'enfants scolarisés est assujettie à une régularité dans les demandes attentionnelles de par les activités organisées tous les jours. Pour un même âge et un même niveau, l'importance de l'attention accordée à la tâche expérimentale d'un individu à l'autre peut être approximativement considérée comme équivalente et représentative d'un âge.

En l'état actuel des connaissances, l'importance de l'attention n'a pas été clairement démontrée pour les durées qui nous intéressent. Les données qui doivent être traitées sont maintenues dans la mémoire de travail, nécessitant moins de ressources. Il n'en reste pas moins que les capacités attentionnelles sont plus limitées chez l'enfant et il convient donc d'être prudent en focalisant l'attention de l'enfant par un protocole adapté.

Influence des rythmes circadiens

Tout comme l'attention, de nombreuses fonctions physiologiques et cognitives sont soumises à des variations circadiennes basées sur des oscillations endogènes (Aschoff & Wever, 1981 cité dans Wittmann, 1999 ; Aschoff, 1984 cité dans Ivry & Hazeltine, 1992). Le jugement des durées n'y fait pas défaut (Siffre, 1964 cité dans Fraisse, 1982). Ainsi, des sujets isolés pendant plusieurs semaines de tout indice temporel (libre court), estiment des durées de l'ordre de 1h à 24h mais pas précisément. Cette relative inexactitude de l'estimation pour ces ordres de grandeur a été attribuée au cycle veille/sommeil (Campbell, 1990). L'estimation d'un intervalle d'une heure est corrélée avec la durée de veille et la longueur du cycle circadien (Aschoff, 1985). A l'opposé, les intervalles plus courts sont estimés indépendamment de la période circadienne. Ces observations confirment qu'il existe 2 échelles de temps différentes l'une dépendante de repères circadiens, l'autre, concernant les durées courtes, impliquant des mécanismes plus spécifiques.

Cependant, il ne peut pas être conclu que le traitement des durées courtes est indépendant du fonctionnement de l'horloge circadienne. En effet, **il existe des indices en faveur d'interdépendances indirectes entre ces 2 horloges**. Tout d'abord, l'intensité lumineuse influence l'estimation temporelle pour des durées de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes et n'influence pas celles de l'ordre de l'heure (Aschoff & Daan, 1997). Or, la principale source d'informations pour la synchronisation de la périodicité circadienne avec l'alternance jour/nuit est l'information lumineuse. Par ailleurs, une des sorties de l'horloge circadienne est la température corporelle. Or, un écart de température par rapport à la normale entraîne des estimations erronées des durées (Lockhart 1967 ; Wearden, Penton-Voak, 1995). Etant donné que la température joue un rôle prépondérant sur les vitesses de réaction (métabolique), il est imaginable que la température, soumise à son rythme circadien, induise une modification du niveau d'activation du système de traitement temporel. Il est possible qu'il existe une interrelation entre le système circadien et le système de traitement des durées.



En résumé, les données issues des études de psychologies expérimentales ont permis de caractériser les performances de traitement temporel. Ainsi, il est possible, dès le plus jeune âge, de générer une durée particulière de façon répétée et spontanée. Cette valeur est mesurée au travers du tempo moteur spontané (TMS). Le TMS a pour caractéristique d'être propre à chaque individu, tout en étant compris dans une fourchette allant de 300 à 800 ms. Le TMS ralentit avec l'âge, tout au moins à partir de la petite enfance. De plus, dans ce type de tâche, les frappes (pour un même individu) deviennent plus régulières avec l'âge. Le TMS est une valeur endogène privilégiée qui apparaît être une sortie motrice du système d'horloge. Ce système semble donc se mettre en place progressivement.

L'analyse des tâches perceptives renforce l'idée que le TMS puisse être un indice central du traitement des durées. En effet, la perception des durées apparaît optimale pour les durées proches de celle du TMS. De plus, la manipulation du traitement perceptif a montré qu'il existait une base de temps au sein du système d'horloge dont les pulsations étaient de 5 par secondes.

Les tâches de production, qui permettent d'accéder simplement à la représentation mentale d'une durée, ont révélé que la perception des durées était subjective et se référaient à un centre perceptif. Une conséquence est le phénomène d'anticipation observé dans les tâches de synchronisation. D'autre part, ces expériences ont mis en évidence que la production d'une durée en synchronie faisait intervenir des processus d'ajustement locaux à partir des informations issues du rétrocontrôle sensoriel.

Ensuite, les données issues de l'étude de la variabilité des frappes pour différentes tâches temporelles, il a pu être mis en évidence que la sensibilité du traitement dépendait de la durée à traiter.

Enfin, les études développementales révèlent que le système d'horloge se met en place progressivement en place et que les étapes essentielles se déroulent au cours des 4 premières années. Cependant, elles ne peuvent être déterminées clairement dans la mesure où les données et les interprétations sont le plus souvent contradictoires.

L'ensemble de ces données a ainsi permis de formaliser le fonctionnement de l'horloge, en particulier chez l'adulte, mais cependant, il manque un point fondamental : quelles sont les bases biologiques du traitement des durées ?

3 Les données neurologiques

Le paragraphe suivant vise à mettre en évidence les structures cérébrales qui apparaissent jouer un rôle dans le traitement temporel des durées courtes. L'objectif n'est cependant pas de faire un véritable état des lieux exhaustif des connaissances accumulées jusqu'à maintenant, mais plus de **rapporter** la tendance générale des **hypothèses formulées**. En effet, les sources d'information concernant les structures cérébrales sont très diverses. Chez l'homme, il s'agit aussi bien d'études cliniques, pharmacologiques, électrophysiologiques ou encore d'imageries cérébrales. Chez l'animal, ces mêmes études sont conduites de façon plus précise (études de lésions, micro-injections...) mais les types de tâches temporelles peuvent diverger. Dans l'ensemble, toutes ces techniques ont des contraintes très fortes, elles ne peuvent pas être réalisées sur un grand nombre de sujets et les résultats peuvent être équivoques. En conséquence, il n'existe pas de convergence absolue des données (pour une revue, voir par exemple Harrington & Haaland, 1999).

3.1 Le cervelet

Une autre des principales structures d'intérêt s'avère être le cervelet. Son rôle n'est en effet pas limité aux fonctions motrices et à l'apprentissage sensorimoteur. Il est aussi impliqué dans nombres de fonctions cognitives de par ses nombreuses connections avec d'autres structures cérébrales. Le cervelet est considéré comme un systèmes de neurones de même complexité que le système cortical (Arriada-Mendicoa, Otero-Siliceo & Corona-Vasquez, 1999).

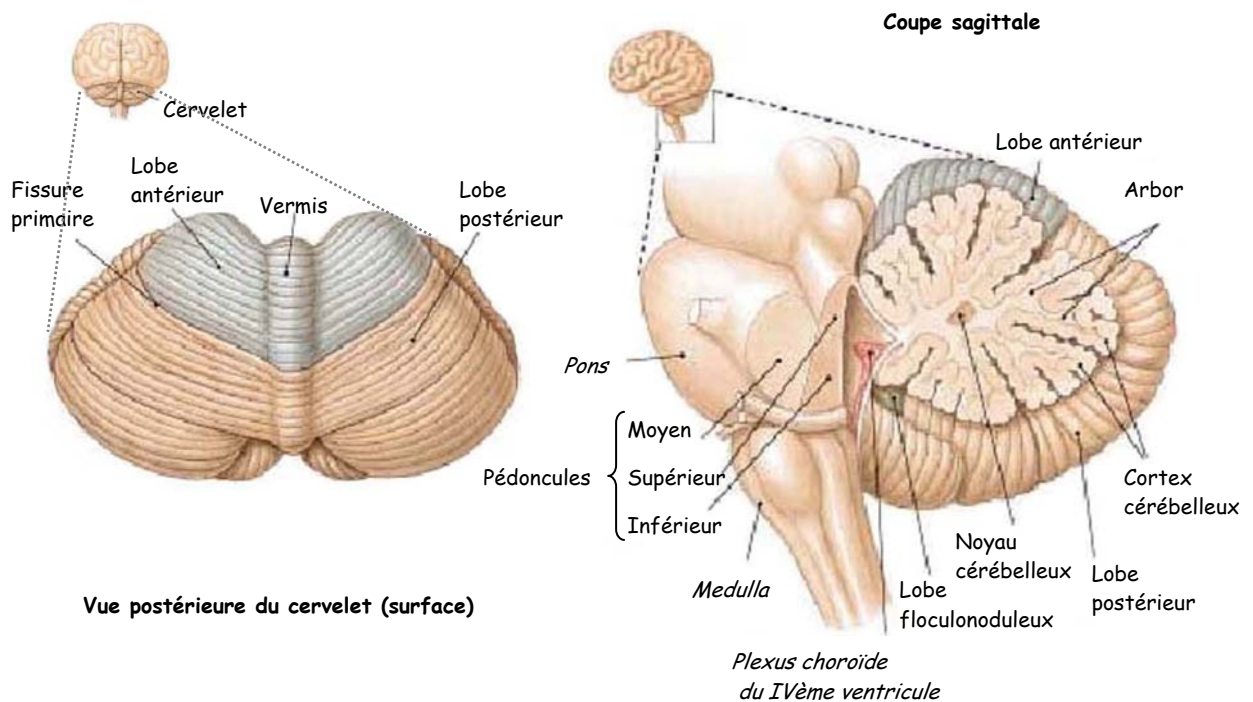


Figure 2 :
Anatomie du cervelet

En particulier, il existe une interrelation entre le cervelet et le cortex : le noyau dentelé du cervelet latéral a des projections vers le cortex prémoteur (à partir du noyau dentelé dorsal) et vers le cortex préfrontal dorsolatéral (aires 9 et 46 particulièrement) (à partir du noyau dentelé ventral). Les opérations traitées par le cervelet, et en particulier celles faisant intervenir des informations temporelles, peuvent donc être à l'origine d'une réponse motrice et envoyer des informations vers la mémoire de travail (localisée dans le cortex préfrontal).

La partie médiane du cervelet projette, elle, vers la moelle épinière contrôlant l'activité musculaire et donc l'exécution motrice d'une tâche (Harrington & Haaland, 1999).

Un autre aspect important à considérer ici est le développement de cette structure avec l'âge. Corrélié à la maturation tardive des fonctions cognitives, **le cervelet** (tout comme le cortex préfrontal) **atteint sa maturité en plusieurs années** (Diamond, 2000).

Implication du cervelet dans le traitement temporel

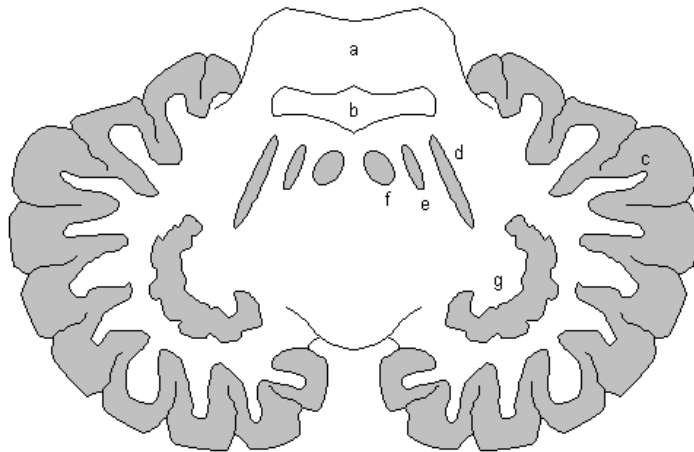
Etant donné son rôle dans l'exécution de programme moteur bien maîtrisé et nécessitant une précision de l'ordre de la milliseconde, le cervelet est un candidat privilégié pour l'identification des bases biologiques du traitement temporel. Les études ont rapidement permis de vérifier son implication dans le traitement des durées courtes (Braitenberg, 1967). Le cervelet intervient à la fois dans la réalisation de tâches perceptive et des tâches de production (Ivry & Keele, 1989 ; Ivry, 1993 cité dans Mangels, Ivry & Shimizu, 1998 ; Jueptner, Rijntjes, Weiller, Faiss, Timmann, Mueller & Diener, 1995 ; Nichelli, Alway & Grafman, 1996) en particulier pour des durées de l'ordre de la centaine de milliseconde. Pour beaucoup d'auteurs, il semble que **la gamme de durées traitées par le cervelet soit limitée à cette échelle de temps**. En effet, des lésions du cervelet ne perturbent pas la perception des durées en deçà de 300 ms et au delà d'une seconde, où les perturbations sont imputées à des déficits dans les processus attentionnels (Nichelli & al., 1996 ; Mangels & al., 1998).

Régions du cervelet spécifiquement impliquées

Le cervelet étant une structure nettement impliquée dans le traitement temporel, l'organisation complexe du cervelet a conduit à rechercher une éventuelle régionalisation du traitement temporel. Les études cliniques (analyse de la variabilité des réponses de patients avec des lésions focales selon le modèle de Wing & Kristofferson) et d'investigation fonctionnelle (imagerie cérébrale) convergent.

Les parties latérales du cervelet, impliquées dans la coordination motrice fine, sont associées au mécanisme central du traitement temporel. Elles sont activées bilatéralement lors de la réalisation d'une tâche perceptive (Jueptner & al., 1995).

La partie médiane, qui est impliquée dans la dynamique globale d'un mouvement, est responsable strictement à l'exécution de la réponse (Ivry, Keele & Diener, 1988 ; Jueptner & al., 1995 ; Griffiths, Johnsrude, Dean & Green, 1999).



**Coupe horizontale de cervelet :
Localisation des noyaux**

- a : Pont.
- b : cavité du 4ème Ventricule.
- c : Cortex cérébelleux.
- d : Embolus.
- e : Globulus.
- f : Noyau du Toît (ou Noyau du Fâîte).
- g : Noyau Dentelé.

Figure 3 :
Coupe du cervelet et localisation des noyaux gris

Cette dissociation est en accord avec les modèles neuroanatomiques qui font ressortir des projections ascendantes depuis le cervelet latéral et des projections descendantes depuis le cervelet médian. **Le mécanisme central du traitement temporel serait localisé essentiellement au niveau de cortex cerebelleux** (néocerevet) et impliqueraient le noyau de la région dentelée et ainsi que le noyau interpositus (Ivry & Keele, 1989 ; Clarke, Ivry, Grinband, Roberts & Shimizu, 1996 ; Rao, Harrington, Haaland, Bobholz, Cox & Binder, 1997).

Il est probable que les **informations temporelles** soient **représentées dans le cortex cerebelleux** du néocerevet **qui reçoit les afférences sensorielles en provenance du cortex**. **Les informations transiteraient ensuite par les noyaux cérébelleux** (Clarke & al., 1996) **pour fournir la réponse en fonction de la tâche**.

Les interprétations de ces études ne sont pas homogènes. Tout d'abord, en ce qui concerne les échelles de durée, la majorité des auteurs reconnaissent que le cervelet peut être impliqué dans le traitement des durées inférieures à la seconde. La boucle cervelet-cortex interviendrait alors dans les mouvements balistiques. Cependant, l'implication du cervelet a été décrite pour des durées de plusieurs secondes (Tracy, Faro, Mohamed, Pinsk & Pinus, 2000) remettant en question cette interprétation. De plus, cette conclusion n'a été que partiellement vérifiée chez l'animal dans la mesure où les effets observés n'étaient que transitoires. La cause serait une réorganisation des régions lésées (Clarke & al., 1996). Par ailleurs, la pathologie des patients sujets de ces expériences est à prendre en considération. Pour une bonne interprétation des

résultats, les sujets doivent présenter des lésions focales du cervelet. Cependant, ces patients sont plus rares que ceux présentant une dégénérescence du cervelet. Les dégénérescences sont non seulement rarement focalisées à une région mais elles ont aussi des répercussions sur la transmission d'informations avec le cortex cérébral. Or, un certain nombre d'interprétations sont issues d'études portant sur des patients présentant les 2 pathologies, voire seulement une dégénérescence du cervelet non focalisée, et parfois le type de pathologie n'est pas précisé (Harrington & Haaland, 1999). Ces problèmes expérimentaux expliquent les divergences d'interprétation de la littérature.

Globalement, il apparaît que le cervelet intervient au moins dans certains aspects du traitement temporel des durées courtes et très probablement son intervention se limite aux durées de l'ordre de la centaine de millisecondes. Les résultats de ces expériences ont permis l'élaboration d'un modèle de traitement des durées impliquant le cervelet qui sera évoqué dans la prochaine partie.

3.2 Les noyaux gris centraux

Les noyaux gris centraux, appelés aussi ganglions de la base sont situés dans la région sous-corticale du cerveau. Ils constituent un système composé d'ensembles de neurones - qualifiés de noyaux - reliés entre eux. Ces noyaux régulent les mouvements involontaires en assurant la coordination des mouvements. Ils ont pour charge essentielle de réaliser (phase de préparation) et de contrôler (phase d'exécution) une succession d'actions motrices planifiées (volontaires). Les ganglions de la base fonctionnent non pas de manière autonome, mais en relation avec d'autres structures du système nerveux central.

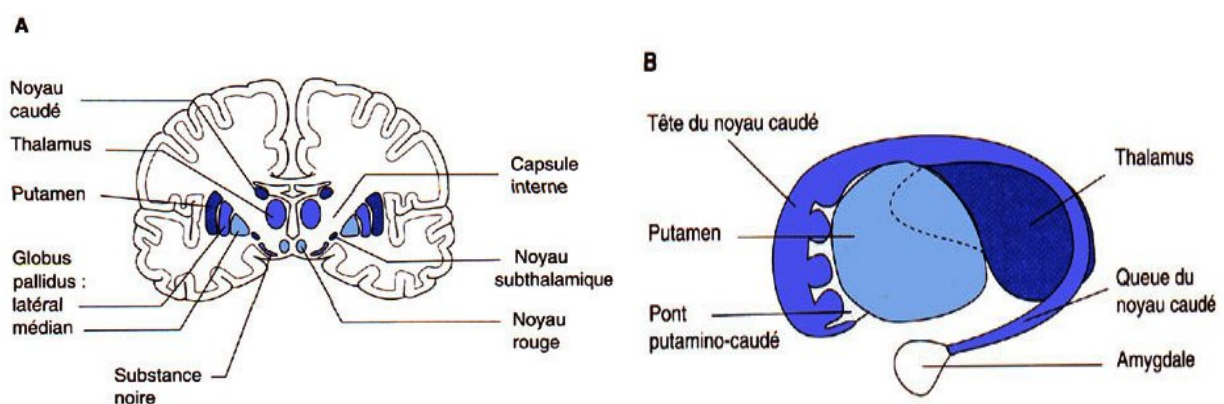


Figure 4 :
Localisation des noyaux gris centraux

Les noyaux gris centraux, de par leur rôle de relais et par leurs implications dans la gestion des comportements dans le temps, sont devenus un candidat privilégié pour la recherche des structures nerveuses impliquées dans le traitement temporel.

Une des pistes privilégiées pour comprendre leur implication dans le traitement temporel est l'étude de patients souffrant de la maladie de Parkinson. Cette maladie correspond à la dégénérescence de neurones d'un des noyaux gris centraux appelé substance noire. Ces neurones émettent des prolongements connectés au striatum et ils y libèrent un neurotransmetteur, la dopamine. Lorsque ces neurones meurent, comme c'est le cas dans la maladie de Parkinson, de moins en moins de dopamine parvient au striatum entraînant une perturbation de la transmission des influx entre ces 2 noyaux (substance noire et striatum). Il en résulte les symptômes de la maladie, essentiellement des troubles moteurs mais aussi des troubles cognitifs. Les patients Parkinsoniens présentent en outre des troubles dans le traitement des durées. La caractérisation précise de ces troubles est un moyen de déterminer le rôle des noyaux gris centraux comme base biologique du système de traitement des durées courtes.

Rôle des noyaux gris centraux dans le traitement temporel

La participation des noyaux gris et particulièrement du striatum aux processus de traitement temporel a ainsi pu être démontrée par des études cliniques sur des patients Parkinsoniens mais aussi par des études de neuro-imagerie chez des sujets sains (O'Boyle, Freeman & Cody, 1996 ; Harrington, Haaland & Hermanowicz, 1998 ; Jueptner & al., 1995 ; Rao & al., 1997).

Les études portent sur des patients Parkinsoniens et des sujets sains ayant le même profil (sujets contrôles) exécutant des tâches perceptives et de productions de durées courtes. L'analyse de la variabilité lors des tâches de production révèle une variabilité centrale et motrice (analyse de la variabilité selon le modèle de Wing & Kristofferson décrit précédemment) significativement plus élevée que chez les contrôles. Ce résultat sur l'augmentation de la variabilité central souligne la nécessité de l'intégrité de ces noyaux pour le fonctionnement normal du traitement temporel.

Lorsque les sujets suivent un traitement médical⁵ spécifique à cette pathologie, ces 2 composantes de la variabilité diminuent (O'Boyle & al., 1996). En particulier, la variabilité motrice des sujets sous traitement est comparable à celle de sujets sains (Harrington & al.,

⁵ Le traitement consiste en une supplémentation en levodopa, qui lorsqu'elle est métabolisée par l'organisme, augmente le niveau en dopamine.

1998 ; Ivry & Keele, 1989 ; O'Boyle & al., 1996). Ces patients Parkinsoniens traités sont donc les plus à même de permettre l'étude du fonctionnement de l'horloge. Certaines analyses ont ainsi montré que ces sujets présentaient spécifiquement **une variabilité centrale élevée suggérant que l'horloge puisse être localisée au niveau de ces noyaux gris centraux**.

Il faut préciser que certains résultats contredisent cette conclusion (Duchek, Balota & Ferraro, 1994 ; Ivry & Keele, 1989). Cependant, une explication peut être avancée. Les résultats et les interprétations des études cliniques consistent en une analyse de la variabilité de la composante centrale (selon le modèle de Wing & Kristofferson). Or, le calcul de cette valeur est obtenu par soustraction de la variabilité de la composante motrice. La composante centrale de la variabilité dépend donc du calcul de la variabilité motrice. Or, cette variabilité motrice dépend directement de l'état de médication des patients (puisque celle-ci est comparable à la normale lorsque le patient est traité). Il est donc primordial que les études expérimentales précisent l'état de médication des patients, ce qui n'est pas toujours le cas. Ce dernier point est à l'origine de divergence en ce qui concerne les interprétations de ces résultats cliniques.

Les études perceptives ont été plus rares. Cependant, elles mettent en évidence une dégradation de la perception des durées que les patients soient traités ou non (Harrington & al., 1998 ; Artieda, Pastor, Lacruz & Obeso, 1992 ; Pastor, Artieda, Jahanshahi & Obeso, 1992). Ces résultats confirment donc l'implication des noyaux gris centraux dans le traitement temporel et notamment ici, dans le traitement perceptif.

Bien qu'il existe des résultats équivoques (Ivry & Keele, 1989 ; et pour une revue voir Harrington & Haaland, 1999), la littérature s'accorde à postuler l'intervention des noyaux gris centraux dans le traitement des durées. Des expériences complémentaires réalisées chez l'animal, ont permis de mieux cibler le rôle de chacun de ces noyaux.

Importance relative des différents noyaux

Compte-tenu des interconnexions entre les noyaux gris centraux ainsi que leurs relations avec d'autres structures cérébrales, il est apparu intéressant d'explorer dans ce contexte les relations fonctionnelles entre ces structures (Figure 5).

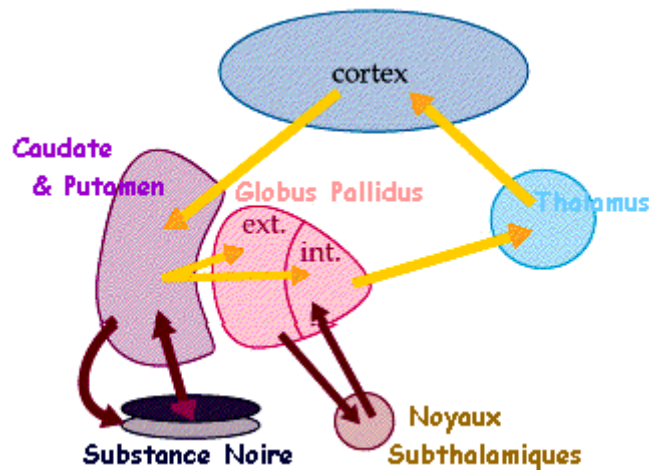


Figure 5 :
Boucles de contrôle :
Interrelations fonctionnelles entre les noyaux gris centraux, le cortex et le thalamus

L'afférence majeure des noyaux gris centraux est une entrée excitatrice en provenance du cortex cérébral (et du thalamus) vers le striatum (noyau caudé et putamen). Les neurones du striatum sont généralement au repos ; leur activité est générée par cette information excitatrice. Deux boucles peuvent être alors activées. La première est une voie directe et relie le striatum au globus pallidus (pallidum) puis au thalamus et au cortex (en jaune sur le schéma). Ce circuit cortico-strio-thalamo-cortical constitue en fait la principale boucle de régulation des noyaux gris centraux. Le second type de boucle fait partie des 4 circuits striataux accessoires identifiés. Ce sont des voies indirectes qui partent du striatum pour relier de façon intermédiaire soit la partie externe du pallidum puis les noyaux subthalamiques pour revenir au pallidum (partie interne) soit la substance noire (boucle impliquée dans la maladie de Parkinson). **Ces boucles de contrôle apparaissent jouer un rôle fondamental dans le traitement des durées courtes**, tout au moins pour des durées supérieures à la seconde (Meck, 1996 ; Matell & Meck, 2000). **Le striatum apparaît être la principale structure impliquée dans le fonctionnement de l'horloge**. L'ensemble des résultats recueillis (et qui n'ont pas été détaillés ici) a permis d'élaborer un modèle de fonctionnement de l'horloge intégrant les données neurobiologiques. Ce modèle sera évoqué plus loin dans cette partie. Cependant, il faut noter qu'il existe une limite à la généralisation de ce modèle liée à l'échelle de temps traité : la plupart des résultats concernent des durées supérieures à la seconde.

3.3 Le cortex

Le cortex préfrontal

Le cortex frontal au sens large intervient dans les processus attentionnels (Harrington & Haaland, 1999). Plus spécifiquement, le cortex préfrontal apparaît fortement impliqué dans le traitement temporel. En effet, il possède de nombreuses connexions réciproques avec les aires associatives (pariétales, temporales et occipitales) mais surtout avec les principales structures sous-corticales dont les noyaux gris centraux et le cervelet, et en particulier le noyau dentelé (mais aussi le thalamus, l'amygdale, l'hippocampe, les noyaux du tronc cérébral). Il est ainsi largement connecté aux zones motrices, perceptives et limbiques. Fonctionnellement, il est impliqué dans la planification motrice et comportementale, et il est particulièrement important pour les conduites autogénérées⁶. Ces fonctions sont exactement celles requises dans les tâches expérimentales de traitement temporel.

Les résultats tendent à valider l'hypothèse que le cortex préfrontal est impliqué dans toute la phase de traitement telle que l'acquisition, la maintenance et l'organisation de l'information temporelle stockée dans la mémoire de travail (Roland, Skinhøj & Lassen, 1981 ; Nichelli, Clark, Hollnagel & Grafman, 1995 ; Mangels & al., 1998 ; Rubia, Overmeyer, Taylor, Brammer, Williams, Simmons, Andrew & Bullmore, 1998).

La structure cérébrale plus spécifiquement associée à la fonction de mémoire de travail est le **cortex préfrontal dorso-latéral** (Posner & Dehaene, 1994 ; Gibbon Malapani, Dale & Gallistel, 1997). L'une de ses fonctions majeures consiste à sélectionner les stimuli pertinents et à activer temporairement les traces mnésiques nécessaires au choix de l'action appropriée, particulièrement si la situation est inédite. Si la tâche devient bien maîtrisée, le traitement est alors délocalisé pour être assuré prioritairement par le cervelet (cependant, on peut imaginer que toutes les tâches ne sont pas alors traitées de la même manière, même si certains auteurs tendent à penser qu'il serait le siège de l'horloge interne pour les durées courtes (*Block, 1992*). L'implication de la fonctionnalité de la mémoire de travail dans les tâches temporelles a été confirmée par des expériences psychologiques (Fortin & Breton, 1995 ; Block, 1996 ; Fortin & Rousseau, 1998) en particulier pour les durées de l'ordre de quelques secondes.

⁶ Un comportement dit autogénéré est initié par la volonté du sujet, c'est-à-dire qu'il correspond à une action volontaire.

Lors de l'exécution de tâche temporelle, les données électrophysiologiques ont mis en évidence une onde, appelée CNV (contingent-negative variation)⁷ prédominante aux environs du cortex préfrontal. Elle se développe pendant l'intervalle séparant 2 événements successifs, environ 300 ms après la présentation du 1^{er} événement. Elle apparaît si la personne anticipe l'attente d'un événement, tel qu'un intervalle temporel, un stimulus, ou peut être même un mouvement (Macar & Vitton, 1979). La CNV est un indice supplémentaire de la participation du cortex au traitement temporel.

Le cortex préfrontal semble donc jouer un rôle périphérique dans le traitement des durées. Il ne serait pas le siège de l'horloge proprement dite mais interviendrait en gardant en mémoire les informations sensorielles contenues dans une unité perceptive. L'importance de son intervention dans les processus de traitement augmenterait avec la durée à analyser.

Participations d'autres structures corticales

Certains autres sites corticaux semblent participer à l'exécution d'une tâche temporelle, comme par exemple l'aire motrice supplémentaire (SMA) (Rao & al, 1997 ; Macar, Lejeune, Bonnet, Ferrara, Pouthas, Vidal & Maquet, 2002) ou le cortex pariétal inférieur (Roland & al., 1981 ; Haarrington & Haaland & Knight, 1998). Le cortex pariétal partage en effet des connections avec les noyaux gris et le cervelet.

Cependant, ces hypothèses émergent essentiellement d'études en imagerie cérébrale qui nécessitent de soustraire une activité témoin à l'activité expérimentale, opération qui peut conduire à certains biais. D'autre part, la très large majorité de ces recherches ne cherchait pas à mettre en évidence la participation d'autres éléments corticaux mais était focalisée sur les noyaux gris centraux, le cervelet et/ou le cortex préfrontal. La participation des structures citées ici a souvent été mise en évidence de façon concomitante au cours de ces études. Cependant, compte-tenu des nombreuses interconnections corticales et sous-corticales, leur participation peut être envisagée au moins en ce qui concerne les processus périphériques liés au traitement des durées supérieures à la seconde.

⁷ La CNV est un potentiel électrique négatif de surface relativement lent enregistré par des électrodes disposées sur le scalp

3.4 Les noyaux suprachiasmatiques

Les données de psychologies expérimentales suggèrent que le traitement des durées courtes puissent être sous l'influence de l'horloge circadienne. L'horloge circadienne est localisée au niveau des noyaux suprachiasmatiques (NSC), une petite structure paire de l'hypothalamus. Une étude portant sur une seule patiente, ayant des lésions des NSC, a montré qu'elle présentait des déficits dans le traitement temporel des intervalles courts (Cohen, Barnes, Jenkins & Albers, 1997). Dans une tâche de continuation, ses IRI sont très supérieurs à ceux des sujets contrôles. Ses réponses sont similaires à celles rapportées dans les études de patients ayant des lésions du cervelet. Ce sujet présente également une variabilité supérieure de la composante centrale et motrice. Du point de vue perceptif, les résultats ont indiqué de graves perturbations lors de tâche de discrimination.

Il apparaît donc que cette structure de **l'horloge circadienne doit être intacte pour permettre un traitement des durées courtes**. Ces résultats suggèrent qu'il existe une relation hiérarchique entre le traitement des durées à l'échelle circadienne et celui des durées courtes.

Dans ce contexte, les NSC sont une structure tout à fait intéressante : elle influence et est capable de réguler de nombreuses activités physiologiques. Parallèlement, elle reçoit les informations du milieu extérieur, essentiellement l'information lumineuse, pour se synchroniser à la périodicité de l'alternance jour/nuit, signifiant qu'elle est capable d'ajuster localement sa phase et sa période. Une particularité intéressante est que les NSC sont eux-mêmes le siège d'oscillations endogènes capables de se maintenir en culture in vitro. Ces oscillations correspondent à des variations circadiennes de l'activité électrique mais aussi métabolique des NSC. Les différentes populations de neurones qui les composent présente des variations circadiennes, propre à chaque type de neurone, de leur synthèse en neurotransmetteurs (Servière & Laviaille, 1996). Par ailleurs, les astrocytes des NSC présentent des modifications circadiennes de leur morphologie et par voie de conséquence engendre les mêmes modifications dans leurs interactions avec les neurones. La physiologie de la plasticité de ces oscillations est plutôt bien connue (Gillette, Tischkau, 1999 ; Laviaille, Bègue, Papillon & Vilaplana, 2000). Par ailleurs, le fonctionnement de cette structure s'altère avec l'âge, et les études physiologiques montrent une diminution de l'amplitude des oscillations (Satinoff, Li, Tcheng, Liu, McArthur, Medanic & Gillette, 1993).

Un fonctionnement autonome et des oscillations qui pourraient servir de base de temps sont autant de propriétés nécessaires à l'horloge du traitement des durées courtes. **Les NSC**

constituent donc, en plus de leur influence hiérarchique, un bon exemple physiologique de modélisation.

3.5 Les neurotransmetteurs

Hormis les structures cérébrales potentiellement impliquées et leurs interconnexions, il est indispensable d'identifier la nature de ces interrelations et les schémas fonctionnels. En cela, les études pharmacologiques peuvent apporter des informations essentielles à la compréhension du traitement des durées courtes.

Les études pharmacologiques se basent le plus souvent sur l'administration de différentes drogues, agonistes ou antagonistes du neurotransmetteur étudié. Des modifications systématiques de l'expérience subjective peuvent être ainsi obtenues. Il est évident que toutes ces expériences sont réalisées généralement sur des modèles animaux, principalement le rat, capable d'exécuter des tâches temporelles de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes. Les résultats sont donc à considérer comme des pistes de réflexions pour conceptualiser le fonctionnement de l'horloge interne, mais avec toutes les restrictions qui en découlent. Par ailleurs, l'essentiel des informations concerne la dopamine et les noyaux gris centraux, ce qui est restrictif par rapport au rôle du cervelet. Cependant, les informations recueillies permettent d'élaborer un modèle de fonctionnement.

La **dopamine**, très présente dans les noyaux gris centraux, est un neurotransmetteur essentiel au fonctionnement de l'horloge : l'administration d'un antagoniste (l'halopéridol, un neuroleptique) provoque des surestimations ; quant à celle d'une substance qui favorise la libération de dopamine (méthamphétamine) elle provoque des sous-estimations. **Les neurones à dopamine sont donc largement impliqués dans le mécanisme central de l'horloge** (Meck, 1996 ; Maricq & Church, 1983 ; Maricq, Roberts & Church, 1981). Au niveau postsynaptique, ce sont les récepteurs D2 de la dopamine qui jouent un rôle majeur dans la détermination du taux d'intégration de l'information temporelle (Meck, 1996 ; Rammasayer & Vogel, 1992). L'étude des synapses à dopamine combinée à l'analyse de la répartition postsynaptique des récepteurs dopaminergiques ont conduit à émettre une hypothèse fonctionnelle : d'une part, le striatum ventral (nucleus accubens) serait impliqué dans les processus motivationnels stimulants et dans la détermination des propriétés de la récompense (approche et action) d'un stimulus, les 2 contribuant à établir une association avec l'importance de la réponse. D'autre part, le striatum dorsal (caudate & putamen) serait

lui impliqué dans les processus d'intégration sensorimotrice (association stimulus/réponse par exemple pour coordonner une réponse avec une entrée sensorielle).

Ces précédentes conclusions concernent là encore des durées supérieures à la seconde. D'autres études suggèrent que le mécanisme de traitement à l'origine de la discrimination temporelle pour les durées de l'ordre de la milliseconde est indépendant du niveau effectif de dopamine dans le cerveau et qu'il existe 2 mécanismes distincts (Rammsayer & Vogel, 1992 ; *autres Rammsayer ?*). Il faut cependant préciser que les substances utilisées dans ces expériences ne sont pas les mêmes (halopéridol et éthanol) et que leurs propriétés peuvent expliquer cette divergence. Il existe donc une ambiguïté dans les résultats liée à cette dualité au sein des durées courtes.

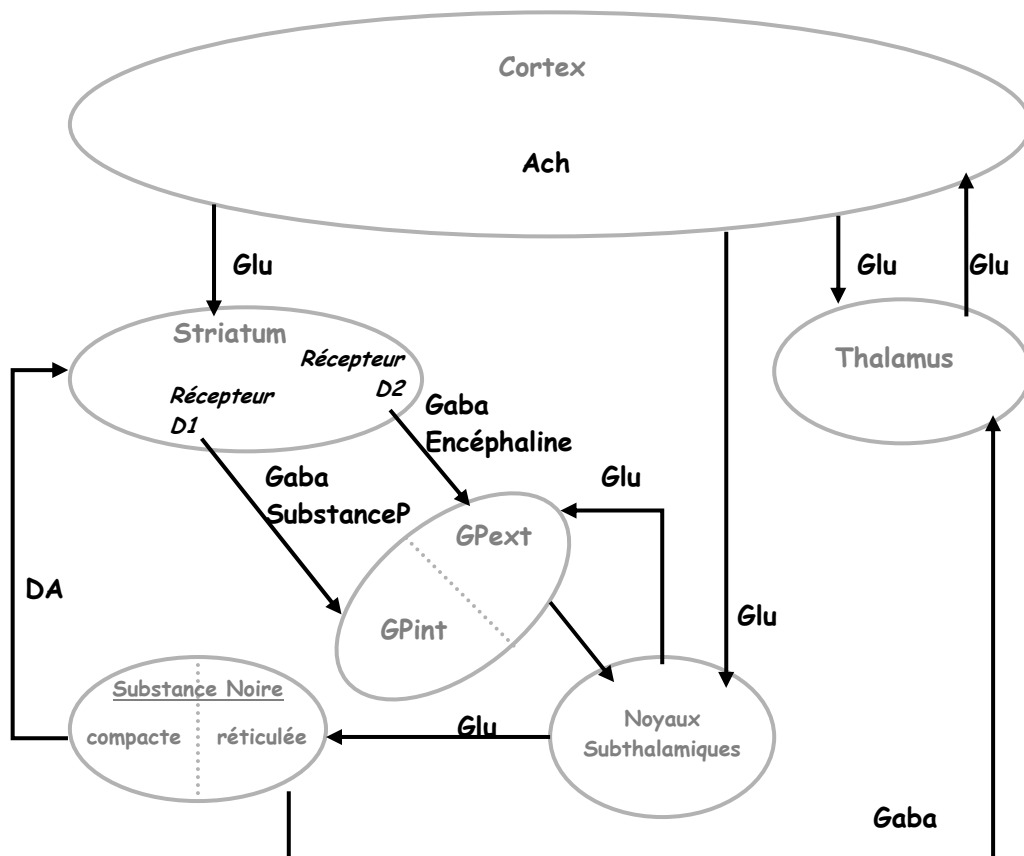


Figure 6 :

Relation entre neurotransmetteurs et structures cérébrales impliquées (d'après Meck, 1996)
 Acétylcholine (Ach) ; Dopamine (DA) ; Récepteurs à la dopamine (D1 et D2) ; Encéphaline ; acide γ-aminobutyrique (GABA) ; L-glutamate (Glu) ; Substance P .

Par ailleurs, la dopamine est un neurotransmetteur que l'on trouve dans le cortex préfrontal et de plus en plus d'études montrent qu'un de ses récepteurs particuliers, le récepteur D1, joue un rôle critique dans l'efficacité de la mémoire de travail (*Block, 1992*). Certaines drogues qui influencent les jugements temporels prospectifs agiraient ainsi parce qu'elles influencent ces récepteurs D1 de la dopamine dans le cortex préfrontal. Les agonistes tendent à allonger la durée jugée en prospective (i.e. ils augmentent la durée subjective), alors que les antagonistes de la dopamine tendent à raccourcir la durée prospective (*Hicks, 1992*).

La dopamine n'est pas le seul neurotransmetteur engagé dans les circuits neuronaux du traitement temporel. Le **glutamate** est aussi impliqué, par le biais de son interaction avec la dopamine. Cette interaction au sein du striatum influencerait sur la détermination de la vitesse de l'horloge interne. Un rétrocontrôle négatif via une boucle cortico-striato-thalamo-cortical servirait à protéger le cortex d'une surcharge d'information et d'une hyperstimulation. Ainsi, anatomiquement des neurones excitateurs (glutamate) projettent du cortex au striatum, les inhibiteurs (**GABA**) projettent du complexe striatal (probablement via les noyaux subthalamiques) vers le thalamus et des excitateurs (glutamate/aspartate) du thalamus vers le cortex.

D'autres études ont montré l'implication de la **sérotonine** (Ho, Velázquez-Martínez, Bradshaw & Szabadi, 2002).

Les boucles striato-cortical constitue le meilleur candidat comme base de fonctionnement à l'horloge interne dans la mesure où ces circuits ont été les plus systématiquement étudiés dans le cadre du traitement des durées supérieures à la seconde. Le principal neurotransmetteur serait donc la dopamine, confirmant par la même l'hypothèse d'une localisation de l'horloge dans les noyaux gris centraux. Cependant, compte-tenu de résultats contradictoires, des recherches complémentaires sont indispensables pour élucider complètement les mécanismes à la source de l'horloge et toujours avec la réserve que ces résultats concernent des durées supérieures à la seconde.



La première conclusion de cette revue des données neurologiques est que les résultats ne convergent pas pour désigner une structure cérébrale particulière comme siège de l'horloge. Les données sont difficiles à interpréter sur un même plan en raison des contraintes

expérimentales, de problèmes méthodologiques et des questions posées par les auteurs. Tous ces points sont encore fortement dépendants de l'étude en question.

Les 2 structures cérébrales qui semblent être le siège de l'horloge sont le cervelet et les noyaux gris centraux. Globalement, les résultats des études mettent en évidence la scissure entre durées perçues et durées estimées. Un certain nombre d'auteurs suggèrent qu'il existe 2 structures de traitements distinctes (Hazeltine, Helmuth & Ivry, 1997 ; Wittman, 1999). Le traitement des durées allant de quelques fractions de secondes à quelques secondes relèveraient de cervelet et celui des durées de quelques secondes à quelques minutes dépendrait des noyaux gris centraux. Chacune de ces structures aurait son propre mode de traitement de représentation des durées. Le cervelet aurait un mécanisme basé sur un système d'intervalles qui servirait de référence. Le système localisé dans les ganglions de la base reposerait sur un mécanisme type horloge, où l'existence d'une base de temps, sous forme de pulses, permettrait de quantifier (par comptage des pulses écoulés) la durée. Ces 2 systèmes ont été respectivement à l'origine du développement d'un modèle correspondant qui seront évoqués dans le chapitre suivant.

Pour finir, il ne faut pas négliger le rôle du cortex, et du cortex préfrontal en particulier dans les processus périphériques. Il serait responsable de la rétention des informations perçues pendant une unité perceptive dans la mémoire de travail. Enfin, il est envisageable que les noyaux suprachiasmatiques, siège de l'horloge circadienne, chapeautent ou interagissent avec les autres structures et qu'ils puissent influencer le traitement des durées courtes.

4 Modèles du temps psychologique

L'ensemble de ces données expérimentales, tant psychologiques que neurobiologiques, représente autant d'informations qui visent à comprendre de quelle manière une durée est représentée et traitée par le cerveau. De très nombreux modèles ont été évidemment développés pour rendre compte de tout ou partie des observations. La plupart sont axés de façon privilégiée sur une catégorie d'information relativement pointue : par exemple, le modèle de Collyer de ses collaborateurs (1992, 1994) cherche à expliquer « l'oscillateur signature », celui de Povel et Essens (1985) le traitement de séquence rythmique.

Parallèlement, plus les données s'accumulent, plus les modèles deviennent complets et leur nombre diminue. En effet, l'objectif d'une modélisation est d'élaborer une théorie unique et générale qui intègre à la fois les données obtenues chez l'homme et chez l'animal et surtout qui permet d'expliquer les résultats aussi bien en perception qu'en production et ce idéalement, pour toutes les échelles de temps et quel que soit le type de distribution des événements (d'aléatoire à prévisible). Assez peu de modèles tendent à approcher cet objectif, ceux qui sont présentés dans la suite de ce paragraphe en font partie. Par ailleurs, leur validité est directement dépendante de leur cohérence et de leur réalité biologique.

Il est question ici de modéliser uniquement les jugements temporels prospectifs, c'est-à-dire que le traitement de la durée porte sur un événement qui va avoir lieu ou qui est déjà en cours. A l'opposé, les jugements temporels rétrospectifs demandent aux sujets de se souvenir et d'évaluer la durée déjà écoulée. Le traitement temporel rétrospectif ne fait pas du tout appel aux mêmes mécanismes que celui dont il est question dans cette revue : la durée étant écoulée, la quantification ou le jugement relatif de la durée fait appel qu'à des processus mnésiques pour l'essentiel (*réf o→ //Wittman1999 ? & //DrakeHDR1998 Concept de traitement de l'info indépendamment d'une horloge : Allan1979 ; Block1990 ; Ornstein1969 ; Michon1972*). En ce qui concernent les jugements prospectifs, la distinction entre estimation de la durée et perception du présent subjectif, révélée expérimentalement, suggèrent des mécanismes quelque peu différents, même si une base commune peut être envisagée.

Deux grandes catégories de modèles s'opposent selon que le fonctionnement de leur horloge interne est basé ou non sur des oscillateurs. Le concept d'oscillations endogènes, constituant une base de temps par le biais de leur période, est le plus communément adopté pour expliquer le fonctionnement de l'horloge interne.

L'objectif de ce paragraphe n'est pas de redémontrer les modèles existants mais de présenter 3 modèles reconnus et cohérents avec les données de la littérature.

Le premier modèle, non oscillant est celui issu des travaux d'Ivry et de ses collègues. Il met en avant le rôle du cervelet. Le mécanisme de l'horloge est basé sur des intervalles qui lui servent de référence. Il présente l'avantage d'avoir été développé à partir de données dans la gamme de durées qui nous intéresse ici (ordre de la centaine de millisecondes). Mais, il n'est pas encore suffisant pour rendre compte de toutes les observations.

Le deuxième modèle, basé sur des oscillations au sein des noyaux gris centraux, est présenté ici dans la mesure où il est à l'heure actuelle le plus complet (il intègre une grande variété de sources d'informations), le plus réaliste biologiquement et sans doute aussi pour ces raisons l'un des plus reconnus dans la littérature. Cependant, il est basé sur des résultats d'études traitant de durées de quelques secondes à plusieurs minutes, et donc intégrant plusieurs unités perceptives.

Enfin le dernier modèle, basé lui aussi sur des oscillateurs, est celui dont le cadre théorique est le mieux adapté aux études présentées. Il est en effet le seul modèle à fournir des hypothèses développementales à l'évolution des capacités de traitement temporel des durées courtes.

4.1 Le multiple timer model (Ivry & Richardson, 2002)

Dans ce modèle, les durées sont mesurées par un système d'intervalles. La représentation temporelle repose sur un ensemble d'intervalles de durées variables, assimilables à autant de sablier. **Un des arguments en faveur de ce modèle est que cette représentation par un nombre fini d'intervalle** rend compte de la limitation de ce mécanisme à une échelle de durée et qui **peut expliquer la discontinuité des performances temporelles** ; à l'opposé, les systèmes d'oscillation permettant un grand nombre de combinaisons suggèrent une continuité dans le traitement des durées, quelle que soit l'échelle, ce qui ne correspond pas exactement à la réalité.

Une des particularités de ce modèle concerne les tâches de production. Si ce modèle admet un mécanisme central à l'origine du traitement perceptif et de la production temporelle, il postule **l'existence de plusieurs unités de traitement**, chacune ayant une spécificité temporelle. La représentation d'intervalles particuliers nécessite la coordination de plusieurs de ces unités. De plus, ces unités sont spécifiques à un type de tâche. Certaines unités sont ainsi dédiées aux tâches motrices et les informations produites en sortie sont destinées aux effecteurs. D'autres unités sont particulières aux tâches perceptives et leurs spécificités sont liées à la modalité

qu'elles reçoivent en entrée. Ce système offre l'avantage d'une plus grande précision lorsque plusieurs unités de traitement travaillent de façon accordées (par exemple, moindre variabilité pour une tâche de production lorsqu'elle est bimanuelle par rapport à une exécution unimanuelle).

Ce modèle postule que **les unités génèrent des signaux indépendamment pour chaque effecteur impliqué dans la tâche de production**. Ces signaux (pris globalement lorsque plusieurs effecteurs interviennent) sont globalement assimilés au niveau central dans la modélisation des sources de variabilité selon Wing & Kristofferson (1973). Les informations obtenues respectivement en sortie correspondent au signal de déclenchement du mouvement. **Ces signaux** ne sont pas directement envoyés aux effecteurs mais **sont traités par un processus central** du type porte de sortie. Ce processus synthétise les signaux **pour générer un unique signal cohérent** (les signaux destinés à chacune des 2 mains sont moyennés pour n'en faire qu'un qui permettra aux 2 mains d'exécuter un mouvement en phase lors d'une tâche temporelle). Les simulations ont permis de retrouver la relation entre variabilité et intervalle cible (loi de Weber). De plus, en même temps qu'il déclenche le mouvement, il réinitialise les unités de traitement pour un nouvel intervalle. Ce processus de synthèse en sortie conférerait la plus faible variabilité observées avec plusieurs effecteurs plus que ne le ferait l'intégration seule des informations obtenues en retour du mouvement (rétrocontrôle). Les informations issues du rétrocontrôle serviraient à améliorer la précision du prochain intervalle à produire (lors d'une tâche de synchronisation), ce qui est tout à fait conforme au modèle de Wing & Kristofferson.

Du point de vue biologique, **les différents intervalles de temps résultent du temps de transmission d'un influx nerveux au sein d'un groupe de neurones modulés par les différentes excitations et d'inhibitions**. Le cortex cérébelleux serait le siège de la représentation temporelle des différents intervalles. Cependant, le cervelet serait uniquement impliqué dans le traitement des durées inférieures à la seconde. **Les intervalles de temps d'une durée supérieure aux capacités cérébelleuses feraient intervenir d'autres systèmes**. Cette idée est cohérente avec le concept de fenêtre temporelle : au-delà d'un traitement perceptif, d'autres mécanismes interviendraient, essentiellement des processus mnésiques. Le processus de sortie serait lui localisé au niveau des ganglions de la base via la boucle fermée cortico-striatale.

Ce modèle présente l'avantage de concerner essentiellement les durées de l'ordre de la centaine de millisecondes. Cependant, il est encore incomplet et certaines faiblesses

demeurent. Les travaux menés par Ivry et ses collègues se sont largement intéressés à l'implication du cervelet, peut être au détriment d'autres structures et d'une vue plus globale du traitement des durées. Par ailleurs, ce modèle est essentiellement construit sur des données de production et aucune prédiction n'émerge clairement quant aux tâches de perception. La construction de ce modèle doit se poursuivre pour fournir des bases biologiques plus réalistes et plus complètes et être généralisable à toutes les tâches temporelles.

4.2 Le striatal beat frequency model (Matell & Meck, 2000)

Ce modèle est l'un des nombreux modèles issus du développement de la « Scalar Timing Theory » (ref//Meck1996). La Scalar Timing Theory est un modèle mathématique des propriétés observées lors de tâches temporelles et notamment la proportionnalité entre durée testée et variabilité mesurée (loi de Weber). Elle a constitué un contexte théorique pour le développement de nombreuses théories du traitement de l'information temporelle.

Toutes ont cependant en commun qu'elles postulent l'existence de **3 composants essentiels**. Le premier correspond à **une base de temps** : il génère un signal répétitif, des pulses, selon une loi de Poisson (Meck, 1996). La vitesse d'émission des pulses est modifiée par certaines drogues, maladies, par la modalité de la stimulation tout comme par la température corporelle. Les processus attentionnels peuvent aussi avoir un impact. Une alternative a été proposée par Treisman (1963, ...), dans laquelle les pulses sont émis à intervalle fixe. Une unité de calibration, sujette aux influences attentionnelles, applique un facteur de gain qui permet d'adapter l'intervalle des pulses à la tâche. Généralement, pour quantifier une durée, les pulses sont stockés dans un accumulateur. Le nombre de pulses est caractéristique d'une durée. Ce type de système rend très bien compte des phénomènes de sous-estimation ou de surestimation liés à la prise de différentes substances dites chronomutagènes⁸ : selon que la vitesse d'émission des pulses est plus rapide ou plus lente, un même nombre de pulses conduira respectivement à une surestimation de la durée ou à une sous-estimation. La base de temps peut soit fonctionner en continue, soit être déclenchée par la stimulation : de toute façon un signal doit parvenir à ce composant, soit pour déclencher le comptage, soit pour déclencher les pulses. L'information obtenue par l'accumulateur est ensuite transmise à **une mémoire de référence** (2^{ème} composant essentiel), qui stocke à long terme pour chaque durée expérimentée une distribution de valeurs de pulses. Cette proposition est tout à fait cohérente

⁸ Un composé pharmacologique est considéré être un chronomutagène s'il est capable d'induire une altération de la période d'un rythme biologique (Rammsayer & Vogel, 1992).

avec le modèle selon lequel les sujets élaborent une représentation mentale de la durée à traiter d'autant plus précise qu'elle est issue de la perception de plusieurs intervalles (expliquant l'utilisation dans les protocoles expérimentaux de temps). Un 3^{ème} composant est **un comparateur** qui permet de réaliser la comparaison entre la valeur obtenue et les distributions de référence.

Dans ce modèle, ce sont **les noyaux gris centraux qui sont le siège de l'horloge et de son émetteur de pulses**. En particulier, le striatum servirait de relais entre les informations en provenance du cortex vers ces noyaux sub-corticaux. Cette structure reçoit aussi des entrées modulatrices dopaminergiques de la substance noire, très impliquée dans la gestion des renforcements. Les informations issues des ganglions de la base sont transmises au cortex via des relais thalamiques. Ainsi, c'est une boucle cortico-striato-thalamo-corticale qui fournirait la base nécessaire au traitement de l'information temporelle. La fonction du striatum serait d'agir comme un « détecteur de coïncidences » entre les signaux en provenance du cortex et ceux en provenance du thalamus. Au niveau cellulaire, cette fonction résulte de l'intégration par un neurone de différentes stimulations dendritiques arrivant dans un même intervalle de 5 à 20 ms. L'importance de certaines afférences seraient modulées par des phénomènes de potentialisation ou de dépression à long terme (qui sont les mécanismes cellulaires privilégiés de l'apprentissage et de la mémorisation). Les neurones du striatum détecteraient les coïncidences entre les différentes oscillations reçues du cortex : chaque oscillation par sa période coderait une durée particulière et c'est la coïncidence de plusieurs périodes qui permettrait de coder toutes les durées à traiter (ce processus est assimilable à celui qui permet en mathématique de trouver le plus petit commun multiple à différents entiers). Les signaux dopaminergiques en provenance de la substance noire (pars compacta) permettraient de contrôler les signaux inadaptés à la tâche. Le fonctionnement biologique de la composante horloge est donc modélisé ici assez précisément.

L'intérêt de ce modèle est qu'il prend en compte de très nombreuses données et différents types mécanismes à l'échelle neuronale tout à fait réaliste. Cependant, en laissant entendre que cette hypothèse de fonctionnement pourrait s'appliquer à toutes les échelles de durées, les auteurs mentionnent toutefois l'hypothèse selon laquelle le cervelet puisse jouer un rôle dans les durées de l'ordre de la milliseconde. Là encore, ce modèle bien que très complet doit être perfectionné pour rendre compte de la distinction entre ces 2 échelles de durées courtes. D'autre part, il ne permet pas de rendre compte de certains résultats fondamentaux de psychologie expérimentale comme l'existence du TMS.

4.3 Le modèle développemental issu de la Théorie de l'Attention Dynamique (Drake, Jones & Baruch, 2000)

Ce modèle est avant tout un **modèle psychologique**. Il est basé sur une théorie développée en premier lieu pour expliquer le traitement de séquences rythmiques complexes. La Théorie de l'Attention Dynamique de Jones (Jones, 1976 ; Jones & Boltz, 1989) modélise dynamiquement la construction de la représentation mentale d'une séquence auditive complexe (telle qu'un rythme, une musique, mais aussi toutes les séquences de l'environnement). Dans ce modèle, toutes les séquences sont considérées comme pouvant être décomposées en différents niveaux hiérarchiques de régularité temporelle. Ce modèle présente **2 particularités** intéressantes. La 1^{ère} correspond à **l'élaboration dynamique de la représentation mentale**, c'est-à-dire que les événements sont intégrés en temps réel. D'autre part, ce modèle explique comment se construisent les attentes attentionnelles du sujet (nous possédons de très bonnes représentations mentales des musiques que nous aimons). Cette gestion des attentes attentionnelles est aussi en accord avec une optimisation des ressources car il limite les surcharges mnésiques. Enfin, ces attentes attentionnelles sont hiérarchisées par rapport à **un niveau privilégié de traitement**.

Ce modèle postule que l'attention va se focaliser prioritairement et spontanément sur les événements de la séquence qui se produisent à une certaine périodicité. Cette période, nommée période de référence, est spécifique à chaque individu et indépendante de l'environnement. Elle correspondrait à un tempo subjectif intra-individuel qui peut être approximé par la mesure du TMS.

La période de référence est générée par un oscillateur particulier et unique. Lors de la perception d'une séquence, cet oscillateur va se caler sur la périodicité de la séquence la plus proche de sa propre période (ce processus est appelé ajustement). Un exemple illustratif est celui d'un auditeur ou d'un musicien qui battra la mesure avec son pied : le tempo qu'il aura spontanément choisi parmi tout ceux disponibles dans la séquence musicale sera celui qui lui est le plus confortable. Le sujet a focalisé son attention sur un certain tempo, qui détermine le niveau de référence. Le choix du niveau de référence est donc lié à la période de référence mais est aussi influencé par les caractéristiques propres du stimulus (comme par exemple les accentuations particulières de certains événements).

Selon ce modèle, le sujet peut, à partir du niveau de référence, déplacer son attention vers des niveaux hiérarchiques supérieurs ou inférieurs. Le sujet peut ainsi prédire l'arrivée de certains

événements ou encore analyser des événements qui se produisent avec une périodicité plus rapide que celle à laquelle il bat la mesure. Il accède donc à une représentation plus complète de la séquence. L'accession (par la focalisation de l'attention) à des niveaux hiérarchiques supérieurs ou inférieurs est permise par d'autres oscillateurs (dont les périodes sont des multiples ou sous-multiples de la période de référence). Ainsi, les attentes ou **les analyses qui peuvent être faite d'une structure musicale sont la résultante du fonctionnement d'un ensemble d'oscillations internes** (appelées rythmes d'attentes : « attending rhythms ») concordants des rythmes externes. Ces oscillateurs ont une période adaptable, dans une certaine mesure, par de petites variations (Large & Jones, 1999). Cette adaptabilité des périodes d'oscillation permet de rendre compte de la flexibilité du système en particulier lors de légères irrégularités temporelles.

Ce modèle, s'il reste très théorique et encore limité au traitement musical, présente l'intérêt d'être aussi applicable aux traitements des tempi. La période de référence est très bien adaptée pour expliquer les performances obtenues avec l'enregistrement du TMS, les tâches de synchronisation et de continuation dans la mesure où plus les événements se produisent avec une régularité proche de celle de la période de référence mieux ils seraient traités. Par ailleurs, l'évolution des performances a été analysée selon une perspective développementale.

L'extension du modèle du point de vue développemental

Les hypothèses à la base de ce modèle permettent aussi de prédire le développement des compétences temporelles. Ainsi, la période de référence ralentirait avec l'âge. Cette prédiction suggère que non seulement le TMS ralentit avec l'âge. Mais il suggère aussi que les performances de synchronisation chez les enfants sont optimales (moindre variabilités entre les frappes) pour des tempi plus rapides que le tempo de traitement optimal chez l'adulte. Parallèlement, les capacités de traitement concernent une gamme de tempi de plus en plus large dans la mesure où le développement correspond au passage de l'utilisation d'un oscillateur principal (correspondant à la période de référence) à celle de plusieurs oscillateurs. Cette hypothèse permet d'expliquer pourquoi, lors des tâches de discriminations de tempo notamment, la zone de traitement optimale s'élargit entre l'enfance et l'âge adulte. De même, cette hypothèse explique pourquoi, dans les tâches de synchronisation et de discrimination, l'ajustement temporel et donc la précision sont mieux maîtrisés avec l'âge.

Ce modèle, bien qu'il n'intègre pas de données issues des études neurologiques, constitue un point de départ théorique particulièrement bien adapté pour comprendre et poursuivre la

modélisation de la mise en place progressive des processus de traitement temporel. De la compréhension de cette mise en place du système de traitement temporel émergeront des propositions complémentaires pour développer un modèle global mais aussi pour postuler un parallèle entre l'évolution développementale précise des structures cérébrales et les performances de traitement. Ce point de vue particulier nécessite au préalable de souligner les quelques questions soulevées par les résultats expérimentaux recueillis jusqu'à présent et ce, à la lumière des connaissances actuelles sur le fonctionnement du système de traitement et surtout des hypothèses de ce modèle développemental.

5 Bilan & problématique

5.1 Synthèse sur le mécanisme de traitement des durées courtes

Cette revue des connaissances disponibles aboutie à la conclusion que le ou les mécanismes de traitement des durées ne sont pas encore élucidés. Il ressort néanmoins que le traitement des durées courtes se caractérise par différentes propriétés. La caractéristique principale est qu'il existe une dualité entre perception de la durée et estimation de la durée ; et cette dualité se trouve matérialisée au travers d'un grand nombre de résultats expérimentaux. Les données ne permettent pas de trancher entre l'existence d'un processus général dont le fonctionnement dépend de la durée (mécanisme de base dédié à la perception relayé par des traitements cognitifs pour les durées plus longues) ou l'existence de 2 processus distincts, l'un dédié à l'estimation, l'autre à la perception.

Les durées courtes constituent une échelle de temps que nous expérimentons quotidiennement dès la naissance. Il est probable que la perception soit issue du fonctionnement d'un mécanisme de mesure du temps proprement dit et qu'à mesure que les durées augmentent, des processus cognitifs prennent le relais et conduisent à une estimation des durées. L'estimation est donc la conséquence de processus plus nombreux, et possède ses caractéristiques propres. Mais aucune donnée biologique ne peut valider cette hypothèse.

Dans ce contexte ambigu, comprendre comment nous arrivons à avoir une représentation précise des durées courtes nécessite en premier lieu d'étudier les caractéristiques directement impliquées dans le mécanisme central à l'origine du traitement des durées courtes, relevant de la perception.

La perception d'une durée fait référence à l'intégration des informations perçues au travers de notre présent subjectif, c'est-à-dire que nous percevons du même coup un ensemble d'événements arrivant dans une fenêtre temporelle n'excédant pas 1 à 2 secondes. Ces informations perçues ensemble définissent une unité perceptive. Le cœur du mécanisme de traitement repose sur un système d'horloge qui utilise ces informations pour quantifier la durée écoulée. La représentation mentale de la durée ainsi extraite peut alors être exploitée par des processus complémentaires soit pour donner un jugement sur cette durée (tâches de perception), soit pour la reproduire (tâches de synchronisation ou de continuation).

Plusieurs hypothèses portant sur les bases biologiques ont été formulées. Le cervelet serait plus particulièrement responsable du traitement des durées inférieures à la seconde et les noyaux gris centraux prendraient le relais pour les durées supérieures, c'est-à-dire les durées estimées. Deux mécanismes différents ont été proposés. Le cervelet serait caractérisé par une moindre flexibilité. Dans la gamme de durées qu'il traite, il ne disposerait pour quantifier une durée donnée que d'un nombre limité de valeurs (des intervalles de référence). Les noyaux gris centraux, eux, disposeraient d'un système de détection de coïncidences au travers de boucles de contrôles complexes. Le point commun de ces 2 mécanismes est le stockage des informations d'une unité perceptive au sein de la mémoire de travail dont le siège serait le cortex préfrontal. Enfin, les noyaux suprachiasmatiques, base biologique de l'horloge circadienne, pourraient interférer avec ces mécanismes.

5.2 Caractéristiques et sensibilité du traitement des durées courtes

Expérimentalement, le moyen le plus fiable pour étudier les performances de traitement est d'utiliser des séquences auditives isochrones appelées aussi tempi. Il s'agit de présenter plusieurs fois un intervalle de temps particulier, défini par l'ISI du tempo. La modalité auditive et la présentation multiple de la durée à traiter permettent au sujet de bien se représenter cet intervalle. Une autre contrainte expérimentale consiste à veiller à ne pas diviser les ressources attentionnelles du sujet. Il est aussi nécessaire qu'elles soient équivalentes d'un sujet à l'autre (moment de la journée fixe, en particulier chez les sujets aux capacités attentionnelles réduites comme l'enfant).

Les principales caractéristiques du traitement temporel sont les suivantes. Tout d'abord nous sommes capables de générer spontanément des intervalles de temps très régulier (TMS). Pour un adulte, son TMS sera en moyenne de 600 ms, mais cette valeur est très variable d'un individu à l'autre. Cette valeur ralentit avec l'âge, au moins à partir de l'enfance. Cet indice qui correspond à la **période de référence** d'un individu, reflète le fonctionnement de l'horloge en l'absence de tout processus additionnel (comme un jugement perceptif, ou la planification d'une réponse motrice).

Une autre capacité est celle de discrimination entre 2 durées. Les **performances de discrimination** ont plusieurs caractéristiques. Ainsi, elles sont dépendantes des durées à discriminer. Il existe une gamme de durées pour lesquelles notre seuil de discrimination sera plus bas (c'est-à-dire optimal), et cette gamme est centrée sur la période de référence de l'individu (mesurée par la valeur du TMS). Cette zone de tempi accessibles s'élargit avec

l'âge, au moins à partir de 4 ans, parallèlement à l'accès à plus grand nombre d'oscillateurs complémentaires (par rapport à celui à l'origine de la période de référence). En fonction des tempi à discriminer, le seuil de discrimination décrirait une fonction en forme de U : **le seuil optimal serait pour des tempi proches de la période de référence** et ce seuil augmentait progressivement en s'éloignant de cette valeur.

En ce qui concerne les tâches de production (synchronisation et continuation), les performances révèlent aussi certaines informations quant à nos processus de traitement. Nous sommes capables d'extraire la durée de l'intervalle pour exécuter une frappe. La représentation mentale s'améliore avec le nombre d'intervalles perçus. Une fois que l'horloge a intégré cette durée, elle est capable de définir un programme moteur pour que la frappe se produise au moment de l'événement délimitant l'intervalle (synchronisation) ou périodiquement (continuation). Cependant, des biais sont constatés. En synchronisation, les frappes arrivent de façon anticipée. L'importance de cette asynchronie négative est relative à l'intervalle à produire. Elle est faible pour des ISI courts en raison de contraintes motrices (mode automatique pour des ISI inférieurs à 300 ms). Elle disparaît pour des intervalles supérieurs à la limite d'une unité perceptive (1 à 2 secondes) : la frappe intervient en réaction au stimulus. Entre ces 2 valeurs extrêmes, l'anticipation est de l'ordre de 30 ms chez l'adulte. Elle est la conséquence de la perception du centre perceptif du stimulus (qui lui-même constitue une durée très brève) et de l'intégration des délais moteurs ainsi que des informations issues du rétrocontrôle sensoriel des frappes précédentes (mode contrôlé).

Les tâches de continuation s'affranchissent de cette information de rétrocontrôle. Cependant elles font apparaître une autre caractéristique du fonctionnement de l'horloge centrale : l'horloge ne peut générer fidèlement toutes les durées. Elle ne peut produire que des valeurs discrètes d'intervalles.

Ces tâches de production nécessitent en effet que l'horloge, capable de générer spontanément un intervalle particulier (TMS), adapte cette valeur pour en produire d'autres. Cette discontinuité est le reflet de contrainte de fonctionnement de l'horloge : soit celui-ci est basé sur un nombre limité d'intervalles de référence (multiple timer model) soit sur un nombre limité d'oscillateurs dont la période est très peu adaptable (théorie de l'attention dynamique). Cependant, quel que soit le mécanisme à la base de l'horloge, ces performances de production sont assez robustes aux irrégularités des stimulations, révélant un mécanisme central performant, capable d'intégrer les informations sur plusieurs intervalles.

5.3 Questions relatives au fonctionnement de l'horloge avant 4 ans

Si les données recueillies chez l'adultes sont nombreuses, il n'existe que très peu d'informations quant au fonctionnement de l'horloge chez le jeune enfant. La principale question est de savoir quelles aptitudes se développent prioritairement et avec quelle précision. Ces questions théoriques sont abordées dans le cadre du modèle développemental qui propose des hypothèses quant à l'évolution du mécanisme d'horloge avec l'âge.

La première question théorique concerne la période de référence de l'horloge à ces âges. Peut-on valider l'extrapolation de l'hypothèse d'un ralentissement de la période de référence dès le plus jeune âge ? Les caractéristiques de la période de référence sont-elles les mêmes dès la naissance ? Comment ces caractéristiques évoluent-elles avec l'âge et comment peut-on les interpréter dans le cadre de la mise en place du système de traitement temporel ?

La seconde question théorique concerne la précision du traitement temporel. Est-elle dépendante de la période de référence ? S'améliore-t-elle parallèlement à la maturation du système de traitement ? Même si le mécanisme de traitement est commun, il n'en reste pas moins que des processus différents interviennent lors des tâches perceptives et lors des tâches de production. Dès lors, la précision du traitement est-elle la même en perception et en production ? Aborder ces questions par ces 2 approches doit permettre de mieux cerner le fonctionnement et les propriétés du mécanisme central.

Expérimentalement, les moyens pour répondre à ces questions théoriques générales sont de mesurer le TMS et de définir la sensibilité de ces processus par des tâches de perception et de production. Ainsi, en perception, le moyen expérimental adapté pour déterminer cette sensibilité est l'étude des capacités de discrimination. Ce type de paradigme permet de mettre en évidence un seuil au-delà duquel 2 durées sont traitées comme étant différentes. En dessous de ce seuil, les durées ne diffèrent pas assez pour être analysées comme différentes par l'horloge. Le seuil de discrimination reflète donc directement la sensibilité de l'horloge. Ce seuil de sensibilité, puisqu'il est caractéristique du fonctionnement de l'horloge, doit pouvoir être mis en évidence dans des tâches de production. Ce seuil doit se matérialiser par une incapacité à produire 2 durées physiquement distinctes mais trop peu différentes subjectivement pour être produites différemment. Ce seuil doit refléter une incapacité de l'horloge à générer distinctement ces 2 durées. Cependant, il est tout à fait imaginable que ces 2 durées soient, malgré tout, perçues comme distinctes.

Trois points principaux sont donc à étudier pour explorer les capacités de traitement de l'horloge chez le jeune enfant : la détermination de la période de référence, le seuil de discrimination entre 2 durées en perception et le seuil de production de 2 durées différentes.

Caractérisation de la période de référence chez l'enfant

Dans le contexte du modèle développemental de Drake & al. (2000), la période de référence représente la durée courte la mieux traitée (c'est-à-dire avec le plus de précision) par le système de traitement temporel. L'hypothèse principale issue de ce modèle est que cette période de référence ralentit avec l'âge. Cette caractéristique a été montrée chez l'adulte, mais chez l'enfant, les données sont encore peu homogènes (*voir §2.1*). D'autre part, très peu de données concernent les enfants de moins de 4 ans. Il apparaît donc nécessaire de pouvoir compléter ces données afin de pouvoir esquisser le profil de développement de la période de référence, en continuité avec les observations faites chez l'adulte. D'autre part la détermination de ses caractéristiques telles que sa variabilité inter-individuelle, mais aussi et surtout sa variabilité intra-individuelle, reflet de la stabilité du mécanisme à sa source sont des informations primordiales pour préfigurer les étapes de développement et potentiellement préciser le mécanisme du traitement des durées.

Evolution des capacités de discrimination de tempo avant 4 ans

Les données et les hypothèses présentées dans cette partie mettent en évidence des lacunes et des contradictions concernant les capacités de discrimination temporelle de l'enfant avant 4 ans. L'extrapolation du modèle développemental de Drake et al. permet de faire des prédictions quand aux capacités des enfants plus jeunes.

Certains résultats laissent supposer que les enfants sont capables de traitement temporel. En effet, il a été montré que les bébés interagissent avec une séquence temporelle auditive (Provasi, 1988 ; Pouthas & al., 1996 ; Chang & Trehub, 1977 ; Demany & al., 1977). Qu'en est-il des capacités de discrimination ? Selon le modèle développemental, les enfants de moins de 4 ans doivent pouvoir discriminer 2 tempi s'ils sont situés aux environs de leur période de référence, et donc par approximation si les valeurs de ces tempi sont proches de celle de leur TMS. Très peu de données permettent de confirmer ces hypothèses. En effet, le seuil de discrimination n'a jamais été déterminé chez l'enfant, seules des différences de 15% ont été testées (Drake & Baruch, 1995) et ce uniquement dans le sens d'une accélération du tempo. De plus, il est difficile de relier les performances obtenues à la période de référence puisque celle-ci n'est pas déterminée. Enfin, une étude s'est intéressée à la discrimination de

tempo chez le bébé de 2 et de 4 mois (Baruch & Drake, 1997). Dès ces âges, les bébés discriminent un tempo de référence de 600 ms d'un tempo 15% plus rapide (i.e. 510 ms). Par contre, ils n'y parviennent pas pour les autres tempi de référence testés (100, 300, 1500 ms) ni lorsque le tempo à comparer est plus lent que celui de référence. Ces résultats suggèrent donc que la période de référence des bébés serait plus proche de 600 ms que des autres valeurs testées et que probablement, le seuil de discrimination serait inférieur à l'unique valeur testée (15% d'écart entre les 2 durées). Ce résultat va en outre à l'encontre de l'hypothèse d'un ralentissement du TMS avec l'âge, puisqu'elle serait située vers 450 ms à 4 ans. De plus, ces données suggèrent une dissymétrie dans le traitement des durées : l'analyse dans le sens d'une accélération serait plus facile à réaliser que dans le sens d'un ralentissement. Cette question n'a jamais été explicitée, pourtant la très grande majorité des études expérimentales se basent sur un traitement dans le sens de l'accélération.

Capacités de production d'intervalles avant 4 ans

L'enfant est capable d'adapter son rythme de frappe spontané pour produire des intervalles différents (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Puisqu'il existe un seuil en dessous duquel 2 durées distinctes ne sont plus discriminées et que l'horloge est responsable du traitement des durées et en perception et en production, alors ce seuil doit exister en production. Il est représentatif du fonctionnement et de la sensibilité de l'horloge. Ce seuil de sensibilité doit donc pouvoir être retrouvé au travers de tâches de production.

Par ailleurs, la probable dissymétrie rapportée pour les tâches de perception doit aussi être retrouvée dans le cadre d'une tâche de production, puisque les mécanismes sont les mêmes. Si le mécanisme est central, alors le seuil de sensibilité doit être identique pour le traitement des durées plus rapides que pour celles des durées plus courtes. Expérimentalement, le même seuil doit pouvoir être mis en évidence. Pourtant il faut tenir compte du fait que la littérature rapporte une difficulté à inhiber un comportement très prégnant chez l'enfant. Ce facteur doit être pris en compte pour l'interprétation des résultats expérimentaux.

Enfin, une étude a mis en évidence que chez l'enfant, une tâche de production, comme une synchronisation, peut induire une modification du tempo moteur spontané (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Ce résultat est cohérent avec les résultats expérimentaux obtenus chez l'adulte lors d'expérience de manipulation de la base de temps de l'horloge (Penton-Voak & al., 1996). Mais cette influence n'est pas confirmée et doit être précisée d'un point de vue

développemental. Ces informations pourront éclairer les étapes de la mise en place de la période de référence.

Difficultés méthodologiques chez le jeune enfant

Une explication à ce manque de données est que les études chez le bébé et chez le jeune enfant présentent des difficultés méthodologiques. Les tâches qui sont demandées au sujet, pour obtenir une bonne précision et des résultats fiables nécessite une attention soutenue et une bonne compréhension de la tâche. Or, la notion globale de temps se met en place très tardivement chez l'enfant (à 8 ans, Droit-Volet, 2000). Il est donc nécessaire de développer des protocoles simples qui ne nécessitent pas de maîtriser explicitement la notion de temps.

Par ailleurs, pour que la tâche intéresse l'enfant et qu'il y participe pleinement, la tâche expérimentale doit s'apparenter à un jeu captivant. Cette nécessité est généralement contradictoire avec la précédente, rendant l'élaboration des protocoles difficiles.

L'intérêt d'un protocole ludique va aussi au-delà d'une simple bonne participation de l'enfant à l'expérience. Il a été mentionné l'importance de la mobilisation de toutes les ressources attentionnelles pour la tâche, pour avoir des résultats fiables. Il est ainsi important chez l'enfant de tenir compte du moment de la journée pour la tâche expérimentale (influence circadienne sur le niveau attentionnel). Les moments choisis doivent être équivalents d'un enfant à l'autre.

D'autre part, le développement cognitif des jeunes enfants est variable d'un individu à l'autre. Pour limiter ce biais, les enfants doivent être recrutés dans des structures collectives où ils exercent tous le même type d'activité au cours d'une journée bien structurée. Les sujets doivent ainsi être testés pendant cette phase où leur activité cognitive est calibrée.

Une dernière contrainte fondamentale est liée à la diversité des protocoles. Compte-tenu de la vitesse de développement des compétences psychomotrices en l'espace de 4 ans, un même protocole n'est pas adapté à une différence d'âge de plus de quelques mois. Or, pour réaliser des études comparables, il est indispensable de modifier un minimum de paramètres.

Toutes ces exigences sont autant de facteurs limitants à l'étude des compétences chez le jeune enfant. Mais étant donnée l'importance de ces informations, il apparaît nécessaire de trouver des protocoles adaptés pour répondre aux interrogations soulevées plus haut.

Objectif du travail expérimental

L'objectif de ce travail expérimental est de déterminer les caractéristiques de traitement temporel chez l'enfant de moins de 4 ans. Plus spécifiquement, nous nous sommes intéressés aux propriétés du système de traitement en mesurant sa période de référence et son niveau de sensibilité en perception et en production. Les paramètres étudiés pour approcher ces valeurs sont le TMS, le seuil de discrimination entre 2 tempi et le seuil au-delà duquel l'enfant est capable de produire des intervalles différents de ceux produits spontanément (TMS).

L'objectif secondaire était de s'intéresser à plusieurs groupes d'âge afin de pouvoir réaliser des comparaisons développementales. En conséquence, la priorité n'a pas été donnée à la détermination précise des compétences de traitement temporel, mais à l'exploration de ces capacités entre 1 et 4 ans.

Le corollaire de cet objectif a donc été d'explorer les moyens expérimentaux adaptés à plusieurs groupes d'âge (à des fins de comparaison) pour évaluer ces paramètres de l'horloge.

Le TMS en reflétant le tempo de traitement optimal de l'horloge constitue un indice de référence pour comprendre l'évolution des capacités de traitement. De la même manière, la détermination du seuil de discrimination permet de connaître les limites du fonctionnement de l'horloge à ces âges.

Des hypothèses de travail ont donc été établies relativement à ces questions théoriques. Elles ont été développées à partir du modèle développemental et peuvent se formuler ainsi :

1. Le système de traitement temporel se développe progressivement, parallèlement à la maturation des structures cérébrales responsable de ce traitement.
2. Le même mécanisme central préside à toutes les tâches de traitement temporel.
3. Il est caractérisé par une période de référence, mesurable par le TMS.
4. La période de référence existe et ralentit dès la naissance jusqu'à l'âge adulte.
5. La période de référence devient plus stable avec l'âge.
6. Le traitement temporel est optimal à proximité de la période de référence.
7. Le traitement devient plus précis au cours de la petite enfance.
8. Il existe un seuil en dessous duquel 2 durées différentes sont traitées comme étant identiques, compte-tenu de la sensibilité du système de traitement.

9. Le traitement d'une durée plus rapide qu'une durée de référence est plus facile que le traitement d'une durée plus lente que la durée de référence utilisée dans la tâche de traitement temporel.

10. La période de référence est influençable, notamment par des stimulations externes.

PARTIE 2

Contribution expérimentale

1 Développement des capacités perceptives des enfants entre 3 et 4 ans : étude de la discrimination de tempo

La première question expérimentale que nous nous sommes posée a été de **trouver un moyen de déterminer la sensibilité du traitement temporel** d'une part en perception et d'autre part à des âges où aucune donnée de ce type n'est disponible. L'indice le plus adapté est le seuil de discrimination entre 2 durées car il reflète directement les limites du fonctionnement de l'horloge. Ce seuil permettra de préciser en dessous de quelle limite temporelle 2 durées sont traitées comme identiques, le système de traitement n'ayant pas une résolution assez fine pour détecter la différence.

L'**idée générale** est de pouvoir, à partir de ces informations nouvellement obtenues, **esquisser le profil de développement de cette sensibilité du système de traitement** et de suggérer des hypothèses quant aux étapes de la maturation de ce système. De plus, ces données pourront être mises en relation avec les valeurs théoriques de la période de référence à chaque âge et ainsi permettre de confirmer ou infirmer les extrapolations du modèle développemental (c'est-à-dire que le traitement temporel est optimal à proximité de la période de référence).

Le **problème théorique** de cette étude a consisté à **choisir le tempo standard pour lequel le seuil de discrimination** sera déterminé. La contrainte, dans ce contexte d'exploration des capacités de discrimination chez le jeune enfant, est que la détermination de ce seuil permette une comparaison avec d'autres données pour offrir une perspective développementale quant à l'évolution des capacités de traitement temporel au cours de la vie.

Pour résoudre ce problème, il est logique de choisir le tempo qui décrira le mieux les capacités de discrimination c'est-à-dire celui où le seuil de discrimination est optimal. Si l'on se réfère au modèle développemental, **ce tempo devra donc être choisi proche de la période de référence**, c'est-à-dire proche du TMS. Cette propriété a été en effet bien démontrée chez l'adulte (Drake et al., 2000) : les meilleures performances de discrimination sont obtenues chez l'adulte pour des tempi situés entre 300 ms et 900 ms et décrivent une fonction en forme de U (Drake & Botte, 1993) dont le minimum correspond à la valeur du TMS de l'individu (en moyenne 600 ms).

Chez l'enfant, il existe des données sur les capacités de discrimination mais aucune ne détermine un seuil de discrimination, et ce quel que soit le tempo standard (proche ou non du

tempo de référence). Les seules données disponibles concernent les performances de discrimination pour un seuil fixe de 15%. Les tempi standards testés étant 100, 300, 600, 1000 et 1500 ms (Drake et Baruch, 1995), les enfants de 4 ans discriminent seulement à 300 ms, à 6 ans à 100, 300 et 600 ms, à 8 ans à 100, 300, 600 et 1000 ms et à 10 ans, ils y parviennent pour tous les tempi testés tout comme l'adulte. Non seulement, la gamme de tempi accessibles s'élargit avec l'âge, mais elle se décale progressivement vers des tempi plus lents parallèlement au ralentissement de la période de référence (Drake & al., 2000). **Ces résultats chez l'enfant de plus de 4 ans, sont conformes au modèle développemental.** Cependant, il faut noter que ni le tempo de discrimination optimale (reflétant le tempo de traitement optimal, correspondant théoriquement à la période de référence), ni la valeur du seuil de discrimination ne sont identifiés.

Avant 4 ans, les seules données de discrimination concernent les bébés : à 2 et 4 mois, les bébés discriminent seulement un tempo de 600 ms d'un tempo 15% plus rapide (i.e. 510 ms) ; ils n'y parviennent pas pour les autres tempi (100, 300 et 1500 ms) et ni parviennent pour aucun de ces tempi lorsque ceux-ci doivent être comparés à un tempo 15% plus lents (Baruch & Drake, 1997). Là encore, le seuil de discrimination n'est pas déterminé. La seule information est que pour ces âges, à 600 ms, le seuil de discrimination est inférieur à 15%. Ces données laissent supposer que la période de référence chez le bébé serait plus proche de 600 ms que de 300 ms comme le suggérerait l'hypothèse selon laquelle la période de référence ralentie avec l'âge. En effet, dans la mesure où la période de référence est inférieure à 450 ms à 4 ans, le traitement optimal et donc la discrimination à 15% devrait être obtenue plutôt pour le tempo de 300 ms que celui de 600 ms. **L'hypothèse du ralentissement de la période de référence ne semble donc pas valable à cet âge.**

La remise en cause de cette hypothèse est renforcée par les données se rapportant au TMS chez l'enfant. Il a été souligné dans la première partie de ce document que les données n'étaient pas homogènes et que l'hypothèse du ralentissement du TMS avec l'âge ne semblait pas s'appliquer avant 7 ans.

Dans le contexte du modèle développemental, il existe donc une ambiguïté entre les résultats obtenus chez l'enfant et ceux obtenus chez le bébé : **il semble que l'hypothèse du ralentissement de la période de référence dès la naissance et que celle du traitement optimal des durées pour des intervalles proches de la période de référence ne puissent s'appliquer ensemble au jeune enfant de moins de 4 ans.** Ces données conflictuelles démontrent en outre que le système de traitement des durées courtes suit une évolution

particulière entre ces âges. Celle-ci serait probablement liée aux nombreuses maturations subit par les structures cérébrales de l'enfant au cours des premières années de sa vie, et notamment les maturations subit par le cervelet (qui est un bon candidat aux traitement des durées courtes même si aucune structure n'a été proposée dans le modèle développemental).

Dès lors, en raison de cette ambiguïté, choisir le tempo le plus proche de la période de référence pour obtenir un seuil de discrimination optimal n'est pas le choix le plus adapté pour explorer les capacités de discrimination du point de vue développemental. **Nous avons donc préféré choisir un tempo indépendamment de la période de référence**, l'objectif de cette étude étant de pouvoir déterminer et comparer le seuil de discrimination. Le tempo retenu est de 600 ms. En effet, cette valeur est une valeur de référence dans la littérature et plusieurs raisons ont motivé ce choix. Tout d'abord, ce tempo est celui de la période de référence chez la plupart des adultes. D'autre part, cette valeur est également bien traitée chez les bébés, leur seuil de discrimination à 600 ms devant être inférieur ou égal à 15%. Ensuite, les enfants de 4 ans, s'ils ne discriminent pas un tempo de 600 ms d'un tempo 15% plus rapide peuvent être capable d'une discrimination à 600 ms mais pour un seuil légèrement supérieur. **Ainsi, il apparaît que chaque individu, dès 2 mois jusqu'à l'âge adulte, est capable de discriminer un tempo de 600 ms d'un autre, le seuil de discrimination évoluant probablement avec l'âge aux environs de 15%**. La comparaison des performances d'un point de vue développemental sera donc favorisée par ce choix de tempo.

Par ailleurs, cette étude est ciblée sur les enfants de 3 et 4 ans. En effet, l'absence de données se situant entre 1 et 4 ans, nous avons choisi de nous intéresser à ces âges afin que les résultats nous permettent de faire le lien avec les résultats obtenus dès 4 ans. Pour des raisons d'adéquation du protocole expérimental, seul un écart de quelques mois pouvait séparer les groupes d'âge. De plus, les enfants ont été recrutés au sein d'un même niveau scolaire afin de limiter les variations inter-individuelles de développement cognitif.

Pour répondre aux contraintes de ces âges, nous avons choisi d'élaborer **un protocole qui n'impliquait pas de notion de temps explicite**. Une particularité de ce protocole est que les tempi à discriminer n'ont pas été choisis selon les paradigmes expérimentaux habituels. Plutôt que d'utiliser la valeur 600 ms comme tempo de référence et faire varier un second tempo, nous avons utilisé **2 tempi variables**. Cette méthode présente 2 avantages. Le premier est qu'il évite un effet d'apprentissage au fur et à mesure des séances qui biaiserait les résultats. L'expertise est en effet un facteur d'amélioration des performances de traitement temporel, même chez l'enfant (Drake, 1998 ; Drake & al., 2000). Dans le cas d'un tempo

standard fixe comparé à un tempo variable, l'enfant aurait été amené à se construire un repère absolu pour le tempo de 600 ms, ce qui aurait été une aide du type expertise pour discriminer les 2 tempi. Or, nous ne souhaitons pas faire intervenir ce facteur et ce d'autant plus que les capacités d'apprentissage peuvent varier d'un individu à l'autre. D'autre part, les études déjà menées montrent que les bébés en particulier discriminent un tempo standard d'un tempo plus rapide, mais ne parviennent pas à le faire si le tempo variable est plus lent. Choisir 2 tempi variables permettait de ne pas favoriser un sens de variation et de s'affranchir de ce paramètre. La variation entre les tempi à discriminer a donc été définie de la façon suivante : $600 \text{ ms} \pm X\%$.

Les conditions expérimentales étant ainsi déterminées, l'objectif était donc de situer le seuil de discrimination pour un tempo de référence de 600 ms. L'objectif secondaire était de vérifier que les performances de discrimination s'améliorent avec l'âge et évidemment que ces performances diminuent avec la difficulté de la discrimination. Notre travail était donc basé sur les hypothèses suivantes :

1. Les enfants entre 3 et 4 ans sont capables de discrimination de tempo autour de 600 ms
2. Le seuil de discrimination à 600 ms se situe aux environs de 15%
3. Les performances de discrimination augmentent avec l'âge
4. Le seuil de discrimination diminue avec l'âge

1.1 Méthode

Sujets

L'étude a concerné 48 enfants répartis de la façon suivante : 26 enfants âgés de 4 ans (8 filles et 18 garçons ; âge moyen = 3,79, SD = 0.06, écart : 3,70-3,96) et 22 enfants âgés de 3 ans (10 filles et 12 garçons ; âge moyen = 3,23, SD = 0.06, écart : 3,17-3,36). Neuf enfants supplémentaires ont participé à l'expérience, mais ont été exclus de l'analyse en raison de leur comportement face au jeu proposé. Tous les enfants sont issus de la même école maternelle (Paris, 5^{ème}) : les 2 classes de petite section ont été concernées, sur 2 années scolaires. De plus les enfants ont été testés en 2^{ème} partie d'année scolaire : il peut être ainsi postulé que les différences inter-individuelles de développement cognitif sont réduites par ces 6 premiers mois d'apprentissage scolaire. Pour tout ces enfants, les parents ont préalablement donné leur autorisation après avoir été dûment informés.

Matériel

L'expérience s'est déroulée dans une petite pièce isolée et contiguë à une des 2 salles de classe. L'enfant, seul avec l'expérimentateur, était assis sur une chaise face à une table de tailles adaptées. Sur la table était disposés un ordinateur portable connecté à 2 gros boutons (de 4 cm de diamètre) fixés sur un support en bois et à un haut-parleur. Les 2 boutons étaient suffisamment écartés (20 cm entre les 2 boutons) pour permettre à l'enfant d'appuyer dessus confortablement. Sur le support, sous chaque bouton, étaient placées 2 images équivalentes représentant l'une un lapin (bouton de gauche), l'autre une tortue (bouton de droite). Cette disposition était la même pour tous les sujets et tout au long de l'expérimentation. L'écran de l'ordinateur, orienté convenablement pour le regard de l'enfant, était destiné à faire apparaître une image de renforcement (image de 200 pixels de dimension 20 cm x 20 cm) consécutivement à une réponse correcte.

Le logiciel a été spécialement développé pour cette expérience. Il a été conçu pour générer des séquences isochrones de 10 sons (50 ms, 1000 Hz). Le programme élaborait 1 paire de séquences (une séquence rapide et une séquence lente) à partir d'un paramètre de variation (X%). Pour la séquence rapide, l'intervalle entre les sons (ISI, Intervalle Inter Stimulus) était défini comme étant égal à $600 \text{ ms} - X\%$; pour la séquence lente, l'ISI était de $600 \text{ ms} + X\%$. Les 2 ISI présentaient donc une variation symétrique par rapport à un tempo de 600 ms. La paire d'ISI ainsi définie est notée $600 \text{ ms} \pm X\%$.

La séquence rapide était associée au lapin, tandis que la séquence lente était associée à la tortue. Après la diffusion de chaque séquence, l'ordinateur enregistrait la réponse de l'enfant. Celle-ci correspondait au premier appui sur l'un des 2 boutons. Elle devait intervenir dans un délai de 5 secondes après la fin de la diffusion de la séquence. Si la séquence qui venait d'être diffusée était la séquence rapide, la bonne réponse correspondante était un appui sur le bouton de gauche (associé au lapin) et faisait apparaître simultanément sur l'écran l'image du lapin (identique à celle placée sous le bouton) pendant 1 seconde. Respectivement, une réponse correcte après la diffusion d'une séquence lente était un appui sur le bouton de droite et faisait apparaître l'image de la tortue. Une réponse incorrecte n'avait pas de conséquence (aucune image n'apparaissait).

La diffusion de la séquence suivante était commandée par l'expérimentateur, quand ce dernier avait obtenu l'attention de l'enfant. La succession des séquences était aléatoire.

Procédure

L'expérience était divisée en 5 séances, chaque séance ayant eu lieu un jour différent. Le délai entre la 1^{ère} séance et la dernière a été de 11 jours (moyenne = 10,94 jours, SD = 4.24). Chaque séance durait environ 15 minutes. Elles avaient pour objectif d'évaluer les performances de discrimination (taux de bonnes réponses) pour une paire de séquences. Ainsi, la 1^{ère} séance correspondait aux 2 ISI 600 ms \pm 50% (300 ms vs. 900 ms), la 2^{ème} à 600 ms \pm 20% (480 s vs. 720 ms), la 3^{ème} à 600 ms \pm 15% (510 s vs. 690 ms), la 4^{ème} à 600 ms \pm 10% (540 s vs. 660 ms) et la 5^{ème} à 600 ms \pm 5% (570 s vs. 630 ms). La 1^{ère} séance a été conçue pour être particulièrement facile afin de s'assurer que la tâche puisse être comprise et réalisée par les enfants de cet âge (Tableau 1).

Caractéristiques de la séance	Séries	Conditions	Composition de la série
Séance 1 : 600 ms ± 50% ISI séquence rapide : 300 ms ISI séquence lente : 900 ms	Démo	“Ecoute le lapin” “Ecoute la tortue”	1 séquence rapide 1 séquence lente
	Série 1	Aidé	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
	Série 2	Sans aide	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
	Série 3	Sans aide	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
Séance 2 : 600 ms ± 20% ISI séquence rapide : 480 ms ISI séquence lente : 720 ms	Démo	“Ecoute le lapin” “Ecoute la tortue”	1 séquence rapide 1 séquence lente
	Série 1	Aidé	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
	Série 2	Sans aide	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
	Série 3	Sans aide	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
Séance 3 : 600 ms ± 15% ISI séquence rapide : 510 ms ISI séquence lente : 690 ms	Démo	“Ecoute le lapin” “Ecoute la tortue”	1 séquence rapide 1 séquence lente
	Série 1	Aidé	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
	Série 2	Sans aide	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
	Série 3	Sans aide	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
Séance 4 : 600 ms ± 10% ISI séquence rapide : 540 ms ISI séquence lente : 660 ms	Démo	“Ecoute le lapin” “Ecoute la tortue”	1 séquence rapide 1 séquence lente
	Série 1	Aidé	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
	Série 2	Sans aide	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
	Série 3	Sans aide	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
Séance 5 : 600 ms ± 5% ISI séquence rapide : 570 ms ISI séquence lente : 630 ms	Démo	“Ecoute le lapin” “Ecoute la tortue”	1 séquence rapide 1 séquence lente
	Série 1	Aidé	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
	Série 2	Sans aide	10 séquences rapides + 10 séquences lentes
	Série 3	Sans aide	10 séquences rapides + 10 séquences lentes

(NB : les séquences étaient diffusées dans un ordre aléatoire)

Tableau 1 :
Synthèse des caractéristiques du protocole expérimental en fonction des séances

Chaque séance se déroulait de la façon suivante : une démonstration suivie de 3 séries de 20 séquences (10 rapides et 10 lentes en ordre aléatoire). Durant la démonstration, l'expérimentateur disait simplement : « écoute le son du lapin (/tortue) » suivi de « donc, il faut appuyer sur le lapin (/tortue) et regarde ! ». La 1^{ère} série, réalisée avec l'aide de l'expérimentateur, était destinée à ce que l'enfant associe la séquence rapide et le lapin, et la séquence lente et la tortue. Les 2 séries suivantes étaient réalisées sans aucune aide. La comparaison des performances entre ces 2 dernières séries permettra d'évaluer un éventuel effet de l'apprentissage ou d'ennui. Un éventuel effet d'un coté préféré pour les réponses sera quant à lui mis en évidence par une performance de 50% de bonnes réponses (les séquences rapides et lentes, en nombre équivalent, étant diffusées dans un ordre aléatoire).

1.2 Résultats

L'analyse a été basée sur le nombre de réponses correctes. Une note (allant de 0 à 20) a donc été attribuée pour chaque série, sur la base d'un point par bonne réponse.

Afin de déterminer si les réponses des enfants étaient statistiquement différentes de réponses données au hasard, les notes de tous les enfants, pour chaque essai de chaque séance, ont été comparées à la note théorique de 10/20 par un χ^2 (cette note de 10 correspond à des réponses données au hasard). Les autres analyses ont été des analyses de variance (ANOVA) basées sur 2 facteurs inter-individuels (âge et sexe) et 2 facteurs intra-individuels (séance et série). Le plan d'expérience était le suivant :

$$S < \text{Age}_2 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Séance}_5 \times \text{Série}_2$$

1.2.1 Adéquation du protocole

Les résultats de l'analyse par χ^2 ont montré que **les enfants ne répondaient pas au hasard** (Tableau 2) **au cours des 4 premières séances**. Les réponses recueillies au cours de la dernière séance ne sont, elles, pas différentes du hasard.

Ces résultats permettent de réfuter l'hypothèse selon laquelle les enfants auraient pu répondre en fonction d'un coté préféré.

Le protocole était donc adapté aux aptitudes des enfants entre 3 et 4 ans.

Séance	Série	Nombre de Sujets	Note par essai	Taux de réponses correctes	Chi ²	p<
S1	Set 2	47	15,47	78.94 %	235.70	.001
	Set 3	47	16,11		250.50	.001
S2	Set 2	41	14,69	73.57 %	176.20	.001
	Set 3	39	14,74		158.50	.001
S3	Set 2	39	13,18	65.83 %	131.20	.001
	Set 3	39	13,15		129.10	.001
S4	Set 2	37	13,24	64.12 %	100.60	.001
	Set 3	37	12,41		74.90	.005
S5	Set 2	35	10,26	48.00 %	28.30	NS
	Set 3	34	8,94		15.40	NS

Tableau 2 :
Résultat de l'analyse (chi²) des réponses correctes en fonction des séances et des essais

1.2.2 Evolution des performances au cours des séances

L'ANOVA portant sur le nombre de réponses correctes révèle 2 effets principaux. Le premier effet est lié à l'âge ($F(1,28)=5,26$; $p<.05$) : **les enfants les plus âgés ont des performances supérieures aux plus jeunes** (Figure 7).

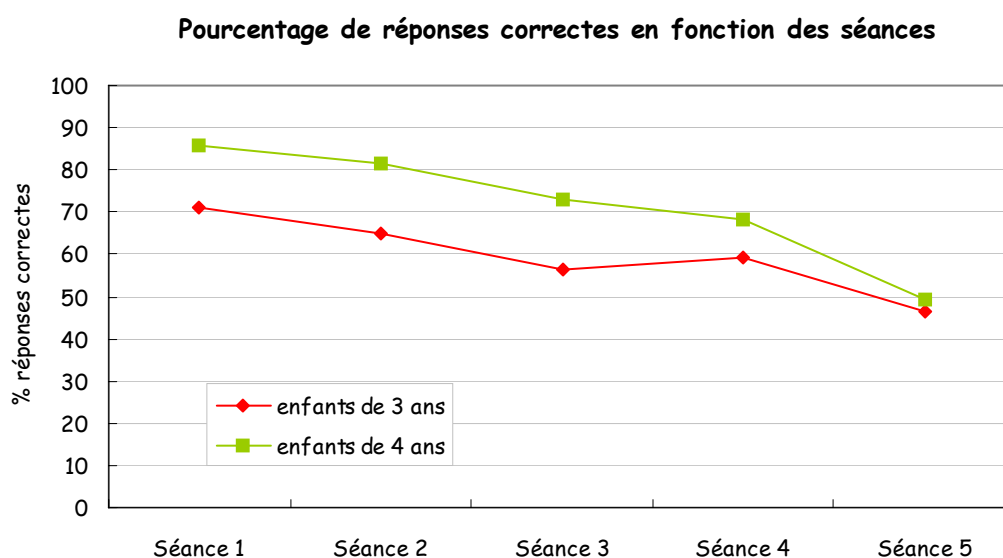


Figure 7 :
Pourcentage de réponses correctes en fonction des séances et de l'âge des enfants

Le second effet est lié aux séances ($F(4,112)=25,52$; $p<.001$) : **le nombre de bonnes réponses diminuent significativement au fur et à mesure des séances**. Par contre, aucun effet, qu'il soit lié aux séries ou au sexe, n'a pu être mis en évidence. Il n'y a pas non plus d'interaction entre séries et séances. Ces informations permettent d'invalider un apprentissage ou l'apparition d'un ennui au cours des séances. En revanche, comme il existe une interaction entre âge et séances ($F(4,112)=3,28$; $p<.05$) : les écarts de performances entre les enfants de 4 ans et celles de 3 ans varient selon les séances.

1.2.3 Comparaison des performances entre les séances

Pour comparer l'évolution des performances au cours des séances, un test post-hoc de Tukey a été réalisé. Les résultats montrent tout d'abord que la dernière séance est bien différente des 4 premières (respectivement : $ps<.001$). Pour les autres séances, les différences de performances sont plus nuancées. La 1^{ère} séance ($\pm 50\%$) n'est pas significativement différente de la seconde ($\pm 20\%$), malgré un grand écart du niveau de discrimination ; elle l'est par contre des 3 dernières (respectivement $ps<.001$). La 2^{ème} séance est, elle aussi, différente des 3 dernières (respectivement : $p<.01$, $p<.05$, $p<.001$). Enfin, de la même façon que la 1^{ère} et la 2^{ème} séance sont statistiquement équivalentes, la 3^{ème} ($\pm 15\%$) et la 4^{ème} ($\pm 10\%$) séance sont elles aussi équivalentes. **Trois niveaux de difficulté de discrimination peuvent être faits** : niveau facile (séances 1 et 2), niveau difficile (séances 3 et 4) et niveau trop difficile (séance 5).

1.2.4 Comparaison des groupes d'âge

Un test post-hoc de Tukey a confirmé une différence entre les performances des enfants de 3 ans et ceux de 4 ans. Les performances de chacun de ces 2 groupes d'âge a été précisée en fonction des séances par une ANOVA.

Performances des enfants de 3 ans

Cette analyse n'a pas révélé d'effet principal autre que celui des séances ($F(4,52)=4,46$; $p<.005$). Aucune interaction entre les facteurs n'est mise en évidence.

Seules les 2 premières séances présentent des performances significativement supérieures à la dernière (test post-hoc de Tukey, respectivement : S1 vs. S5 $p<.005$ et S2 vs. S5 $p<.05$).

Performances des enfants de 4 ans

Les enfants plus âgés, quant à eux, ont des performances significativement différentes non seulement en fonction des séances ($F(4,60)=37,41$; $p<.0001$), mais aussi selon la séance en fonction du sexe ($F(4,60)=3,63$; $p<.01$) (Figure 8).

L'analyse de l'effet des séances à 4 ans (test post hoc de Tukey) permet de retrouver l'effet général des séances, à savoir que la séance 5 est très différente de toutes les autres ($ps<.0005$) et que les séances 1 et 2 sont comparables tout comme les séances 3 et 4.

Les seuils de significativité sont les suivants :

S1 vs. S3 à S4, $ps<.0005$;

S2 vs. S3, $p<.01$; S2 vs. S4, $p<.005$;

S3 vs. S4, $p<.0005$.

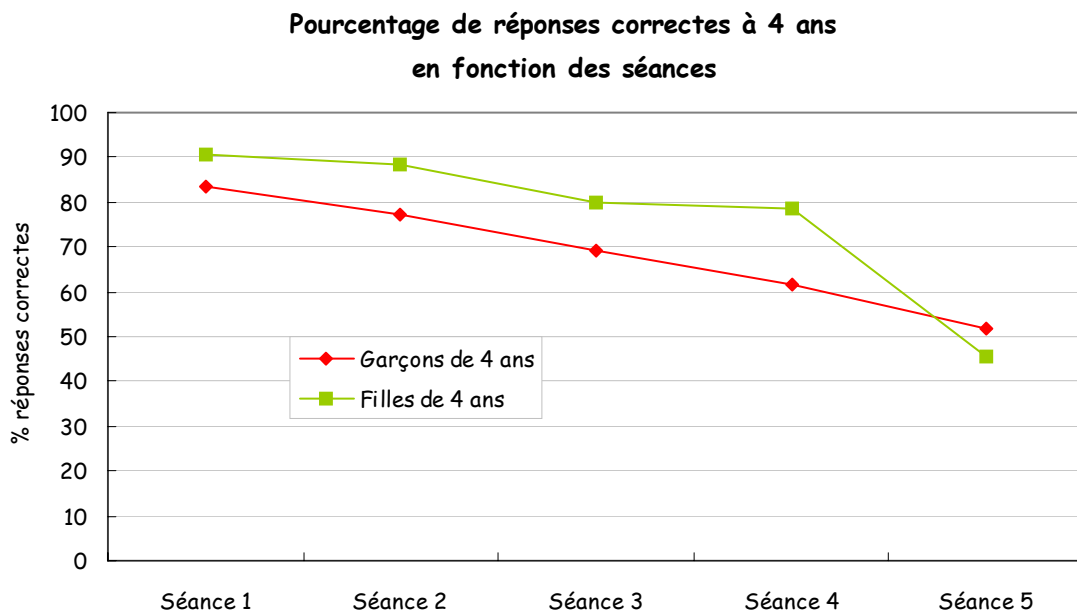


Figure 8 :
Pourcentage de réponses correctes des enfants de 4 ans en fonction des séances

L'effet principal du sexe a été analysé par un test post-hoc (Tukey) : **les filles de 4 ans réussissent mieux que les garçons du même âge seulement pour la 3^{ème} et la 4^{ème} séances** ($ps<.05$). Plus précisément, les filles réussissent, et ce de façon équivalente, aux 4 premières séances (seule la 5^{ème} séance est différente des 4 premières ; respectivement : $ps<.001$). Les garçons, eux, ont des performances similaires à celles observées globalement : les 2 premières séances sont équivalentes et leurs performances sont statistiquement différentes de celles des

3 dernières séances (pour la 1^{ère} séance : $p < .001$; pour la 2^{ème} respectivement : $p < .05$, $p < .01$, $p < .001$). Un résultat particulier pour ces garçons est que les 3 dernières séances ne sont pas différentes les unes des autres, même si d'une manière générale, les enfants ne répondent pas au hasard (pour les 4 premières séances).

1.2.5 Comparaison des performances de chaque groupe d'âge en fonction des séances

Les enfants les plus âgés réussissent mieux que les plus jeunes au cours des 3 premières séances (test post-hoc de Tukey, respectivement : $p < .001$, $p < .001$, $p < .05$). Les performances des 2 groupes d'âge ne sont par contre pas significativement différentes pour les 2 dernières séances.

1.3 Discussion

L'objectif de cette étude était de déterminer les performances de discrimination des jeunes enfants pour un tempo particulier et de situer le seuil de discrimination. Le tempo choisi est de 600 ms afin de permettre des comparaisons avec l'adulte et le bébé mais aussi en raison des ambiguïtés des résultats expérimentaux chez les jeunes enfants. Les 2 groupes d'âge étudiés (3 et 4 ans) ont ainsi eu à discriminer 2 tempi de plus en plus proches de 600 ms au cours de 5 séances et définis comme suit : 600 ms $\pm 50\%$, $\pm 20\%$, $\pm 15\%$, $\pm 10\%$ et $\pm 5\%$.

Les **principaux résultats** sont tout d'abord que les jeunes enfants sont capables de discriminer ces 2 tempi, relativement proches, à l'exception de ceux de la dernière séance (600 ms $\pm 5\%$). La qualité de la discrimination diminue à mesure que la différence entre les 2 tempi diminue et donc que la difficulté augmente. Une différence d'âge a pu être mise en évidence. Les enfants de 4 ans ont des performances de discrimination supérieures à celles des enfants de 3 ans au cours des 3 premières séances. Les enfants de 3 ans discriminent mieux les 2 tempi au cours des 2 premières séances qui sont aussi les plus faciles. Chez les enfants de 4 ans, les filles obtiennent de meilleurs résultats que les garçons au cours de la 3^{ème} et la 4^{ème} séances uniquement.

Informations concernant le protocole expérimental

Mais le premier résultat à mentionner concerne l'adéquation du protocole : **les enfants n'ont pas répondu au hasard, ils ont opéré un choix actif, adapté à ce qui leur était demandé.**

Il est à noter que cette **procédure** est **particulière** : afin de centrer les performances sur le tempo de 600 ms ; les tempi à comparer variaient symétriquement autour de cette valeur. Habituellement, les procédures de discrimination se réfèrent à un tempo standard et font varier le tempo à comparer. Nous avons donc utilisé une procédure où les 2 tempi à comparer étaient 600 ms $-X\%$ vs. 600 ms $+X\%$, alors que les résultats de la littérature font référence à des comparaisons du type 600 ms vs. 600- $X\%$ (ou $+X\%$). Les variations entre les tempi à discriminer ne sont donc pas équivalentes. Cependant, nos résultats peuvent être comparés aux autres résultats de la littérature dans la mesure où une variation de $\pm X\%$ utilisée dans notre procédure peut être approximée comme étant une variation de $2X\%$, dans une procédure plus classique.

Seuil de discrimination

Nous avons montré dans cette étude que les 2 groupes d'âge étaient capables de discriminer 2 tempi variant de $\pm 10\%$ autour de 600 ms (correspondant à une différence absolue de 120 ms) mais n'y parvenaient plus lorsque les tempi variaient de $\pm 5\%$ (60 ms). Ces informations permettent de situer **le seuil de discrimination à ces âges** entre $\pm 5\%$ et $\pm 10\%$, **pour un tempo de 600 ms, soit entre 10% et 20%**. Entre ces 2 âges (qui ne diffère que de quelques mois), il nous est impossible, avec la précision du protocole expérimentale, de vérifier si le seuil diminue sensiblement (conformément à l'une de nos hypothèses).

Ce résultat est cohérent avec les données de la littérature qui rapportent un seuil supérieur à 15% pour les enfants de 4 ans (Drake & Baruch, 1995) et une discrimination d'une différence de 15% chez les bébés (Baruch & Drake, 1997). En tenant compte de toutes ces données, il peut être prédit que le seuil de discrimination serait situé plus précisément entre 15% et 20%.

Il faut remarquer que ce seuil est très supérieur à celui de l'adulte, 3% à 600 ms, voire même 1,6% (Drake & Botte, 1993). Cette dernière valeur de seuil, particulièrement basse, a été obtenue dans des conditions particulières : seulement 4 adultes ont participé à l'expérimentation, comportant un grand nombre d'essais, et ces personnes étaient averties de l'objectif et familières de ce type d'expérience psychoacoustique. On peut donc penser que le seuil chez l'adulte soit plutôt de 3%.

Globalement, à partir des données actuelles, il semble que depuis le début de la vie jusqu'à l'enfance, le seuil de discrimination soit supérieur à 15%. Ceci n'est pas contradictoire avec le fait que les performances puissent s'améliorer avec l'âge. Les 3 protocoles mentionnés ici sont assez différents, en particulier celui utilisé chez le bébé (procédure d'habituation). Les

procédures, développées pour approcher au mieux le véritable seuil physiologique de discrimination, tendent à surestimer cette valeur. En particulier, les résultats de notre étude nous conduisent à faire l'hypothèse que le seuil soit inférieur. En effet, notre procédure s'échelonnait sur 5 séances afin de connaître à la fois les performances de discrimination et de situer le seuil. En conséquence, les enfants avaient à faire à un jeu plutôt long et monotone pour leur âge : à la 5^{ème} séance, les enfants avaient déjà joué 4 fois à un jeu qui ne présentait plus de surprise. Ce manque d'intérêt est reflété par la diminution du nombre de participants au fur et à mesure des séances. Ne faire que 3 séances aurait sans doute donné l'occasion de conserver un plus grand nombre de sujets. Par contre, un si faible nombre de séance n'aurait permis de situer le seuil que très grossièrement car le nombre de seuils testés aurait été réduit d'autant.

Performances de discrimination

Comme nous l'attendions, **les performances ont diminué avec la difficulté**, allant de 79% de réussite pour la 1^{ère} séance à 64% pour la 4^{ème}. Les performances sont équivalentes pour des différences allant de $\pm 50\%$ à $\pm 20\%$ (soit en valeur absolue de 240 ms à 600 ms) et pour celles allant de $\pm 15\%$ à $\pm 10\%$ (120 ms à 180 ms). Ces résultats suggèrent l'**existence de 3 niveaux de difficulté pour la discrimination de tempo** autour de 600 ms. Globalement, pour des enfants entre 3 et 4 ans, ces niveaux seraient les suivants : facile pour des différences supérieures à $\pm 20\%$, difficile entre $\pm 10\%$ et $\pm 20\%$, et trop difficile pour des différences inférieures à $\pm 10\%$.

Les résultats de la littérature concernant les performances de discrimination se limitant à des différences de 15%, l'ensemble de nos résultats ne peuvent pas être comparés à d'autres données, à l'exception de ceux de la 4^{ème} séance ($\pm 10\%$). Le niveau de discrimination de cette séance est en effet assez proche de celui de Drake et Baruch (1995), i.e. 15%. Dans cette expérience, les enfants de 4 ans ne parviennent pas à discriminer significativement un tempo de 600 ms d'un tempo 15% plus rapide (600 ms vs. 510 ms). Dans notre étude, les enfants, âgés de moins de 4 ans, parviennent à discriminer 2 tempo variant de $\pm 10\%$ autour de 600 ms (540 ms vs. 660 ms). Il est peu probable que cette différence de performance soit imputable uniquement à la différence absolue entre les 2 paires de tempo à discriminer (90 ms vs. 120 ms). **Une explication possible est que notre protocole a permis d'obtenir des performances plus proches des capacités réelles de l'enfant.** Cette explication est d'autant plus plausible si l'on considère le tempo de référence. Entre 3 et 4 ans, il est situé autour de 430 ms (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Les capacités temporelles étant meilleures pour des

tempi proches de cette valeur selon le modèle développemental, les enfants de 4 ans devraient être capables de discriminer un tempo de 510 ms d'un de 600 ms. Notre paire de tempi devrait donc être plus difficile à discriminer puisqu'elle est plus éloignée du tempo de référence. Mais **cette explication doit être vérifiée expérimentalement**. Ainsi, si cette expérience a permis de préciser les performances de discrimination des enfants entre 3 et 4 ans, cette expérience devrait être reconduite pour d'autres tempi et en particulier pour un tempo proche du tempo de référence. Les résultats comparés permettront de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse que les capacités de traitement temporel sont meilleures aux environs de cette période. D'autre part, il est aussi nécessaire de pouvoir établir les capacités de traitement d'enfants plus jeunes, c'est-à-dire avant 3 ans, afin de suivre l'évolution de ces performances au cours du développement. Ces données permettront de préciser les hypothèses de la mise en place des mécanismes de traitement temporel des durées courtes. Il doit être mentionné ici que **cette même expérience a été réalisée chez des sujets plus jeunes**, recrutés en crèche (19 sujets de 2,5 ans d'âge moyen et 8 sujets de 1,5 ans d'âge moyen). Les paramètres ont été adaptés pour rendre la tâche plus facilement réalisable par ces enfants plus jeunes. Le recueil des résultats s'est avéré fastidieux pour les enfants et la tâche inadaptée à leur développement psychomoteur. L'analyse sur les quelques données obtenues a confirmé cette conclusion.

Influence de l'âge

Un autre résultat de cette expérience est l'existence d'une différence liée à l'âge dans les capacités de discrimination. Si tous les enfants réussissent aux 4 premières séances, les plus âgés sont meilleurs que les plus jeunes au cours des 3 premières séances, c'est-à-dire jusqu'au niveau de discrimination difficile défini précédemment (il est donc possible que le seuil de discrimination s'améliore avec l'âge). Or, il est à noter que **la différence d'âge n'est que de 7 mois entre ces 2 groupes**. Ce résultat met en évidence que le développement des compétences de traitement temporel avec l'âge est particulièrement rapide. Ce progrès en l'espace de quelques mois est probablement corrélé au développement des structures cérébrales impliquées dans cette fonction, en particulier le cervelet mais aussi les noyaux gris centraux. Le cervelet est une structure connue pour se développer sur une longue période au cours de l'enfance (Diamond, 2000), ce qui pourrait expliquer l'évolution des performances tout au long de l'enfance. Cependant, une autre possibilité ne peut être exclue : il est possible que le niveau général d'attention dédiée à la tâche par l'enfant soit supérieur chez les enfants plus âgés. Cette éventualité est pourtant peu probable dans la mesure où les variations au sein de chaque groupe d'âge sont très faibles : les variations interindividuelles sont ainsi

contrebalancées. Par ailleurs, tous les enfants sont issus de la même section d'une même école, en 2^{ème} partie d'année scolaire. Il peut donc être supposé qu'en partageant les mêmes activités, leur capacité d'attention soit stimulée de façon équivalente d'un individu à l'autre et limitant par là même les différences inter-individuelles (et ce d'autant plus que leur participation intervenait toujours dans des plages horaires dédiées à des activités encadrées).

Différence de performance liée au sexe

Uniquement à 4 ans, il apparaît que les filles sont plus performantes que les garçons de façon significative mais, encore une fois, uniquement pour le niveau difficile de discrimination (3^{ème} et 4^{ème} séances). Des différences dans les capacités de traitement temporel liées au sexe des sujets ont été mises en évidence dans des tâches de production. Généralement, ce sont les garçons qui sont meilleurs et moins variables que les filles, y compris chez l'adulte (Provasi & Bobin-Bègue, 2003 ; Vanneste et al., 2001 ; Goldstone & Goldfarb, 1966). Nos résultats sont donc contraires à ceux obtenus précédemment avec des tâches de production. La question est donc de savoir si les filles sont meilleures que les garçons dans les tâches de perception uniquement. Des études ont montré qu'il existe des différences liées au sexe dans l'attention dédiée à une tâche : pour chaque sexe, elle diffère selon le type de tâche (Dittmar, Warm, Dember & Ricks, 1993). Mais cette supposition ne peut pas être validée complètement ici étant donnée que le nombre de filles du groupe de 4 ans est 2 fois plus faible que celui des garçons du même âge.



En résumé, cette expérience a permis de déterminer les capacités de discrimination entre 2 tempi pour des enfants entre 3 et 4 ans. Les résultats fixent le seuil de discrimination à 600 ms à moins de 20% de différences entre les ISI des 2 tempi. Ils permettent aussi de délimiter des niveaux de difficulté pour la discrimination. Cette capacité évolue rapidement avec l'âge, les plus grands (et particulièrement les filles) devenant meilleurs pour les niveaux difficiles. Nos résultats rejoignent ceux trouvés dans la littérature à partir de 4 ans.

Ces résultats ne suffisent néanmoins pas à dresser un bilan général de l'évolution des capacités de traitement des durées courtes. En effet, cette étude est centrée sur un tempo très bien traité à tous les âges et pour confirmer que le traitement temporel est optimal pour des durées proches de la période de référence, d'autres tempi doivent être testés (notamment en se

référant à la période de référence). Chez le jeune enfant, c'est la comparaison des performances de discrimination à différents tempi qui permettra de valider cette hypothèse. Ces performances évoluent très rapidement avec l'âge et il convient donc de mener ces études depuis la naissance jusqu'à la fin de la petite enfance. L'évolution des performances pourra être corrélée au développement des structures cérébrales impliquées et ainsi de mieux comprendre le mécanisme du traitement temporel. D'autres études doivent confirmer les différences des performances de traitement perceptif liées au sexe des sujets.

2 Développement des capacités de production d'intervalles rapides entre 1 et 4 ans : Influence de stimulations rapides

Cette étude vise à explorer les capacités de traitement temporel des jeunes enfants (entre 1 et 4 ans), mais ici par le biais de tâche de production.

Le premier objectif de cette étude est de **déterminer** et de compléter les données de **TMS avant 4 ans**. Cette valeur est en effet primordiale pour situer la période de référence chez l'enfant. Sans revenir sur la non-homogénéité des données (voir première partie), il apparaît nécessaire d'obtenir des données supplémentaires. Celles-ci permettront de préciser l'évolution de la période de référence au cours des premières années de développement et de la mettre en relation avec les capacités de traitement temporel. Ces données permettront donc de contribuer à la compréhension du fonctionnement de l'horloge.

Le second objectif est **d'évaluer les capacités de traitement de différentes durées courtes en production**. En perception, il existe un seuil en deçà duquel les durées ne sont plus traitées par le système d'horloge. Ce seuil est matérialisé en particulier par le seuil de discrimination. Or, le système d'horloge est commun au traitement des durées qu'elles soient perçues ou produites (voir partie 1). En conséquence, **ce seuil doit exister pour la production de durées**. Ce seuil est probablement **du même ordre que celui du seuil de discrimination**.

Cependant, il peut différer dans la mesure où en production s'ajoute des processus supplémentaires à ceux d'un traitement perceptif. En effet, produire une durée particulière nécessite d'utiliser une représentation mentale de cette durée, souvent issue d'un traitement perceptif préalablement à des processus en sortie du système de traitement. Ces derniers viennent donc s'ajouter à ceux du traitement perceptif, générant probablement des délais de traitement supplémentaires.

Ce seuil de sensibilité reflète la capacité de l'horloge à traiter comme distinctes des durées suffisamment différentes (le seuil étant matérialisé par la valeur de la limite entre la capacité à traiter comme différentes 2 durées). En dessous de cette limite, les durées sont traitées de façon identique : le mode de fonctionnement de l'horloge ne permet pas de dépasser ce seuil de sensibilité. En production, ce seuil de sensibilité a déjà été évoqué (chez l'adulte) au travers de la notion d'« oscillator signature » (Collyer & al., 1992, 1994) : l'horloge est incapable de produire des valeurs d'intervalles d'une manière continue, elle ne peut générer que des valeurs discrètes. Chez l'enfant, il a été aussi matérialisé expérimentalement : la tâche

consistait à ce que les enfants, âgés de 2,5 ou 4 ans, se synchronisent avec une stimulation auditive externe. Selon la séance, le tempo de cette stimulation était 400, 600 ou 800 ms (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Les résultats ont montré que les enfants ne parvenaient pas à modifier leur rythme de frappe lorsque la stimulation était à 400 ms. Ils y parvenaient pour les 2 autres tempi.

Or, chez l'enfant de cet âge, un tempo de 400 ms est une valeur proche du TMS et donc de la période de référence. Ce résultat suggère que l'horloge ne peut générer des intervalles trop proches de la valeur de la période de référence. Par contre, quand l'écart devient suffisant par rapport à cette période (par exemple lorsque celle-ci correspond à une différence d'environ 50% par rapport à la période de référence, soit un tempo de 600 ms), l'horloge parvient à traiter ces durées d'intervalle.

Ce résultat semble donc en désaccord avec l'hypothèse selon laquelle le traitement temporel est optimal à proximité de la période de référence. Ce résultat n'est pas assez informatif pour pouvoir trancher entre plusieurs hypothèses. Il est ainsi envisageable que le seuil soit inférieur aux différences testées dans cette expérience. Une autre explication est que cette hypothèse ne soit pas valable, tout au moins sous cette forme, pour la production de durées. Enfin, il est possible que la période de référence soit un paramètre trop robuste (qui génère une forte inertie dans le fonctionnement du système), tout au moins chez l'enfant, pour permettre à un processus de générer des frappes trop peu différentes (processus trop coûteux).

Nous avons donc souhaité déterminer la valeur de ce seuil en production chez le jeune enfant pour répondre à cette interrogation sur le fonctionnement fondamental du traitement des durées chez l'enfant. Dans un contexte d'exploration de la valeur de ce seuil, nous avons choisi de baser cette étude sur la valeur du TMS, pour tester l'hypothèse du modèle développemental (suggérant que le traitement est plus performant pour des tempi proches de la période de référence). Ce choix présente en outre l'avantage de cibler les analyses par rapport à un facteur commun, propre à l'individu et qui est encore mal connu à cet âge. Cette précaution est d'autant plus valable que chez les jeunes enfants, l'étendue des compétences de traitement temporel concerne une gamme de tempi plus restreinte que chez l'adulte (Drake & al., 2000).

Dans cette étude expérimentale, le TMS des enfants a donc été utilisé comme tempo de référence. Au moyen d'un paradigme de synchronisation, les enfants ont interagit avec une stimulation auditive extérieure. Pour cerner la valeur du seuil de sensibilité, le tempo de cette stimulation se décalait progressivement au fur et à mesure des essais et devenait de plus en

plus différent du TMS. Les variations étaient très progressives, car l'objectif de cette étude n'était pas de déterminer les capacités de synchronisation (auquel cas le nombre de mesures par variation aurait été augmenté au détriment du nombre de variations testées) mais bien de déterminer à partir de quelle variation (seuil) les enfants étaient capables de modifier leur propre rythme de frappe pour en produire un autre différent. Le protocole devait donc avant tout être conçu pour tester différentes variations.

La question qui est alors soulevée par cette étude concerne **l'impact de la stimulation externe sur le système d'horloge**. A partir du moment où le seuil est dépassé et que l'enfant est capable de produire une durée d'intervalle différente de son rythme spontané, c'est que l'horloge, en amont a généré cette durée (après l'avoir intégrée).

Selon le modèle développemental, le fonctionnement de l'horloge repose sur la période d'un oscillateur principal (de référence) et au cours du développement, d'autres oscillateurs se mettent en place expliquant les performances plus larges de traitement chez l'adulte que chez l'enfant. D'autre part, chaque oscillateur ne peut faire varier sa période que dans une faible proportion. Dès lors, puisque l'horloge d'un enfant ne repose que sur 1 oscillateur de référence et que la période de celui-ci est peu adaptable, comment l'horloge peut-elle générer des intervalles très différents de la période de référence.

Dans l'expérience mentionnée plus haut (Provasi & Bobin-Bègue, 2003), les enfants de 4 ans, après la tâche de synchronisation avec un tempo de 800 ms avaient un TMS après cette phase significativement plus lent que leur TMS initial. Ces résultats suggèrent donc que l'oscillateur de référence peut modifier sensiblement sa période, au-delà d'un seuil tout au moins.

Pour évaluer l'impact de ces stimulations sur la période de référence, nous avons donc voulu ajouter une 3^{ème} phase expérimentale, consistant à reprendre la valeur du TMS juste après la phase de synchronisation. Si le TMS initial et le TMS final s'avèrent différents, alors l'horloge interne et son oscillateur de référence devait avoir modifié sa période et ce avec suffisamment d'inertie pour être observable en l'absence de stimulations externes.

Le dernier point à mentionner ici concerne **le sens de variation** à appliquer aux stimulations. En effet, 2 possibilités peuvent être envisagées : soit faire varier les stimulations dans le sens d'une accélération, soit dans le sens d'un ralentissement. Les données de la littérature utilisent dans une large proportion des stimuli plus rapides que la référence et ce que ce soit pour des tâches de discrimination ou de synchronisation. **L'accélération semble plus facilement traitée en particulier chez le jeune enfant**. Ainsi, par exemple, les bébés de 2 et 4 mois discriminent 2 tempi si le tempo variable est plus rapide que le tempo de référence

(Baruch & Drake, 1997). Les nourrissons aussi accélèrent plus facilement leur rythme de succion (Provasi, 1988 ; Provasi & Marks, 1994). Cette caractéristique se retrouve aussi dans le contexte des interactions sociales : les jeunes enfants sont capables d'interagir plus rapidement avec leurs parents (Condon & Sanders, 1974). Ces résultats ont suggéré que le sens de l'accélération des stimulations devait être testé prioritairement. Une limite cependant : une accélération nécessite que l'enfant soit capable de produire un mouvement plus rapide que son TMS. Or, il existe des contraintes biomécaniques à la vitesse du mouvement qui peuvent être responsable d'une absence de résultat. En particulier, il apparaît que plus l'enfant est jeune, plus sa vitesse de frappe maximale est proche de celle de son TMS (Drake & al., 2000).

Cette étude concerne 3 groupes d'âge et comporte **3 phases expérimentales**. La première consiste à enregistrer le TMS de l'enfant. La deuxième vise à déterminer le seuil de variation à partir duquel l'enfant est capable de modifier son rythme de frappe spontané. Enfin, la dernière phase évalue l'impact de stimulations rapides sur ce rythme de frappe spontanée.

Cette étude nous permettra en premier lieu de déterminer la valeur du TMS à ces âges et en particulier avant 2,5 ans, âge où aucune donnée n'est disponible. Nous nous attendons à ce qu'il soit de l'ordre de 430 ms, en se référant aux données de la littérature. Compte-tenu des données mentionnées ci-dessus, nous nous attendons à déterminer un seuil à partir duquel les enfants, et tout au moins les plus âgés, sont capables d'accélérer leurs frappes. Ce seuil, postulé comme étant commun aux tâches de perception et de production, se situe probablement aux alentours de 15% entre 3 et 4 ans. Enfin, nous faisons l'hypothèse que si les enfants accélèrent significativement leurs frappes, alors leur TMS après cette tâche s'en trouvera aussi accélérer. Les hypothèses de travail peuvent donc être synthétisées comme suit :

1. Le TMS peut être déterminé chez les enfants de 1 à 4 ans et il se situe autour de 430 ms.
2. Les enfants sont capables d'interagir avec une stimulation extérieure plus rapide que leur TMS.
3. Il existe un seuil à partir duquel les enfants sont capables d'accélérer leur rythme de frappes spontané. Ce seuil doit se situer autour de 15%.
4. Le traitement et en particulier la production temporelle de séquences plus rapides induit une accélération du TMS de l'enfant.

5. Il existe une mise en place progressive entre ces âges des processus nécessaires à la réalisation de ces tâches.

2.1 Méthode

Sujets

85 enfants ont participé à cette étude, répartis en 3 groupes d'âge : un groupe de 23 enfants âgés de 1 an (14 filles et 9 garçons ; âge moyen = 1,57 ans, SD = 0.11, écart : 1,39-1,75), un groupe de 26 enfants âgés de 2 ans (11 filles et 15 garçons ; âge moyen = 2,36, SD = 0.17, écart : 2,01-2,61) et un groupe de 36 enfants âgés de 3 ans (15 filles et 21 garçons ; âge moyen = 3,52, SD = 0.21, écart : 2,91-3,89).

Vingt autres enfants ont été recrutés, mais leur absence de participation active n'a pas permis d'obtenir des résultats exploitables.

Les enfants de 1 an et 2 ans ont été recrutés dans 3 sections différentes de crèche (crèche municipale de Marly le Roi, 78). Les enfants de 3 ans ont été recrutés eux dans 3 classes de petite section d'une école maternelle (Paris, 5^{ème}).

Les parents de chaque enfant ont fourni leur autorisation (après avoir été informé) par écrit.

Matériel

Le lieu pour le déroulement de l'expérience était toujours choisi de manière à être isolé des autres enfants et de l'activité du groupe, tout en étant proche et familier. L'enfant, seul avec l'expérimentateur, était placé devant un écran d'ordinateur 14 pouces (relié à son unité centrale).

Cet écran, situé dans un dispositif de soutien en bois, était incliné en arrière de façon stable (30° par rapport à sa position normale verticale). Une plaque transparente de plexiglas de taille correspondante à l'écran était calée par dessus et reposait sur des morceaux de caoutchouc. Sous cette plaque, fixé en bas de l'écran, un capteur de pression détectait les frappes sur la plaque de plexiglas (les morceaux de caoutchouc évitant les rebonds). Cet ensemble se comportait donc comme un **écran tactile**.

L'information de pression recueillie par le capteur était transmise à l'ordinateur, par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition. **La date de chaque frappe** se produisant sur l'écran **était** ainsi **enregistrée** avec une précision de l'ordre de la milliseconde. Pour la détection de

la frappe, l'enfant pouvait aussi bien juste toucher le plexiglas que frapper fort. Par contre, il devait se servir que d'une main, du côté de son choix et de la façon qu'il souhaitait (main à plat, bout des doigts ou poing fermé).

La date de la frappe, et par conséquent les IRI, était traitée par un programme développé par nos soins, spécifiquement pour cette expérience. Celui-ci était destiné à délivrer des stimulus auditifs et visuels selon les conditions et en fonction des frappes. Les **stimulus auditifs** étaient des sons de 100 ms, représentatifs du cri d'un animal. Les **stimulus visuels**, utilisés comme renforcement, étaient des images (de 15 x 15 cm) de l'animal correspondant au stimulus auditif. Neuf animaux différents ont été utilisés (chiot, canard, grenouille, oisillons, tourterelle, singe, phoque, poule, abeille). La représentation du même animal (son et image) était utilisée pour un même essai, soit 30 stimulations successives.

Procédure

La séance était divisée en **3 phases**, nommées **TMS1, Synchronisation et TMS2**. Chaque phase comportait un certain nombre d'essais, un essai correspondant à l'enregistrement de la date de 30 frappes successives. Au cours d'un même essai, la représentation d'un seul animal (son et image) était utilisée. L'animal utilisé variait d'un essai à l'autre. Pendant les **phases de TMS** (1 et 2), le son et l'image d'un animal étaient diffusés pour chaque frappe enregistrée par le programme. Pendant la **phase de synchronisation**, pour chaque essai, 30 sons étaient diffusés à un ISI fixé en fonction de l'essai. Si la frappe de l'enfant intervenait dans la fenêtre temporelle définie pour le renforcement, alors l'image s'affichait de façon synchronisée avec le son.

La **fenêtre temporelle** pour le renforcement était définie comme suit. Elle débutait avant le début du son, pendant un délai représentant 15% de l'ISI. La fenêtre temporelle s'achevait à la fin de la diffusion du son (Figure 9).

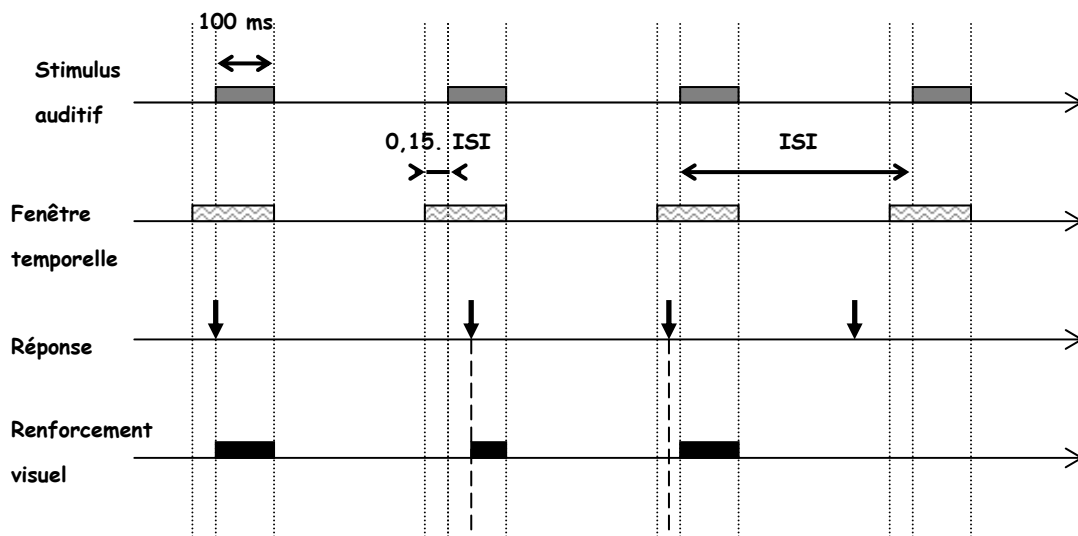


Figure 9 :
Relation temporelle entre le stimulus auditif diffusé, la définition de la fenêtre temporelle et la date de la frappe pour l'obtention d'un renforcement visuel

Cette fenêtre temporelle incluait donc les frappes anticipées, fréquentes lors d'une bonne synchronisation et les frappes synchronisées, arrivant pendant la diffusion du son. Si la frappe intervenait pendant la période d'anticipation, alors, l'image apparaissait de façon synchronisée au son (et donc tardivement par rapport à la date de la frappe) ; par contre, si la frappe se produisait pendant le son, l'image apparaissait immédiatement et disparaissait à la fin du son (elle apparaissait donc pour une durée inférieure ou égale à 100 ms). Toutes les frappes produites en dehors de cette fenêtre n'étaient pas renforcées.

Les **consignes verbales** étant comprises différemment à 1 et 3 ans, la procédure de renforcement temporel a été préférée car elle ne nécessite qu'un minimum d'instructions verbales. Dans une procédure de renforcement, l'enfant apprend l'action à reproduire en percevant l'effet que son comportement produit sur l'environnement (autrement dit le renforcement). Les images diffusées par le programme étaient donc pour l'enfant la seule information disponible pour moduler ses réponses (frappes). Cette information apparaît être suffisante dans la mesure où des enfants de 3 à 5 mois sont capables d'apprendre à espacer leurs réponses (frappes) d'une durée de 40 secondes grâce à une procédure de renforcement à intervalles fixes (le renforcement était dans ce cas une séquence de dessins animés)

(Darcheville, Rivière & Wearden, 1993). Pour limiter encore les instructions verbales, l'expérimentateur faisait une démonstration du jeu devant l'enfant. La démonstration est en effet plus informative que les instructions verbales chez l'enfant : il a été montré que l'enfant imitait la structure générale de l'action et non pas ses détails : les paramètres tels que l'amplitude du mouvement, la force, la vitesse et la position de la main sont propres à la personne qui effectue le geste et ne sont pas imités par l'enfant (Byrne & Russon, 1998). Les instructions ont donc été très succinctes. Au début de la séance, l'expérimentateur disait simplement : « regarde l'écran, je te vais te montrer comment on joue ». L'adulte effectuait alors, selon son propre rythme et le plus régulièrement possible un essai type TMS c'est-à-dire 20 frappes dont chacune faisait apparaître de façon synchrone l'image et le son d'un animal. A noter que seulement 20 frappes ont été requises pour l'essai de l'expérimentateur pour palier à l'impatience de l'enfant. Après avoir effectué la démonstration, l'adulte disait simplement : « maintenant, à toi de jouer ».

La 1^{ère} phase (TMS1) avait pour but de déterminer la valeur du TMS de l'enfant. Au moins 2 essais étaient requis. Chez les enfants de 1 an, plus de 2 essais étaient souvent nécessaires pour que l'enfant se familiarise avec le jeu et produise des frappes suffisamment enchaînées. Une fois la valeur du TMS déterminée (médiane des IRI du dernier essai de TMS1, calculée par l'ordinateur), la **phase de synchronisation** commençait. Cette phase était constituée de 11 essais successifs, au cours desquels la valeur des ISI était modifiée : la valeur du TMS servait de référence et les ISI des essais variaient selon un pourcentage déterminé par rapport à cette valeur du TMS. Ainsi, la valeur des ISI diminuait de 0 à 50% (par incrément de 5%) par rapport au TMS enregistré : l'enfant devait donc accélérer ses frappes au fur et à mesure des essais pour augmenter ses chances d'obtenir un renforcement. La **dernière phase** consistait à enregistrer de nouveau leur TMS (2 essais) dans l'objectif d'évaluer l'effet de la synchronisation (Tableau 3).

PHASE		CONDITIONS		
		Nombre de frappes enregistrées	Modalité du Renforcement : Frappes renforcées	Variations par rapport au TMS initial phase de synchronisation
Démonstration : TMS expérimentateur	Essai	20 frappes	Toutes	
TMS1	Essai 1	30 frappes	Toutes	
	Essai 2	30 frappes	Toutes	
Calcul du TMS de l'enfant en fonction de l'essai 2				
Synchronisation	Essai 1	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS - 0%
	Essai 2	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS - 5%
	Essai 3	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS - 10%
	Essai 4	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS - 15%
	Essai 5	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS - 20%
	Essai 6	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS - 25%
	Essai 7	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS - 30%
	Essai 8	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS - 35%
	Essai 9	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS - 40%
	Essai 10	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS - 45%
	Essai 11	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS - 50%
TMS2	Essai 1	30 frappes	Toutes	
	Essai 2	30 frappes	Toutes	

**Tableau 3 :
Synthèse des caractéristiques de chacune des 3 phases du protocole expérimental**

L'enchaînement des phases et des essais était opéré par l'expérimentateur, à la convenance de l'enfant, assurant ainsi un niveau d'attention équivalent ou tout au moins suffisant. La séance durait ainsi moins de 15 minutes.

2.2 Résultats

2.2.1 Analyses statistiques

Pour chaque essai de chaque individu, **la mesure utilisée pour les analyses est la médiane des IRI**, car elle ne tient pas compte des valeurs isolées (ex. frappe tardive en raison d'un événement perturbateur). Il faut préciser que les IRI supérieurs à 1,5 secondes ont été supprimés du calcul de la médiane. Les enfants sont plus facilement distraits que les adultes : ils pouvaient s'arrêter spontanément puis reprendre le jeu. Au-delà de ce délai (limite supérieure de la fenêtre temporelle), les éléments de la séquence étaient traités comme isolés, ce qui ne correspondait pas à l'objectif de l'expérience. A l'opposé, les IRI inférieurs à 150 ms ont aussi été supprimés car ils n'ont aucune réalité physiologique. Ces IRI se produisaient dans les situations où l'enfant appuyait avec ses 2 mains par exemple ou toutes autres situations du même type faussant la valeur de l'IRI.

Par ailleurs, comme la tâche de synchronisation est relative au TMS1, et qu'il existe une variabilité inter-individuelle de cette valeur, un autre indice a été calculé pour les analyses : le rapport de la médiane d'un essai et du TMS1 servant de référence (**indice appelé médiane réduite des IRI**). Ainsi, si tous les enfants ont une valeur de TMS1 égale à 1, pour tous les autres essais, les différences ne sont pas nivelées par la variabilité inter-individuelle. Cette valeur a servi pour toutes les analyses du rythme de frappe, à l'exception évidemment de celles relatives au TMS1.

Enfin, un **coefficient de variabilité** a été calculé pour rendre compte de la variabilité **intra-individuelle** des IRI. Le calcul est fait à partir de la valeur du 1^{er} et du 3^{ème} quartile (noté respectivement Q1 et Q3) selon la formule :

$$\frac{(Q3-Q1) \times 100}{\text{médiane}}$$

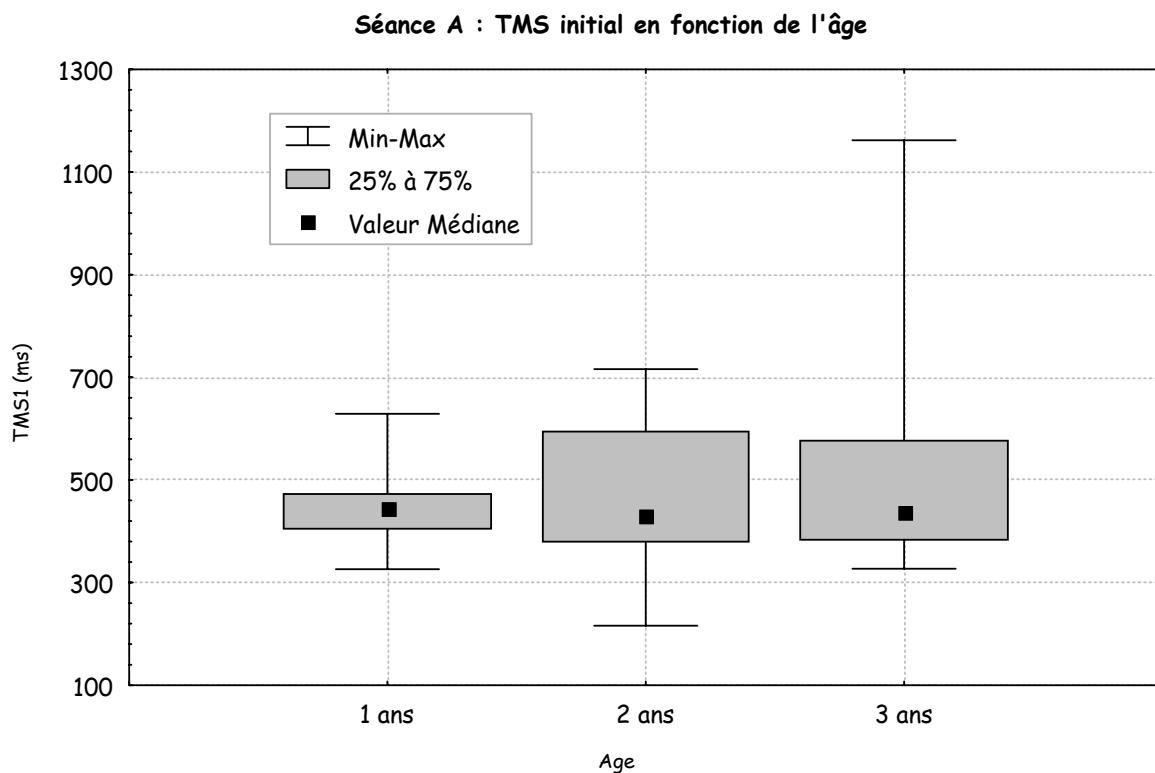
2.2.2 Absence d'influence de la démonstration par l'expérimentateur

Cette première analyse est indispensable pour prouver que le TMS initial des enfants n'a pas été influencé par le TMS de l'expérimentateur lors de la démonstration. La comparaison entre le TMS de l'expérimentateur (moyenne = 728 ms, SD = 117), entendu et observé par l'enfant pendant la démonstration, et celui produit ensuite par l'enfant (moyenne = 479 ms, SD = 149)

par un test T de Student (pour des échantillons appariés) démontre que le TMS produit par l'enfant est significativement plus rapide que celui produit par l'expérimentateur [$t = 13,73$, $dl = 78$, $p < .0001$]. De la même manière, la variabilité de l'expérimentateur (moyenne = 15,38, $SD = 16.81$) est significativement inférieure à celle de l'enfant (moyenne = 28,48, $SD = 28.05$) [$t = -3,76$, $dl = 78$, $p < .0005$]. Les réponses produites par chaque enfant sont donc le résultat de son propre comportement et donc **le rythme de frappe de l'enfant n'est pas influencé par celui de l'expérimentateur.**

2.2.3 Analyse du TMS et de sa variabilité

Une ANOVA portant sur la médiane des IRI ($S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{TMS}_1$) ne révèle aucun effet de l'âge et du sexe ni aucune interaction entre ces facteurs. Le TMS ne varie pas significativement d'un âge à l'autre (Tableau 4).



	Nombre d'IRI		Médiane	Variabilité
1 an	539	Moyenne	442,33	33,62
		SD	68,84	33,96
2 ans	713	Moyenne	475,64	37,32
		SD	147,17	31,76
3 ans	973	Moyenne	504,15	18,81
		SD	181,58	16,69

Tableau 4 :
Caractéristiques du TMS en fonction de l'âge des enfants

La même analyse conduite sur les données de variabilité intra-individuelle du TMS1 (ANOVA : $S<Age_3 \times Sexe_2> \times TMS_1$) révèle un effet principal de l'âge [$F(2,74) = 4,54$, $p<.05$] : **la variabilité intra-individuelle décroît avec l'âge**. Statistiquement, les enfants de 3 ans sont significativement moins variables que les enfants de 2 ans (test post-hoc de Tukey, $p<.05$).

L'étude de **la variabilité inter-individuelle** (comparaison de la variance, table de Snédécour) montre qu'elle **augmente avec l'âge**, et de façon significative entre 1 an et 2 ans ($F_{25,22}=4,57$; $p<.01$) ; la différence est aussi significative entre 1 et 3 ans ($F_{35,22}=6,96$; $p<.01$).

2.2.4 Etude de la médiane réduite des IRI

Comparaison des 3 phases

Pour vérifier s'il existe une influence de la phase (TMS ou synchronisation) sur le rythme de frappe des enfants, une ANOVA a été conduite selon 2 variables indépendantes (âge et sexe) et 1 variable dépendante, la phase (ANOVA $S<Age_3 \times Sexe_2> \times Phase_3$). La valeur comparée est la médiane réduite des IRI de chaque individu. Pour la phase de TMS1, la valeur utilisée pour l'analyse est celle du dernier essai. Etant donné que la phase de synchronisation regroupe 11 essais, l'analyse a été conduite successivement pour chacun d'eux. Pour la phase de TMS2, c'est la valeur du premier essai après la phase de synchronisation qui a été utilisée. Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant (Tableau 5).

Effets et Interaction	Age	Phase	Age / Phase
TMS1 / AS0 / TMS2		F (2,132) = 15,65 p<.0001	F (4,132) = 2,87 p<.05
TMS1 / AS5 / TMS2	F (2,65) = 3,39 p<.05	F (2,130) = 7,29 p<.001	
TMS1 / AS10 / TMS2	F (2,66) = 3,92 p<.05	F (2,132) = 17,59 p<.0001	F (4,132) = 2,60 p<.05
TMS1 / AS15 / TMS2		F (2,128) = 8,91 p<.0005	
TMS1 / AS20 / TMS2	F (2,66) = 4,45 p<.05	F (2,132) = 14,04 p<.0001	
TMS1 / AS25 / TMS2	F (2,63) = 5,36 p<.01	F (2,126) = 8,03 p<.001	F (4,126) = 2,84 p<.05
TMS1 / AS30 / TMS2	F (2,66) = 5,28 p<.01	F (2,132) = 17,91 p<.0001	F (4,132) = 3,20 p<.05
TMS1 / AS35 / TMS2	F (2,64) = 6,09 p<.005	F (2,128) = 2,69 p<.0001	F (4,128) = 4,18 p<.005
TMS1 / AS40 / TMS2	F (2,66) = 4,76 p<.05	F (2,132) = 40,55 p<.0001	F (4,132) = 3,40 p<.05
TMS1 / AS45 / TMS2	F (2,62) = 4,27 p<.05	F (2,124) = 31,15 p<.0001	F (4,124) = 2,84 p<.05
TMS1 / AS50 / TMS2	F (2,49) = 7,56 p<.005	F (2,98) = 6,08 p<.005	F (4,98) = 5,84 p<.0005

Tableau 5 :
Effets significatifs révélés par la comparaison de la médiane des IRI des 3 phases expérimentales (ANOVA)

Les IRI sont donc toujours modifiés par la phase expérimentale et différemment globalement en fonction de l'âge. La distribution des IRI (tous les IRI de tous les enfants par groupe d'âge ayant été réunis) en fonction des essais de chacune des 3 phases illustre l'évolution différentielle de ces modifications (Figure 10). A noter que ces valeurs d'IRI sont les valeurs relevées ; elles n'ont pas été rapportées à leur valeur respective du TMS initial.

Figure 10 :
Représentation de la répartition des IRI
en fonction de l'âge des enfants et en fonction des essais

Afin de réaliser une analyse plus simple, nous avons choisi de refaire une ANOVA avec pour la phase de synchronisation, la moyenne de toutes les médianes des essais. Cette valeur moyenne a servi au calcul de la médiane réduite pour la phase de synchronisation.

Cette nouvelle ANOVA ($S\langle \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 \rangle \times \text{Phase}_3$) montre qu'il existe un effet principal lié à l'âge [$F(2,66) = 5,15, p<.01$] et lié à la phase [$F(2,132) = 20,27, p<.0001$]. De plus, il existe

une interaction entre l'âge et la phase [$F(4,132) = 3,33, p < .05$]. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés pour chaque essai de la phase de synchronisation (Figure 11).

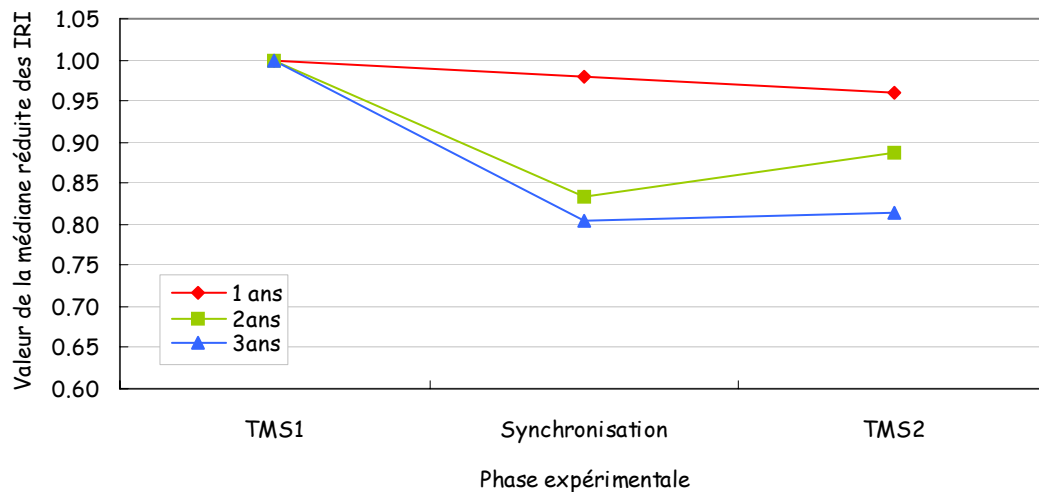


Figure 11 :
Valeur de la médiane réduite des IRI en fonction de la phase expérimentale

Une analyse post-hoc de Tukey montre que les enfants de 2 et 3 ans accélèrent leurs frappes significativement plus que ceux de 1 an (respectivement : $p < .01$ et $p < .0005$). Les enfants de 2 et 3 ans accélèrent leurs frappes de la même façon. Au cours de la phase de TMS2, la médiane réduite des IRI à 2 ans est intermédiaire mais cependant équivalente à celle des enfants de 1 an et à celle des enfants de 3 ans. Ces derniers ont un TMS après la phase de synchronisation (TMS2) qui reste plus rapide significativement de celui à 1 an ($p < .005$).

Une analyse âge par âge précise ces derniers résultats (ANOVA $S < \text{Sexe}_2 > \times \text{Phase}_3$ pour chaque âge). **A 1 an**, il n'existe aucun effet particulier : quelle que soit la phase, les enfants frappent au même rythme. **A 2 ans** par contre, il existe un effet de la phase [$F(2,42) = 10,41, p < .0005$] : par rapport à la phase de TMS1, ils accélèrent significativement leurs frappes aussi bien en phase de synchronisation qu'en phase de TMS2 (test post-hoc de Tukey, respectivement : $p < .0005$ et $p < .01$) ; cependant, ils frappent de façon équivalente entre la phase de synchronisation et la phase de TMS2. **A 3 ans** aussi, une ANOVA confirme l'effet de la phase [$F(2,64) = 37,87, p < .0001$] : eux aussi ont des médianes au cours de la phase de synchronisation et de TMS2 significativement plus faibles que celle en TMS1 (test post-hoc de Tukey $p < .0005$) ; tout comme les enfants de 2 ans, la phase de synchronisation et de TMS2 ne peuvent être distinguées significativement.

Ces résultats montrent que la phase de synchronisation dans son ensemble modifie le rythme de frappe des enfants de 2 et 3 ans par rapport au TMS initial. Cette modification est durable puisque le TMS2 est plus rapide que le TMS initial.

Cependant, cette analyse globale ne permet pas de comparer l'influence d'une stimulation auditive équivalente au TMS (AS0) par rapport au rythme de frappe de l'enfant (TMS1), ni celle d'une stimulation auditive 2 fois plus rapide que le TMS (AS50) sur le rythme de frappe spontané (TMS2) de l'enfant. Ainsi, ces 2 analyses complémentaires méritent d'être réalisées.

Concernant **l'essai de synchronisation à 0% de variation**, l'ANOVA a révélé un effet de la phase et une interaction de l'âge et de la phase (Tableau 5).

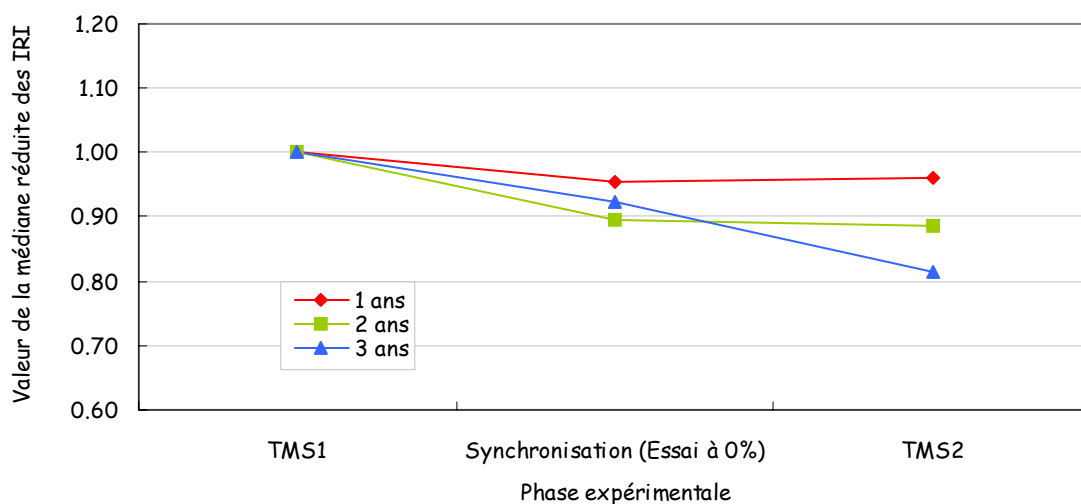


Figure 12 :
Comparaison des médianes réduites des IRI en fonction de la phase expérimentale

Une analyse post-hoc de Tukey confirme l'interaction entre l'âge et la phase (Figure 12)⁹. Cependant, pour ce qui nous intéresse dans cette analyse, les enfants conservent leur rythme de frappe pendant l'essai de synchronisation AS0 : la stimulation auditive calée sur le propre TMS de l'enfant ne modifie pas son rythme de frappes.

Concernant l'analyse de l'impact des phases avec **l'essai à 50% d'accélération** du TMS1, les analyses ont montré 2 effets principaux l'un de l'âge et l'autre de la phase, plus une interaction entre ces 2 facteurs (Tableau 1).

⁹ Les autres résultats donnés par cette analyse concernent les comparaisons âge par âge et sont les suivants. Les enfants de **1 an** frappent au même rythme pendant ces 3 phases. Les enfants de **2 ans**, eux, ont un TMS2 significativement plus rapide que leur TMS1 ($p < .05$). Quant aux enfants de **3 ans**, leur TMS est également accéléré par la phase de synchronisation (TMS1 vs. TMS2 : $p < .0001$).

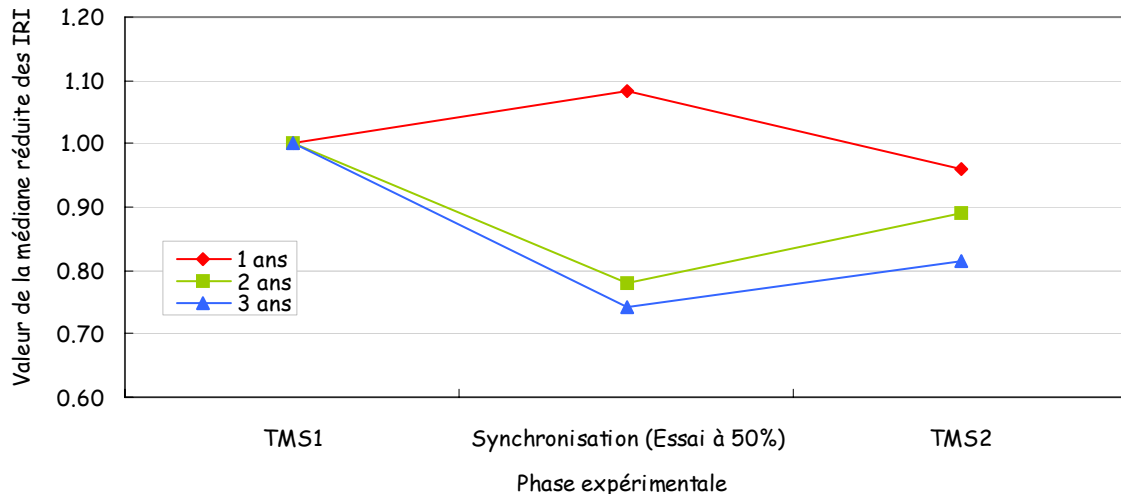


Figure 13:

Comparaison des médianes réduites des IRI en fonction de la phase expérimentale

Une analyse post-hoc (Tukey) confirme là encore ces résultats (Figure 13). A **1 et 2 ans**, les 3 rythmes de frappe sont équivalents. A **3 ans** par contre, la phase de synchronisation a eu pour effet d'accélérer les frappes significativement ($p < .0005$) et cet effet s'est maintenu pendant la phase de TMS2 ($p < .0005$). **L'enfant de 3 ans est donc sensible aux stimulations externes 2 fois plus rapides que son TMS** et ne reprend pas son rythme initial (ce qu'il aurait pu faire en tapant une fois toutes les 2 stimulations).

Comparaison des différents essais de synchronisation

Afin d'évaluer l'effet de l'accélération sur le rythme de frappe des enfants, une ANOVA a été conduite sur les médianes des IRI réduites (ANOVA : $S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Essai}_{11}$).

Cette analyse révèle un **effet de l'âge** [$F(2,45) = 4,80, p < .05$]] et une **interaction entre l'âge et les essais** [$F(20,450) = 1,61, p < .05$] (Figure 14).

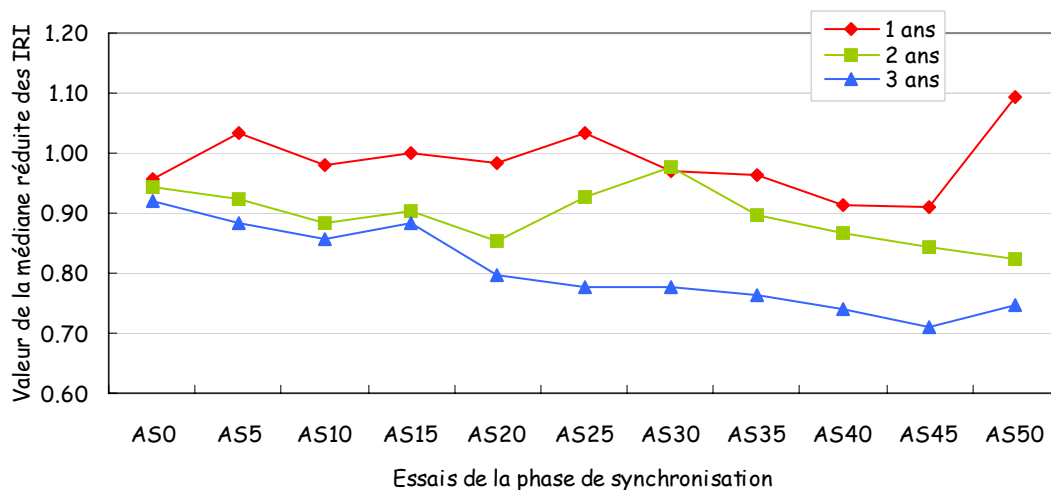


Figure 14 :
Comparaison des médianes réduites des IRI en fonction des essais de la phase de synchronisation

Une **comparaison essai par essai** (test post-hoc de Tukey) montre qu'il n'existe pas de différences significatives entre les enfants de 1 an et de 2 ans, ni entre ceux de 2 ans et de 3 ans : pour chaque essai, la médiane (réduite) des IRI est comparable d'un âge à l'autre. Le résultat remarquable de cette analyse concerne les enfants de 3 ans : jusqu'à 15% d'accélération, leur rythme de frappe est comparable à celui des enfants de 1 et 2 ans. **A partir de 20% d'accélération, les enfants de 3 ans accélèrent nettement leurs frappes** par rapport aux enfants de 1 an ($p < .01$) : à partir de cet essai, leurs IRI sont significativement plus faibles que ceux des enfants de 1 an (respectivement pour les essais de 20% à 50% : $p < .05$, $p < .0001$, $p < .05$, $p < .01$, $p < .05$, $p < .005$ et $p < .0001$).

L'effet principal de l'âge autorise à reprendre les **analyses âge par âge** (ANOVA : $S < \text{Sexe}_2 > \times \text{Essai}_{11}$). Pour les enfants de 1 et 2 ans, il n'existe aucun effet ni aucune interaction entre les facteurs. Les enfants de **1 et 2 ans** n'accélèrent donc pas le rythme de leur frappes en fonction du rythme du stimulus entendu.

A **3 ans**, il existe un effet principal lié aux essais. La comparaison des essais entre eux par un test post-hoc de Tukey permet de montrer que les enfants de 3 ans ne changent pas de façon de frapper pour des variations de 0 à 15%. Par contre, ils accélèrent leurs frappes lorsque la variation des ISI est de 20 à 50%, toujours par rapport au 1^{er} essai de la phase synchronisation (pour tous, $p < .0001$). En complément, les essais de 20 à 50% sont statistiquement différents de l'essai 5% (à 20% : $p < .05$; de 25 à 30% : $p < .001$; de 35 à 50% : $p < .0001$) ; les essais de 25 à 50% sont différents de celui à 10% (pour 25 et 30% : $p < .05$; à 35% : $p < .01$; pour 40 et

45% : $p < .0001$ et pour 50% : $p < .001$; les essais de 20 à 50% sont différents de celui de 15% (à 20% : $p < .05$; pour 25 et 30% : $p < .001$; pour 35 à 50% : $p < .0001$) ; enfin, les essais à 20% de variation et 45% sont aussi différents ($p < .05$). Il ressort donc que les enfants de 3 ans accélèrent leurs frappes à partir d'une variation des stimulations de 20%. Mais, ils ne parviennent pas à le faire significativement entre 2 essais successifs (à l'exception justement de l'essai à 20% dont la médiane est significativement différente de celle de l'essai à 15%, $p < .05$). **A 3 ans, il existe donc un seuil entre 15 et 20%.**

2.2.5 Etude de la variabilité

Comparaison des 3 phases

L'analyse de la variabilité relativement aux 3 phases expérimentales a été réalisée à partir du coefficient de variation intra-individuelle défini plus haut. Comme précédemment, 11 ANOVA ($S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Phase}_3$) ont été menées pour rendre compte de l'effet de chaque variation pendant la phase de synchronisation. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant (Tableau 6) :

Effets et Interaction	Age	Age/Phase
TMS1 / AS0 / TMS2		F (4,132) = 2.79 ; $p < .05$
TMS1 / AS5 / TMS2	F (2,65) = 3.31 ; $p < .05$	F (4,130) = 3.48 ; $p < .01$
TMS1 / AS10 / TMS2	F (2,66) = 3.97 ; $p < .05$	F (4,132) = 3.97 ; $p < .005$
TMS1 / AS15 / TMS2	F (2,64) = 3.20 ; $p < .05$	F (4,128) = 2.78 ; $p < .05$
TMS1 / AS20 / TMS2	F (2,66) = 3.36 ; $p < .05$	F (4,132) = 3.43 ; $p < .05$
TMS1 / AS25 / TMS2		F (4,126) = 2.91 ; $p < .05$
TMS1 / AS30 / TMS2	F (2,65) = 4.51 ; $p < .05$	
TMS1 / AS35 / TMS2	F (2,64) = 3.27 ; $p < .05$	F (4,128) = 3.43 ; $p < .05$
TMS1 / AS40 / TMS2		F (4,132) = 3.70 ; $p < .01$
TMS1 / AS45 / TMS2	F (2,62) = 3.81 ; $p < .05$	F (4,124) = 4.39 ; $p < .005$
TMS1 / AS50 / TMS2		F (4,98) = 3.40 ; $p < .05$

Tableau 6 :
Effets significatifs révélés par la comparaison de la variabilité des IRI des 3 phases expérimentales (ANOVA)

D'une manière globale, presque tous les essais révèlent un effet de l'âge et surtout une interaction entre l'âge des sujets et la phase. En conséquence, pour plus de simplicité, nous

avons poursuivi l'analyse comme pour les IRI, en moyennant la variabilité de tous les essais de synchronisation (Figure 15).

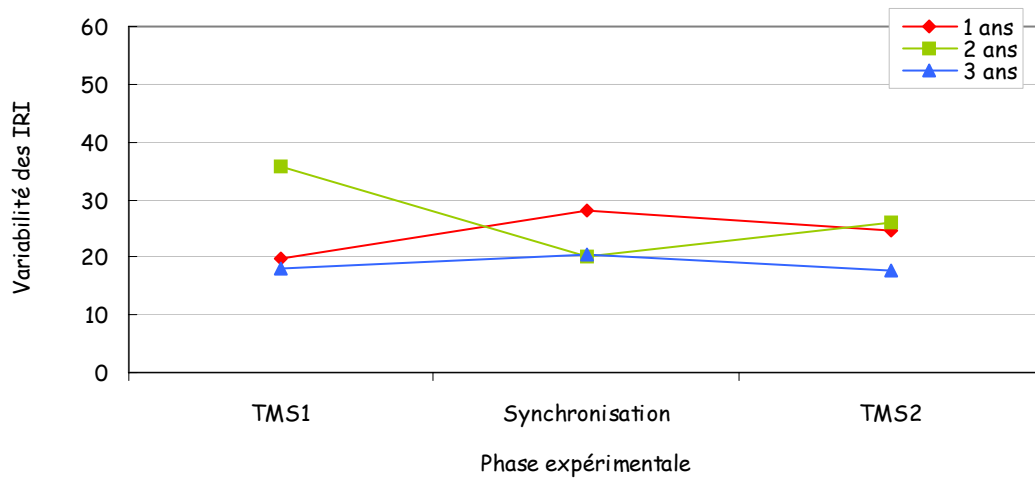


Figure 15 :
Comparaison de la variabilité des IRI en fonction de la phase expérimentale
(moyenne des essais pour la phase de synchronisation)

Ainsi, la comparaison de la variabilité au cours des 3 phases (ANOVA : $S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Phase}_3$) montre qu'il existe des différences liées à l'âge [$F(2,66) = 3,34$; $p < .05$], mais aussi à l'interaction entre l'âge des enfants et la phase de la tâche [$F(4,132) = 3,86$; $p < .01$] confirmant les résultats spécifiques à chaque essai de synchronisation.

La comparaison de la variabilité (test post-hoc de Tukey) pendant la phase de TMS1 révèle que les enfants de 2 ans sont significativement plus variables que ceux de 3 ans ($p < .0005$) et que ceux de 1 an ($p < .05$). La variabilité pendant la phase de synchronisation n'est pas différente de celle de la phase de TMS2, quel que soit l'âge des enfants.

L'existence d'un effet principal de l'âge sur la variabilité au cours des 3 phases autorise à conduire des analyses de variance pour chaque âge (ANOVA : $S < \text{Sexe}_2 > \times \text{Phase}_3$). A **1 an**, il existe un effet principal lié à la phase [$F(2,26) = 4,35$; $p < .05$] : les enfants sont significativement plus variables en phase de synchronisation qu'en phase de TMS1 (test post-hoc de Tukey : $p < .05$). Il est à noter que la variabilité enregistrée pendant la phase de TMS2 est intermédiaire à celle des 2 autres phases ; cependant les différences ne sont pas significatives. De la même façon, il existe chez les **enfants de 2 ans** un effet de la phase sur la variabilité intra-individuelle [$F(2,42) = 3,66$, $p < .05$] : mais à cet âge, la variabilité décroît

entre la phase de TMS1 et la phase de Synchronisation (test post-hoc de Tukey : $p < .05$). La variabilité intermédiaire relevée en phase de TMS2 est là encore comparable à celle des 2 autres phases. Quant aux **enfants de 3 ans**, leur variabilité est équivalente quelque soit la phase mais pas quelque soit le sexe de l'enfant [$F(1,32) = 6,42, p < .05$] : **les garçons sont plus variables que les filles** (test post-hoc de Tukey : $p < .05$).

Comme précédemment, il apparaît intéressant d'examiner les cas particuliers du premier et du dernier essai de synchronisation.

La comparaison de la phase de TMS initial avec le premier essai de synchronisation et la phase de TMS2 avait révélé une interaction entre l'âge et la phase (Tableau 6).

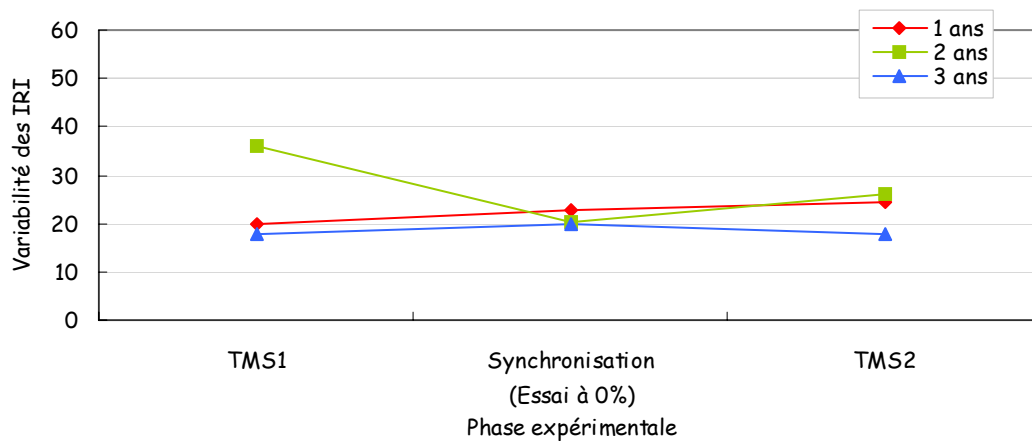


Figure 16 :
Comparaison de la variabilité des IRI en fonction de la phase expérimentale

Plus spécifiquement, cette analyse montre que les enfants de 1 et 3 ans ont une variabilité équivalente au cours de ces 3 phases et particulièrement lors de la transition entre la phase de TMS et celle de synchronisation avec le propre TMS de l'enfant (AS0). Elle confirme que les enfants de 2 ans présentent une variabilité très importante pendant la phase de TMS1, comparativement à la phase de synchronisation (test post hoc de Tukey : $p < .05$).

Concernant la comparaison entre la phase de TMS1, l'essais de synchronisation avec une stimulation 2 fois plus rapide et enfin la TMS2, l'analyse avait révélé aussi une interaction âge/phase (Tableau 6).

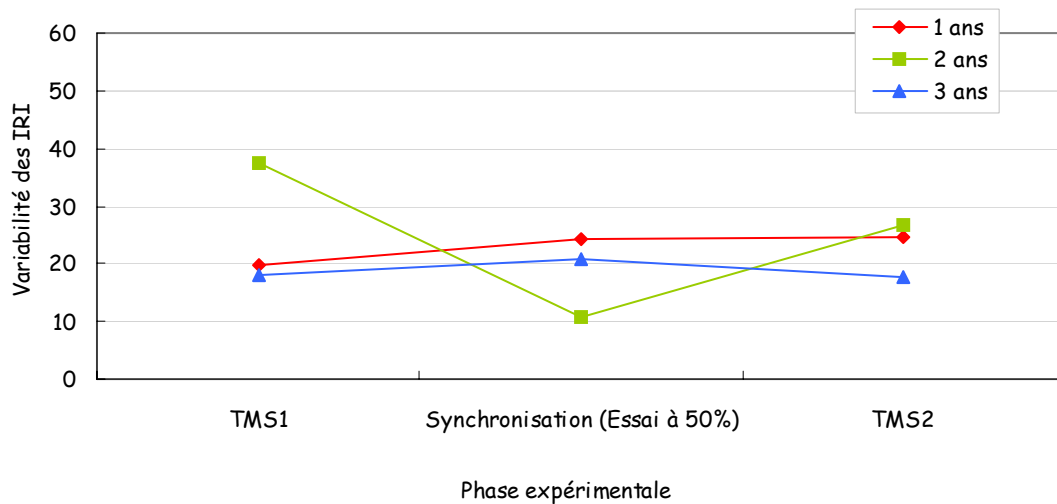


Figure 17 :
Comparaison de la variabilité des IRI en fonction de la phase expérimentale

Quel que soit l'âge, la variabilité est équivalente entre l'essai de la phase de synchronisation (AS50) et l'essai de la phase de TMS2¹⁰ (Figure 17).

Comparaison des essais de la phase de synchronisation

La variabilité évolue également au cours des essais de synchronisation de cette séance A (ANOVA : $S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Essai}_{11}$) : **elle diminue avec l'âge** [$F(2,45) = 3,38, p < .05$], **elle varie en fonction de l'essai** [$F(10,450) = 2,55, p < .01$] **et différemment selon l'âge et l'essai** [$F(20,450) = 1,65, p < .05$] (Figure 18).

¹⁰ Là aussi l'analyse confirme que le TMS1 des enfants de 2 ans est plus variable qu'au cours des autres phases, pendant ou après stimulations auditives ($p < .05$).

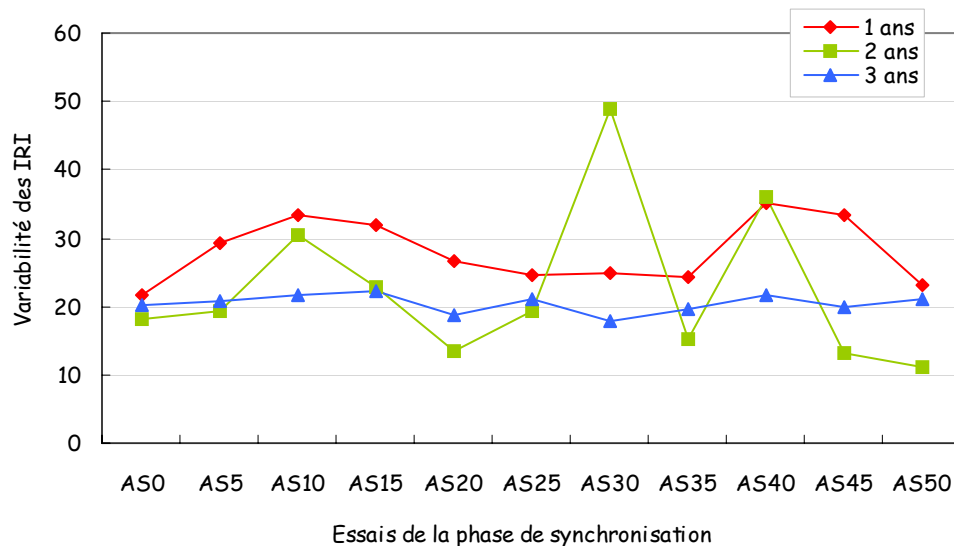


Figure 18 :
Comparaison de la variabilité des IRI en fonction des essais de la phase de synchronisation

Plus précisément, tout au long de la phase de synchronisation, **la variabilité est significativement plus faible chez les enfants de 3 ans que chez ceux de 1 an** (test post-hoc de Tukey : $p < .05$). La variabilité est par contre équivalente entre 1 et 2 ans et entre 2 et 3 ans. Les enfants de 2 ans ont une variabilité intermédiaire à celles de 1 et 3 ans (un test post-hoc de Tukey permet cependant de déceler une différence significative pour l'essai à 30% d'accélération ($p < .005$) : la variabilité à 2 ans est supérieure).

Pourtant, pour chacun des 3 groupes d'âge (ANOVA : $S < \text{Sexe}_2 > \times \text{Essai}_{11}$, pour chaque âge), la variabilité ne dépend ni des essais ni du sexe ni de ces 2 facteurs (aucun effet significatif).

2.2.6 Analyse du renforcement

L'analyse du renforcement n'est pas fondamentale pour cette expérience, dans la mesure où l'objectif n'était pas d'étude des capacités de synchronisation des enfants. Néanmoins, elle contribue à évaluer l'adéquation du protocole.

Un bon moyen d'illustrer **la relation entre la frappe et la fenêtre temporelle de renforcement** est le SRI (Stimulus Response Interval, défini en première partie). Comme il est possible de représenter la distribution des frappes par les IRI, la distribution des SRI peut être représentée en rapportant la valeur de chaque SRI de chaque enfant à la valeur de l'ISI de l'essai correspondant qui dans ce protocole est directement dépendante du TMS de l'enfant considéré. Toutes les valeurs sont donc ramenées à un intervalle standard dont l'étendue

s'échelonne de -50 à +50. Dans ces graphiques, la valeur 0 correspond au début du son, le début de la fenêtre temporelle étant à -15% (puisqu'elle est définie pour représenter 15% de l'ISI). Comme la fin de la fenêtre temporelle correspond à une valeur fixe, quelque que soit l'ISI de l'essai considéré (100 ms), la durée du son ne représente pas la même proportion de l'ISI selon l'enfant : c'est donc une valeur moyenne pour tous les enfants qui matérialise la fin de cette fenêtre temporelle (*voir graphiques SRI sous excel*).

Ces distributions normalisées mettent en évidence l'évolution des frappes en fonction de l'âge et des essais mais elles ne suffisent cependant pas à montrer d'éventuelles différences significatives.

L'étude du **pourcentage de renforcement** au cours des essais montre un effet principal lié à l'âge (ANOVA : $S\langle \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 \rangle \times \text{Essai}_{11}$) [$F(2,45) = 21,35, p < .0001$] : **les enfants de 3 ans ont été significativement plus renforcés que les enfants de 1 an** (test post-hoc de Tukey : $p < .0005$) **et que les enfants de 2 ans** (test post-hoc de Tukey : $p < .001$). Les enfants de 1 et 2 ans ont été autant renforcés (Figure 19).

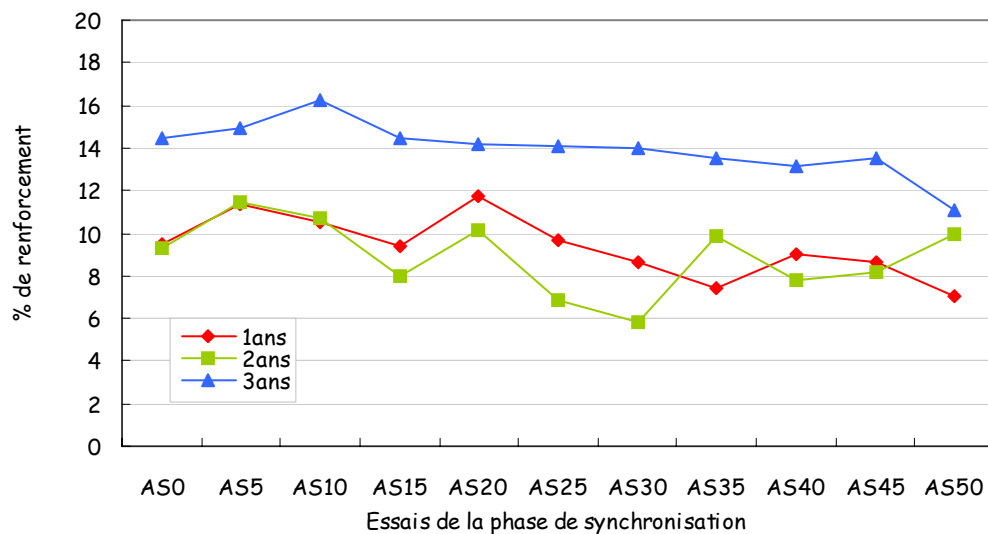


Figure 19 :
Pourcentage de frappes renforcées en fonction des essais de la phase de synchronisation

Une ANOVA menée **âge par âge** ($\langle \text{Sexe}_2 \rangle \times \text{Essai}_{11}$) montre que, à 1 et 2 ans, aucun facteur ne différencie les essais.

A 3 ans, il existe un effet principal des essais [$F(10,310) = 3,11, p < .001$] : globalement, **la proportion de frappes renforcées décroît au fur et à mesure que la stimulation auditive**

accélère. En particulier, c'est au cours du dernier essai (correspondant à 50% d'accélération par rapport au TMS1) que le pourcentage de renforcement devient significativement plus faible que celui des 4 premiers essais (test post-hoc de Tukey, respectivement : $p < .05$, $p < .01$, $p < .0001$, $p < .05$).

Parmi les frappes renforcées, les frappes produites en anticipation par rapport à l'arrivée du son reflètent la part d'une bonne synchronisation avec le stimulus. Ainsi, l'analyse du **pourcentage de frappes anticipées** est aussi un bon indice de la qualité de la synchronisation au cours des essais. Une ANOVA ($<Age_3 \times Sexe_2> \times Essai_{11}$) révèle un effet principal de l'âge [$F(2,45) = 10,75$, $p < .0005$] et des essais [$F(10,450) = 2,20$, $p < .05$]. Ces résultats confirment les précédents : **les enfants de 3 ans anticipent significativement plus que les enfants de 1 an** (test post-hoc de Tukey : $p < .0005$) **et que ceux de 2 ans** (test post-hoc de Tukey : $p < .01$). De même, **l'anticipation décroît au cours des essais**, mais de façon plus marquée que le taux de renforcement (Figure 20).

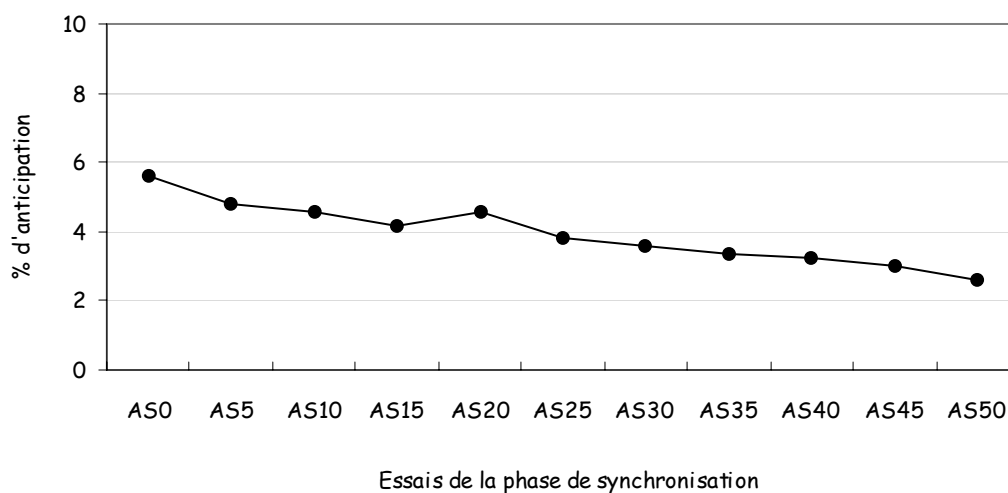


Figure 20 :
Pourcentage de frappes anticipées, tout âge confondu,
en fonction des essais de la phase de synchronisation

Dans le détail, le pourcentage de frappes anticipées pour l'essai à 0% de variation est significativement supérieur à celui des 6 derniers, c'est-à-dire à partir de 25% d'accélération (test post-hoc de Tukey, respectivement : $p < .05$, $p < .01$, $p < .005$, $p < .0005$, $p < .0001$ et $p < .0001$) ; celle à 5% est supérieure aux 2 derniers (respectivement $p < .05$ et $p < .005$) ; celle à

10% est supérieure à celle de 50% ($p < .05$) ; enfin, celle à 20% est aussi supérieure à celle à 50% ($p < .05$).

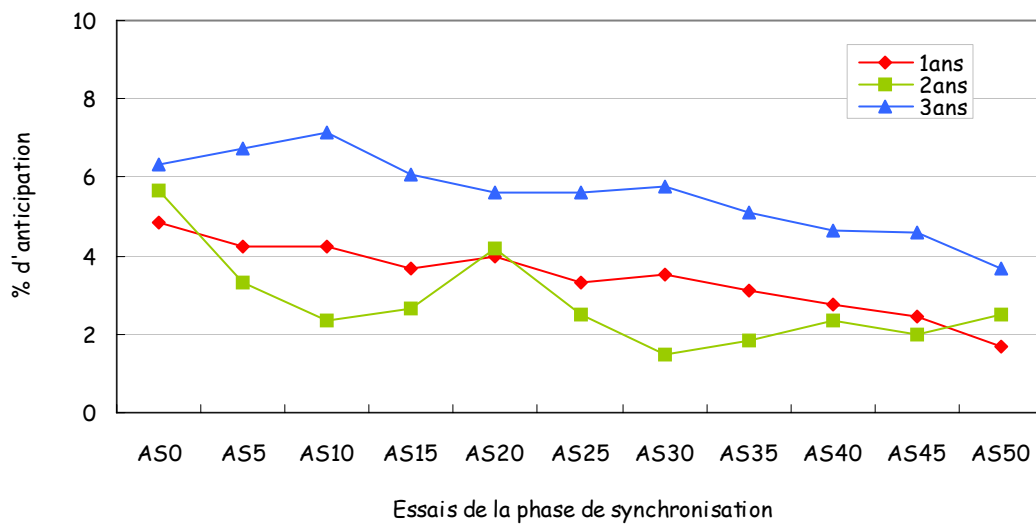


Figure 21 :
Pourcentage de frappes anticipées en fonction de l'âge
au cours des essais de la phase de synchronisation

A **1 an**, il existe une différence du pourcentage de frappes anticipées au cours des essais (ANOVA $S < \text{Sexe}_2 > \times \text{Essai}_{11} >$) [$F(10,120) = 2,03, p < .05$] : mais seul le taux d'anticipation relevé pour l'essai à 50% est significativement plus faible que celui à 0% (test post-hoc de Tukey : $p < .05$). A 1 an, l'anticipation des stimulations auditives est moins bonne lorsque les ISI sont 2 fois plus rapides que lorsqu'ils correspondent au TMS de l'enfant. A **2 ans**, le pourcentage de frappes anticipées ne varie ni en fonction des essais, ni en fonction du sexe. Enfin, à **3 ans**, l'analyse révèle des différences dépendantes des essais [$F(10,310) = 4,00, p < .0001$] : le taux d'anticipation décroît au fur et à mesure des essais. Là encore, le dernier essai (AS50) se distingue des 4 premiers (AS0 à AS15) par son nombre plus faible de frappes anticipées (test post-hoc de Tukey, respectivement : $p < .01, p < .001, p < .0001$ et $p < .05$). A noter que l'essai à 10% est différent des 3 derniers (AS40 à AS50, respectivement : $p < .05, p < .05$ et $p < .0001$).

2.3 Discussion

Résumé des résultats de la séance A

Le premier résultat concerne la détermination du TMS pour les 3 groupes d'âge. Si le rythme de frappe a tendance à augmenter avec l'âge (de 442 ms à 1 an à 504 ms à 3 ans), cette variation n'est cependant pas significative. Par contre, les frappes deviennent plus régulières avec l'âge, et ce de façon significative entre 2 et 3 ans. D'autre part, la variabilité inter-individuelle augmente nettement entre 1 et 2 ans.

Les principaux résultats de cette expérience concernent l'influence des stimulations externes plus rapides que le TMS de l'enfant. Les analyses ont révélé des différences au cours du développement.

Le rythme de frappes des **enfants de 1 an** n'a pas été modifié par ces stimulations pendant la phase de synchronisation et celui-ci s'est maintenu après cette phase, en absence des stimulations. L'analyse de la variabilité des frappes montre que les frappes deviennent plus variables pendant la phase de synchronisation qu'elles ne l'étaient pendant la phase de TMS1. **Les stimulations de la phase de synchronisation ont donc interféré avec le mécanisme central responsable de la production des frappes.** Cependant, aucune des accélérations par rapport au TMS initial (c'est-à-dire aucune des variations) ne semble avoir eu une influence sur la variabilité des frappes. L'analyse du pourcentage de renforcement des frappes confirme cette absence d'effet. Seul point sensible : le pourcentage de frappes anticipées diminue progressivement au fur et à mesure des essais.

Les **enfants de 2 ans** sont eux plus sensibles à l'influence de stimulations extérieures de plus en plus rapides. En effet, ils accélèrent significativement leurs frappes pendant la phase de synchronisation et leurs frappes deviennent moins variables que pendant la phase de TMS. Cependant, cette influence ne perturbe pas l'horloge interne. En effet, après la phase de synchronisation, les enfants reviennent à une vitesse de frappe intermédiaire et à une variabilité elle aussi intermédiaire (en moyenne sur tous les essais de la phase de synchronisation elle est comparable à celle des 2 autres phases). Par ailleurs, pendant la phase de synchronisation, les essais sont équivalents entre eux, en ce qui concerne le rythme de frappe, la variabilité, le pourcentage de renforcement et le pourcentage de frappes anticipées. **Leur façon de répondre aux stimulations ne dépend donc pas de l'importance de l'accélération des stimulations.**

Les **enfants de 3 ans** ont des performances supérieures aux 2 autres groupes d'âge. Pendant la phase de synchronisation, ils accélèrent leur rythme de frappe, sans être plus variables, et maintiennent ce rythme en l'absence de stimulations (bien que le TMS après la phase de synchronisation ne soit pas significativement plus rapide que le TMS initial) et ce, toujours avec une variabilité équivalente au cours des 3 phases. Il est à noter que d'une manière générale, les garçons sont plus variables que les filles. A cet âge, les différentes accélérations des stimulations ont eu des effets différents. **Les enfants accélèrent leur rythme de frappe significativement à partir de 20% d'accélération des stimulations** (avec une variabilité équivalente pour tous les essais). Leurs frappes sont de moins en moins renforcées au fur et à mesure des essais, et ce particulièrement au dernier essai (accélération de 50% par rapport à leur TMS initial).

Les résultats de cette expérience montrent que, au cours du développement, les stimulations auditives plus rapides que le TMS du sujet modifient de plus en plus la façon de frapper de l'enfant. Ainsi, alors que chez l'enfant de 1 an, l'influence des stimulations extérieures est quasiment nulle, les enfants de 2 et 3 ans sont influencés par les stimulations extérieures. A 2 ans, l'influence est intermédiaire aux 2 autres groupes d'âge.

Valeur du TMS

Conformément à notre hypothèse, la première phase de cette expérience a permis de déterminer les **valeurs moyennes du TMS** à 1,5 ans, 2,5 ans et 3,5 ans (âges moyens des enfants de chacun des 3 groupes). L'analyse montre que le TMS se situe en moyenne à 470 ms et n'évolue pas de façon significative entre ces âges. Ces données ne permettent donc pas de confirmer l'hypothèse du ralentissement du TMS avec l'âge.

Les valeurs déterminées ici sont supérieures à celles trouvées dans la littérature chez le jeune enfant. L'hypothèse du ralentissement a été validée à partir de données concernant des enfants de 4 ans et plus. Mais la construction de cette hypothèse s'est basée sur une valeur de TMS proche de 400 ms (Drake & al., 2000). **Il est probable que dans l'hypothèse d'un ralentissement du TMS**, celui-ci soit trop faible **chez le jeune enfant de moins de 4 ans** voire qu'il **soit inexistant**, ce que tendent à montrer nos données.

Cette hypothèse est tout à fait envisageable dans la mesure où il existe une limite biomécanique à l'exécution d'un mouvement rapide. L'enfant ne peut frapper plus vite que ce que lui permettent ses effecteurs. De plus, le TMS de l'enfant, au moins vers 4 ans, est très

proche de son rythme de frappe maximal (Drake & al., 2000). La valeur de départ du TMS à partir de laquelle le ralentissement se produit ne peut donc franchir cette limite.

Une autre information intéressante concerne la **variabilité** (intra-individuelle) **du TMS** : celle-ci diminue avec l'âge. En particulier entre 2 et 3 ans. Ce résultat tend à montrer que **l'enfant maîtrise de mieux en mieux la production de frappe régulière suggérant que son système de traitement gagne en précision avec l'âge**. Il est à préciser que ce perfectionnement se déroule très probablement entre 1 et 3 ans plutôt qu'entre 2 et 3 ans comme semble le montrer les résultats. En effet, les résultats montrent qu'à 2 ans, la variabilité est très nettement supérieure à celle des enfants de 3 ans mais aussi à celle des enfants de 1 an. Il est très probable que ce résultat soit le fruit d'un biais expérimental. Pour améliorer l'adéquation de notre protocole à l'âge des enfants, les enfants de 1 an (et uniquement ces enfants) ont eu plusieurs essais de TMS au cours de la première phase (voire même, ils pouvaient avoir participé à une séance de familiarisation avec le jeu). En conséquence, le TMS enregistré pour le groupe des enfants de 1 an était le dernier d'un certain nombre d'essais (déterminé par l'expérimentateur selon le critère suivant : la médiane des 2 derniers essais de TMS1 devait être suffisamment semblable, par rapport aux précédents essais ou tout au moins la tâche devait être correctement exécutée). Cette précaution était importante pour être sûr que le TMS initial reflétait bien la période de référence de l'enfant, et qu'ainsi la phase de synchronisation était basée sur un paramètre fiable. Malgré tout, elle a probablement introduit un biais au moins en ce qui concerne la variabilité qui ne peut être réellement comparée entre les enfants de 2 ans et ceux de 1 et 3 ans. Il aurait fallu trouver un nombre d'essai adapté à l'enregistrement du TMS pour les 3 groupes d'âge. La contrainte principale de cette expérience était le nombre d'essais total qui devait être limité pour éviter une lassitude du sujet.

L'évolution exacte de la variabilité du TMS au cours de la petite enfance devrait donc être étudiée au moyen d'un protocole spécifique, et ce d'autant plus qu'elle apporte des informations sur la mise en place du système de traitement temporel. En effet, si comme semble l'indiquer nos données, la valeur du TMS, et donc de la période de référence, ne varie pas pendant la petite enfance (et remettant donc en cause la validité de l'hypothèse du ralentissement de la période de référence avant 4 ans), alors le mécanisme à la source de cette production évolue donc d'une autre façon à ces âges précoces. Cette phase d'évolution particulière est à relier aux nombreux phénomènes de maturation des structures cérébrales au cours des premières années de la vie. Pendant cette phase, le système, immature, gagnerait en

stabilité puis entamerait un ralentissement de sa valeur, la stabilité du système étant conservée. La base de temps à l'origine du TMS (et de la période de référence) doit donc subir la même évolution avec cette phase transitoire.

Influence de stimulations rapides

Le résultat principal est que **dès 2 ans, les enfants parviennent à accélérer leurs frappes** significativement sous l'influence de stimulations extérieures. Au niveau central, le mécanisme de traitement est donc capable de produire des frappes plus rapides que la période de référence. Cette opération est un phénomène robuste puisque, les enfants conservent ce rythme de frappes plus rapide en l'absence de stimulations. **Le mécanisme d'horloge possède donc une certaine inertie qui augmente avec l'âge** (les enfants de 2 ans reviennent à une valeur intermédiaire entre leur TMS initial et le rythme de frappe en phase de synchronisation et les enfants de 3 ans conservent une valeur très proche de leur dernier rythme de frappe). Ce résultat suggère qu'une modification du fonctionnement du système voire de la base de temps soit consécutive à l'interaction avec des stimulations auditives extérieures. Chez l'adulte, une stimulation rapide préalable à un traitement perceptif induit une sous-estimation, interprétée comme étant liée à une accélération de la base de temps du mécanisme central (Penton-Voak & al., 1996). Cette sous-estimation suggère que ce phénomène résulte d'une interaction parasite plutôt que d'une modification nécessaire au traitement des durées, bien que cette interaction devienne plus prégnante avec l'âge. Cette interrogation mérite des analyses complémentaires.

Si les enfants parviennent dès 2 ans à accélérer leur rythme de frappes, à 3 ans, la variabilité des frappes reste équivalente d'une phase à l'autre. Corrélé au plus fort pourcentage de renforcement des frappes et surtout de frappes anticipées (indicateurs d'une bonne synchronisation), ce résultat suggère **un mécanisme de traitement des durées mieux maîtrisé** à 3 ans.

Les résultats mentionnés précédemment ne sous-entendent pas qu'avant 2 ans, les enfants ne soient pas sensibles à ces stimulations. **En effet, les enfants de 1 an**, s'ils ne parviennent pas à accélérer leurs frappes, **sont néanmoins perturbés par les stimulations extérieures plus rapides que leur TMS** : la variabilité de leurs frappes augmente, en moyenne, pendant la phase de synchronisation, pour revenir à sa valeur initiale pendant la phase de TMS2. Ce résultat est cependant à prendre avec précaution pour 2 raisons. La première est que la comparaison a été réalisée sur la variabilité moyenne de la phase de synchronisation. La

seconde est que la variabilité du TMS a été enregistrée après plusieurs essais alors que chaque variation de la phase de synchronisation n'a fait l'objet que d'un essai. Néanmoins, nos résultats montrent que conformément à l'hypothèse formulée, les enfants, dès 1 an, sont capables d'interagir avec une stimulation externe plus rapide que leur période de référence.

Un résultat atypique est celui concernant la variabilité des frappes à 2 ans au cours des 3 phases expérimentales. Une explication a été avancée dans le paragraphe précédent : la plus grande variabilité du TMS1 à 2 ans serait la conséquence d'un biais expérimental. Pendant la phase de synchronisation, la variabilité des enfants de 2 ans est équivalente à celle des 2 autres groupes d'âge. Dans ce cas de figure très particulier, la phase de synchronisation exerce donc un effet stabilisateur des frappes (toujours en moyenne) par rapport à un rythme de frappe en libre court. De plus, cette diminution peut aussi s'expliquer assez simplement en considérant que pour cette phase de synchronisation, les enfants de 2 ans accélèrent leurs frappes. Or, une diminution des IRI donne accès à un nombre réduit de valeurs d'IRI contraignant ainsi la variabilité.

Un autre résultat particulier concerne la phase de synchronisation : à un âge où la tâche apparaît bien maîtrisée, **les garçons sont plus variables que les filles**. Peu de données sont disponibles à ce sujet. Généralement, les garçons sont meilleurs en ce qui concerne les tâches de traitement temporel et sont moins variables (Provasi & Bobin-Bègue, 2003 ; Vanneste et al., 2001 ; Jacquet et al., 1994, Goldstone & Goldfarb, 1966). Mais, il a été montré que pour une tâche donnée, l'attention qui lui est dédiée peut varier avec le sexe du sujet (Dittmar et al., 1993). Le même type d'hypothèse peut être avancé ici. Il est possible qu'entre 2 et 4 ans, les filles soient plus attentives dans les tâches qu'elles doivent exécuter ou tout au moins pour ce type de tâche. Leurs performances sont ainsi meilleures que celles des garçons, au sens où les filles mobiliseraient plus de ressources cognitives que les garçons. Ce résultat corrobore celui trouvé en perception cette fois, dans notre étude sur la discrimination de tempo, où les filles apparaissaient meilleures que les garçons. Mais il reste à prendre avec précaution dans la mesure où les résultats de Provasi & Bobin-Bègue (2003), avec le même type de protocole sont inversés. Compte-tenu de cette ambiguïté, ce facteur devrait faire l'objet d'études spécifiques.

Si des stimulations auditives externes plus rapides que la période de référence de l'enfant induisent une accélération des frappes, à partir de quelle valeur d'accélération cette modification devient-elle effective ? Les résultats montrent que lorsque la durée des ISI

devient inférieure de plus de 20% au TMS, **seuls les enfants de 3 ans** réussissent à produire des frappes plus rapides. Ce **seuil** est d'ailleurs précisément **situé entre 15 et 20% d'accélération** puisque les IRI pour une variation inférieure à 15% sont plus longs que ceux produits au-delà de 20% de variation. Cette accélération apparaît par ailleurs bien maîtrisée dans la mesure où les frappes ne deviennent pas plus variables après ce seuil. L'hypothèse de l'existence d'un seuil au-delà duquel un traitement des durées différent est possible est donc confirmée et est du même ordre que celui attendu. Le système de traitement doit détecter une différence entre 2 durées pour les traiter différemment. Si le mécanisme repose sur un oscillateur de référence, dont la période est très peu adaptable et que le système d'horloge utilise des multiples ou des sous-multiples de cette période pour traiter d'autres durées (Théorie de l'Attention Dynamique), alors un seuil entre 15 et 20% est inattendu (il ne s'agit pas d'un multiple simple).

Il doit être noté que le **maximum d'accélération** des frappes est obtenu pour une variation de 45% plutôt qu'à 50%. Cette dernière valeur a un statut particulier : pour obtenir un renforcement, les enfants doivent frapper 2 fois plus rapidement que leur rythme spontané. Il est probable que certains enfants se soient contentés de reprendre leur TMS, ce qui peut être plus simple (une analyse similaire a été faite chez le jeune enfant, voir Provasi & Bobin-Bègue, 2003). De plus, cette « stratégie » lui permet d'obtenir aussi un renforcement pour chacune de ses frappes, même si potentiellement, il peut en obtenir 2 fois plus. D'autre part, si on considère le TMS moyen à ces âges (470 ms), le maximum d'accélération obtenu représente (à 3 ans) 70% de la valeur du TMS (Figure 14) soit en moyenne 330 ms. Cette valeur doit être proche de la vitesse maximum de frappe à ces âges (voir les valeurs données par Drake & al. (2000) à partir de 4 ans), mais aussi à la limite d'un mode de frappe contrôlé (Peters, 1989). Un comportement robuste comme le TMS peut être, dans ces conditions, favorisé par rapport à la difficulté d'un mode de frappe automatique. Ces 2 points peuvent expliquer que les IRI les plus rapides sont observés à 45% et non à 50%. Ce résultat contredit en outre le fait que l'horloge puisse traiter plus facilement des multiples et sous multiples de la période de référence.

Un autre corollaire de ce résultat est que la vitesse de frappe maximum n'est en réalité pas proche du TMS (Drake & al., 2000) puisque les enfants sont capables d'accélérer leurs frappes de 30% par rapport à leur TMS, tout au moins dans les conditions de notre étude. Il est par ailleurs remarquable que pour une accélération de 20%, leur médiane soit accélérée de 20% (la médiane réduite passe de 1 à 0,80). **Le rythme de frappe maximum des enfants de**

3 ans est donc au moins 30% plus rapide que leur TMS. Il aurait fallu que les accélérations appliquées dépassent les 50% (qui a donc un statut particulier) pour vérifier s'il s'agissait ou non de leur vitesse de frappe maximum.

Nos résultats (comme ceux de Provasi & Bobin-Bègue, 2003) **suggèrent que générer des valeurs d'intervalles proches de la période de référence est plus difficile que de produire des intervalles nettement différents, au moins pour un système immature.** Il a été mentionné en première partie de ce document que les systèmes oscillants nécessitent des processus d'ajustements (ajustement de phase et de période pour des tâches de synchronisation et de continuation) et étaient caractérisés par une certaine inertie (oscillator signature). Ces phénomènes, caractéristiques des tâches de production, doivent se mettre en place entre 2 et 3 ans. En effet, ce seuil ne ressort pas de façon significative à 2 ans et ne transparait pas à 1 an. Cette interprétation ne concerne que le système lié à la production, puisqu'il a été montré que ce seuil existe en perception dès 2 mois (Baruch & Drake, 1997), ce qui a été aussi confirmé par notre étude en discrimination de tempo. Le système central doit ainsi percevoir les variations des stimulations extérieures (dès 1 an, les enfants ont des frappes perturbées en phase de synchronisation), cependant les processus responsables de la production des frappes ne sont pas suffisamment matures pour modifier significativement le rythme des frappes. Il est possible que ce seuil puisse être matérialisé avant 3 ans grâce à un nombre d'essais plus important. L'ordre de grandeur de la valeur de ce seuil étant maintenant déterminé, il serait intéressant de reprendre cette expérience en limitant le nombre de variations des stimulations et en augmentant en contrepartie le nombre d'essais par valeur d'accélération.

Ces résultats de la phase de synchronisation tendent à montrer que le mécanisme d'horloge évolue au cours des premières années de développement. A 1 an, l'horloge perçoit les stimulations plus rapides qui interfèrent avec le mécanisme de production des frappes (en générant une plus forte variabilité des frappes). A 2 ans, l'horloge peut produire des intervalles plus rapides que ceux de sa période de référence, cependant de façon imprécise. A 3 ans, l'horloge peut produire des intervalles différents de sa période de référence à partir d'une accélération comprise entre 15 et 20%.

3 Développement des capacités de production d'intervalles lents entre 1 & 4 ans : Influence de stimulations lentes

Les objectifs de cette étude sont les mêmes que ceux de la précédente étude. Le premier est donc de compléter les données visant à déterminer le TMS du jeune enfant. Le second est aussi de déterminer le seuil de variation à partir duquel les enfants sont capables de ralentir leur rythme de frappe. En effet, dans la précédente étude, il a été souligné que l'accélération était dans la majorité des études la plus facile à traiter, en particulier chez les enfants. A l'inverse, le ralentissement d'un comportement, c'est-à-dire son inhibition, apparaît beaucoup plus difficile, voir impossible. Ainsi, les enfants de 2,5 ans n'arrivent pas à ralentir significativement leurs frappes en présence d'une stimulation externe lente (600 et 800 ms) (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Les bébés ne discriminent pas un tempo plus lent de 15% que le tempo auquel ils sont habitués (Baruch & Drake, 1997). Et les bébés se mettent à pleurer lorsque leurs parents ralentissent les interactions sociales avec leurs enfants (Condon & Sanders, 1974). D'une façon générale, il est admis qu'il est difficile d'inhiber un comportement, tout particulièrement chez l'enfant.

Cependant, la quantité des données sur le traitement des durées lentes (plus lentes qu'une référence) est faible, et d'autres données viennent à l'encontre des résultats mentionnés ci-dessus. En effet, les enfants de 4 ans sont capables de ralentir leur rythme de frappes spontané de façon significative (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). De plus, les nourrissons sont capables d'apprendre à ralentir leur rythme de succion (Provasi, 1988). Cependant, il est apparu dans cette étude que pour ces nourrissons, ralentir leur rythme de succion était plus difficile que de l'accélérer et ils n'y parvenaient qu'au cours des derniers essais.

L'ensemble de ces résultats contradictoires ne peuvent pas être expliqués uniquement par les différences d'âge ou les protocoles expérimentaux. Ils suggèrent que malgré tout, le traitement des durées relativement lentes est possible chez le jeune enfant. Ce facteur mérite donc d'être pris en compte et exploré tout autre facteur de variation étant égal par ailleurs. Nous avons donc choisi de réaliser la même expérience que précédemment mais en inversant le sens de variation (ralentissement des stimulations au lieu d'une accélération).

Puisque nous supposons que les enfants de ces âges sont capables de traiter aussi des durées plus lentes, il doit être possible aussi de déterminer un seuil de sensibilité, tout comme pour les stimulations relativement rapides. De la même façon nous souhaitons vérifier l'impact que

peuvent avoir des stimulations externes lentes cette fois sur le fonctionnement de l'horloge et en particulier sur le TMS.

Comme il l'a été mentionné plus haut, nous avons donc choisi de réaliser la même expérience, mais cette fois avec des stimulations lentes. Les hypothèses de travail sont donc sensiblement les mêmes :

1. Le TMS peut être déterminé chez les enfants de 1 à 4 ans et il se situe autour de 470 ms.
2. Les enfants sont capables d'interagir avec une stimulation extérieure plus lente que leur TMS.
3. Il existe un seuil à partir duquel les enfants sont capables de ralentir leur rythme de frappes spontané. Ce seuil doit se situer autour de 15%.
4. Le traitement et en particulier la production temporelle de séquences plus lentes induit un ralentissement du TMS de l'enfant.
5. Il existe une mise en place progressive entre ces âges des processus nécessaires à la réalisation de ces tâches.

3.1 Méthode

Sujets

Les sujets sont les mêmes que ceux de l'étude expérimentale précédente.

Matériel

Le matériel est le même que celui de l'étude expérimentale précédente.

Procédure

Cette étude expérimentale s'est déroulée au cours d'une séance distincte (appelée séance R) de celle de l'étude précédente (appelée séance A).

Chaque enfant a participé aux 2 séances, ayant eu lieu des jours différents. Le délai moyen entre les 2 séances était de 2 jours (délai moyen : 2,54 jours, SD = 2.4, intervalle : 0-13 jours). L'ordre de passage pour les 2 séances (A et R) a été contrebalancé entre les sujets.

La seule différence entre les 2 séances a concerné la phase de synchronisation : pour la séance R les stimulations externes utilisées pour la synchronisation étaient de plus en plus lentes. Les mêmes valeurs de variations ont été utilisées. Les enfants devaient donc ralentir leur rythme de frappes spontané de 0 à 50% (par incrément de 5%) pour obtenir un renforcement.

Le tableau suivant résume le déroulement de la séance R (Tableau 7)

PHASE		CONDITIONS		
		Nombre de frappes enregistrées	Modalité du Renforcement : Frappes renforcées	Variations par rapport au TMS initial phase de synchronisation
Démonstration : TMS expérimentateur	Essai	20 frappes	Toutes	
TMS1	Essai 1	30 frappes	Toutes	
	Essai 2	30 frappes	Toutes	
Calcul du TMS de l'enfant en fonction de l'essai 2				
Synchronisation	Essai 1	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS + 0%
	Essai 2	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS + 5%
	Essai 3	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS + 10%
	Essai 4	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS + 15%
	Essai 5	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS + 20%
	Essai 6	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS + 25%
	Essai 7	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS + 30%
	Essai 8	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS + 35%
	Essai 9	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS + 40%
	Essai 10	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS + 45%
	Essai 11	30 frappes	Frappes synchronisées	TMS + 50%
TMS2	Essai 1	30 frappes	Toutes	
	Essai 2	30 frappes	Toutes	

**Tableau 7 :
Synthèse des caractéristiques de chacune des 3 phases du protocole expérimental**

3.2 Résultats

Les mêmes analyses statistiques (que pour la séance A) ont été conduites pour cette séance où les stimulations de la phase de synchronisation ralentissaient au cours des 11 essais par rapport au TMS initial du sujet (TMS1).

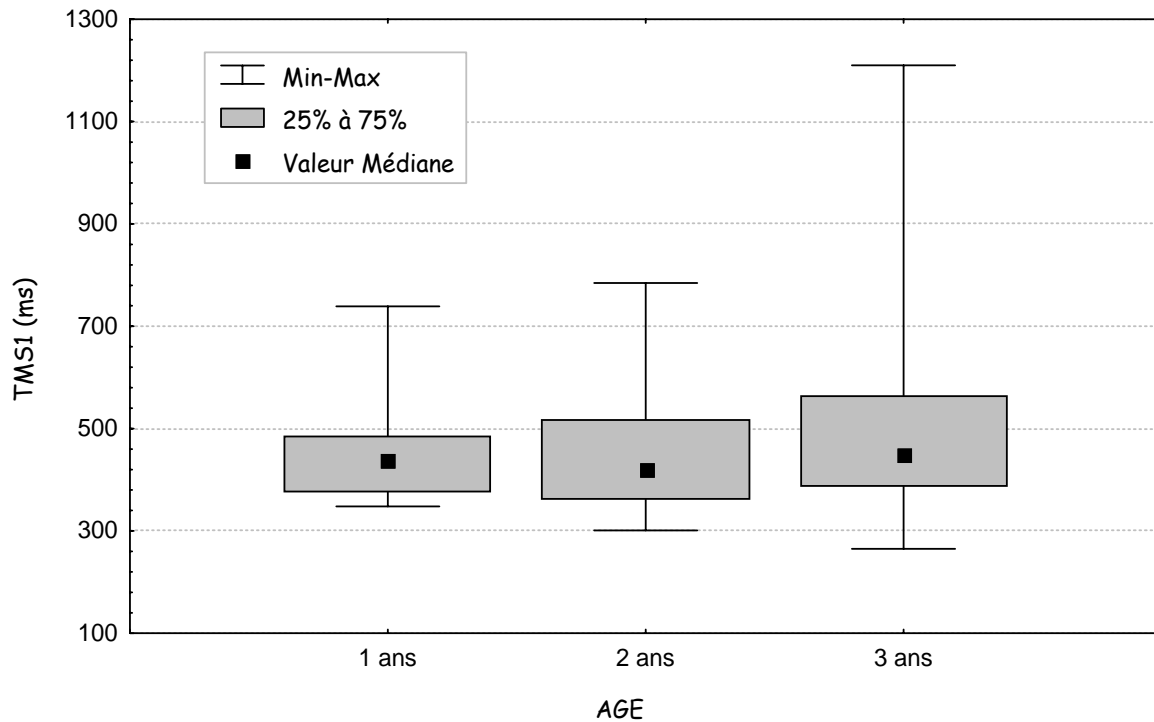
3.2.1 Absence d'influence de la démonstration

Cette première analyse est indispensable pour prouver que le TMS initial des enfants n'a pas été influencé par le TMS de l'expérimentateur lors de la démonstration. La comparaison entre le TMS de l'expérimentateur (moyenne = 776 ms, SD = 163), entendu et observé par l'enfant pendant la démonstration, et celui produit ensuite par l'enfant (moyenne = 468 ms, SD = 139) par un test T de Student (pour des échantillons appariés) démontre que le TMS produit par l'enfant est significativement plus rapide que celui produit par l'expérimentateur [$t = 13,05$, $dl = 79$, $p < .0001$]. De la même manière, la variabilité de l'expérimentateur (moyenne = 12,87, SD = 6.24) est significativement inférieure à celle de l'enfant (moyenne = 22,15, SD = 16.42) [$t = -4,83$, $dl = 79$, $p < .0001$]. **Le rythme de frappe de l'enfant n'est donc pas influencé par celui de l'expérimentateur.**

3.2.2 Analyse du TMS et de sa variabilité

Une ANOVA portant sur les médianes des IRI au cours du dernier essai de TMS1 ($S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{TMS}_1$) ne révèle aucun effet de sexe et de l'âge. Au cours de cette séance, les données ne permettent donc pas de conclure que le TMS varie en fonction de l'âge (Tableau 8).

Séance R : TMS initial en fonction de l'âge



	Nombre d'IRI		Médiane	Variabilité
1 an	557	Moyenne	452,05	30,37
		SD	98,23	20,90
2 ans	691	Moyenne	454,17	21,75
		SD	121,46	16,65
3 ans	1040	Moyenne	486,18	17,86
		SD	167,18	11,46

Tableau 8 :
Caractéristiques du TMS en fonction de l'âge des enfants

La même analyse portant cette fois sur les données de variabilité (ANOVA : $S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{TMS}_1$) révèle un effet principal de l'âge [$F(2,74) = 3,86, p < .05$] : **la variabilité du TMS diminue avec l'âge**. Statistiquement, elle diminue significativement entre le groupe des enfants de 1 an et ceux de 3 ans (test post-hoc de Tukey : $p < .05$).

L'étude de **la variabilité inter-individuelle** (comparaison de la variance, table de Snédécour) montre qu'elle **augmente avec l'âge** de façon significative entre 1 an et 3 ans ($F_{35,25} = 2,90$; $p < .01$).

3.2.3 Etude de la médiane réduite des IRI

Comparaison des 3 phases

Les 11 ANOVA (<Age3 x Sexe2> x Phase3) portant sur les médianes réduites des IRI des phases de TMS1, synchronisation (essais analysés un par un) et de TMS2 ne révèlent que très peu d'effet principaux et aucune interaction (Tableau 9).

Effets et Interaction	Phase	Sexe
TMS1 / RS0 / TMS2	F (2, 136) = 11,63 ; p<.0001	NS
TMS1 / RS5 / TMS2	F (2, 132) = 5,87 ; p<.005	F (1, 66) = 4,01 ; p<.0493
TMS1 / RS10 / TMS2	F (2, 136) = 5,64 ; p<.005	NS
TMS1 / RS15 / TMS2	NS	NS
TMS1 / RS20 / TMS2	NS	NS
TMS1 / RS25 / TMS2	NS	NS
TMS1 / RS30 / TMS2	NS	NS
TMS1 / RS35 / TMS2	NS	NS
TMS1 / RS40 / TMS2	NS	NS
TMS1 / RS45 / TMS2	NS	NS
TMS1 / RS50 / TMS2	NS	NS

Tableau 9 :
Effets significatifs révélés par la comparaison des médianes des IRI des 3 phases expérimentales

Ces analyses montrent qu'il existe un effet de la phase pour les 3 premiers essais de synchronisation. **Au-delà de 10% de ralentissement par rapport au TMS initial, les IRI restent comparables au cours des 3 phases quel que soit l'essai de synchronisation.** Le graphique suivant illustre les médianes des IRI au cours des essais (Figure 22).

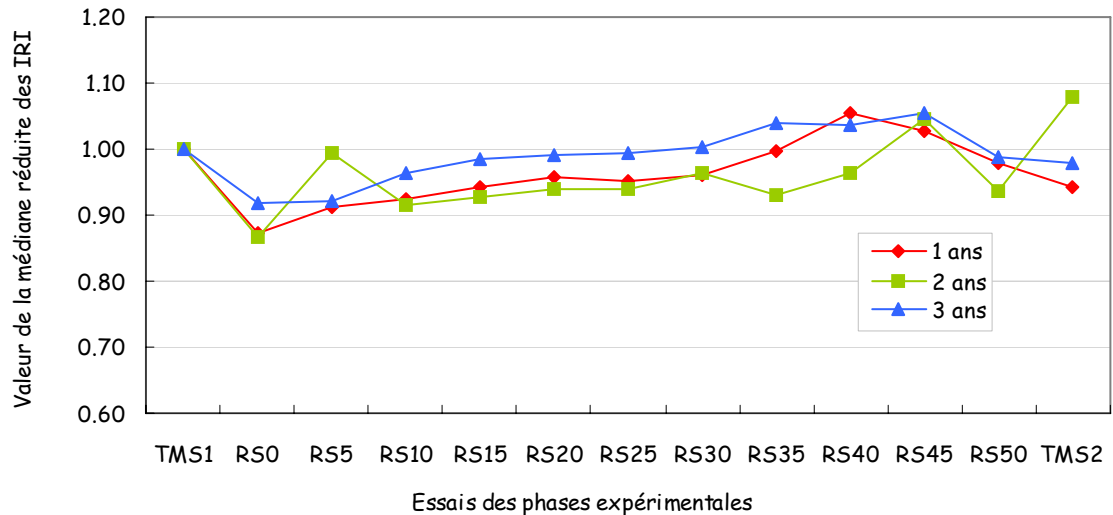


Figure 22 :
Comparaison des médianes réduites des IRI
en fonction des essais des 3 phases expérimentales

Les comparaisons respectives des phases de TMS (ANOVA : $S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Phase}_3$) avec les 3 premiers essais de synchronisation (RS0, RS5 et RS10), montre que **les enfants accélèrent** (par rapport à leur TMS initial) **leurs frappes pendant ces 3 essais de synchronisation** (respectivement : $p < .0001$, $p < .005$ et $p < .005$) puis ils reviennent à leur rythme de frappe initial après la phase de synchronisation (les médianes des phases de TMS1 et de TMS2 ne sont pas significativement différentes)¹¹. Ces résultats peuvent être visualisés graphiquement au moyen des distributions des IRI de l'ensemble des enfants (*voir graphiques IRI sous Excel*)

Quant à l'effet spécifique du sexe (comparaison des 3 phases tenant compte de l'essai à 5% de ralentissement), il montre que, **pour cet essai, les filles accélèrent plus leurs frappes que les garçons** (test post-hoc de Tukey : $p < .05$). Cet effet est marginal parce qu'il n'est pas retrouvé pour les autres essais de synchronisation.

Globalement, les enfants ont accéléré leurs frappes par rapport à leur rythme spontané pendant les 3 premiers essais. **Au cours de ces 3 essais, le ralentissement de la stimulation était relativement faible** (il n'excédait pas 10% de la valeur du TMS de l'enfant). Pour des ralentissements plus importants, les enfants ont conservé leur rythme de frappe initial.

¹¹ Les médianes des IRI réduites des essais RS0, RS5 et RS10 sont chacune significativement plus rapides que celles des essais de TMS2 (respectivement : $p < .0005$, $p < .05$ et $p < .05$).

Comparaison des essais de synchronisation

Les médianes des IRI sont différentes en fonction du décalage requis (ANOVA : $S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Essai}_{11}$) : il existe un effet principal des essais [$F(10,470) = 3,29$, $p < .0005$] : **les IRI ralentissent au cours des essais** (Figure 23). De plus, l'analyse révèle une interaction triple entre l'âge et le sexe des enfants et les essais [$F(20,470) = 1,90$, $p < .05$]. Cette triple interaction, sous-entend simplement que pour certains essais et pour certains âges, les filles frappent différemment des garçons.

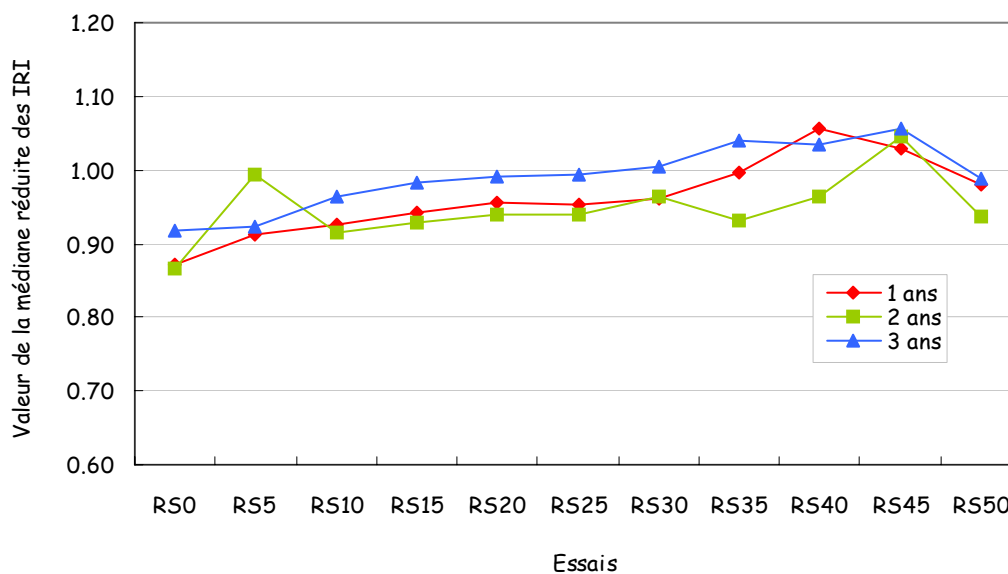


Figure 23 :
Comparaison de la médiane réduite des IRI
en fonction des essais de la phase de synchronisation

Concernant l'effet de l'importance du ralentissement, une analyse post-hoc de Tukey a permis de comparer les différents essais entre eux, tout âge confondu.

Un ralentissement des ISI de 0 à 15% ne modifie pas de façon significative la médiane des IRI. **A partir d'une variation de 20%, les frappes ralentissent significativement par rapport au 1^{er} essai de synchronisation** (i.e. 0% de ralentissement par rapport au TMS1) (respectivement de 20 à 25% : $p < .05$; pour 30% : $p < .005$; pour 35% : $p < .0005$; de 40 à 45% : $p < .0001$ et pour 50% de variation : $p < .005$). Les enfants de 1 à 3 ans sont donc capables de ralentir parallèlement au ralentissement du stimulus auditif entendu. Cette comparaison avec l'essai à 0% est de loin la plus informative pour déterminer à partir de quelle variation d'ISI les enfants ralentissent leurs frappes : la comparaison doit se faire par

rapport à une condition de référence qui correspond à une stimulation externe de même tempo que leur propre TMS.

Pour tous les autres essais, lorsqu'ils sont comparés 2 à 2, leurs médianes ne sont statistiquement pas différentes. Une exception existe pour les essais correspondants aux variations de 40 et 45%. Pour l'essai à un ralentissement de 40%, le rythme de frappes enregistré est plus lent que celui mesuré pour un ralentissement de 0 à 10% (respectivement $p < .0001$, $p < .05$ et $p < .01$). La médiane mesurée à 45% est, elle, plus lente que celles de 0 à 25% (respectivement $p < .0001$, $p < .005$, $p < .0005$, $p < .01$, $p < .05$ et $p < .05$). Ces résultats suggèrent que **le ralentissement des frappes le plus important quantitativement et le plus significatif, tout âge confondu, est observé pour une variation de 40 et de 45%**.

3.2.4 Etude de la variabilité intra-individuelle

Comparaison des 3 phases

Pour chaque essai de la phase de synchronisation, la variabilité des 3 phases a été comparée (ANOVA : $S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Phase}_3$). Les effets principaux et interactions sont résumés dans le tableau suivant (Tableau 10) :

Effets et Interaction	Age	Phase	Age/Phase
TMS1 / RS0 / TMS2	F(2,68)=7.01; p<.005		
TMS1 / RS5 / TMS2	F(2,66)=3.90; p<.05		F(4,132)=3.02; p<.05
TMS1 / RS10 / TMS2	F(2,68)=4.77; p<.05		
TMS1 / RS15 / TMS2	F(2,66)=5.07; p<.01		
TMS1 / RS20 / TMS2	F(2,68)=4.93; p<.011	F(2,136)=3.88; p<.05	
TMS1 / RS25 / TMS2			
TMS1 / RS30 / TMS2			
TMS1 / RS35 / TMS2	F(2,65)=4.69; p<.05		
TMS1 / RS40 / TMS2	F(2,67)=4.88; p<.05		
TMS1 / RS45 / TMS2	F(2,64)=4.26; p<.05	F(2,128)=5.77; p<.005	
TMS1 / RS50 / TMS2	F(2,49)=5.16; p<.01	F(2,98)=3.86; p<.05	

Tableau 10 :
Effets significatifs révélés par la comparaison de la variabilité des IRI des 3 phases expérimentales

La variabilité au cours de cette séance est donc très dépendante de l'âge des sujets : **la variabilité diminue avec l'âge**. Dans le détail, les résultats de la comparaison de la variabilité âge par âge sont synthétisés dans le tableau suivant (Tableau 11).

	1 an vs. 2 ans	1 an vs. 3 ans	2 ans vs. 3 ans
TMS1 / RS0 / TMS2	p<.05	p<.005	
TMS1 / RS5 / TMS2		p<.05	
TMS1 / RS10 / TMS2		p<.01	
TMS1 / RS15 / TMS2	p<.05	p<.01	
TMS1 / RS20 / TMS2		p<.01	
TMS1 / RS25 / TMS2			
TMS1 / RS30 / TMS2			
TMS1 / RS35 / TMS2		p<.01	
TMS1 / RS40 / TMS2		p<.01	
TMS1 / RS45 / TMS2	p<.05	p<.05	
TMS1 / RS50 / TMS2			p<.05

Tableau 11 :
Différences significatives entre les groupes d'âge révélées par l'étude de la variabilité au cours des 3 phases expérimentales

Même si peu de résultats sont significatifs, ils confirment la tendance de la diminution de la variabilité avec l'âge, particulièrement nette entre 1 et 3 ans. Le graphique suivant illustre la variabilité par âge au cours des 3 phases et en fonction des essais de la phase de synchronisation (Figure 24).

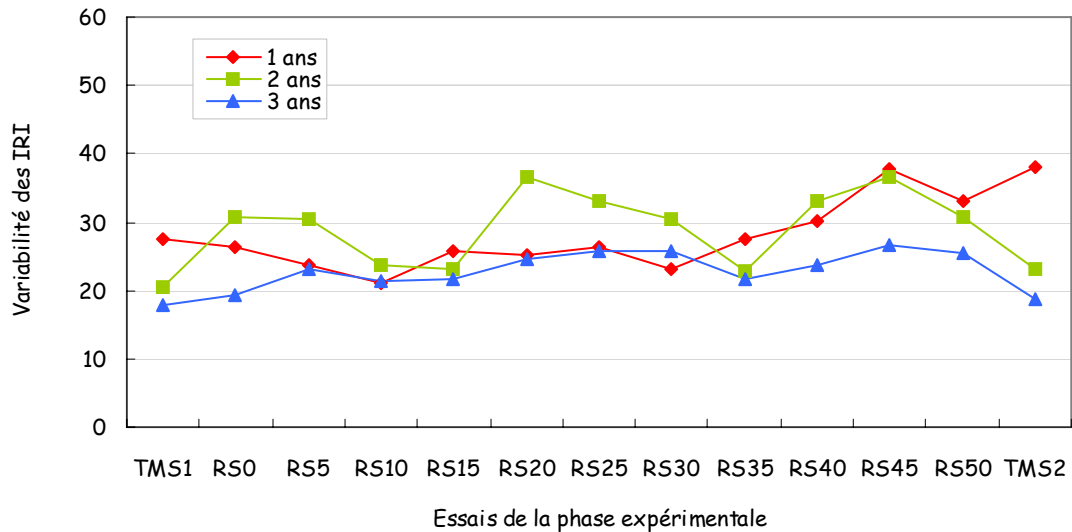


Figure 24 :
Comparaison de la variabilité des IRI en fonction des essais des 3 phases expérimentales

Etant donné l'importance du facteur âge, les mêmes analyses (pour chacun des 11 essais de synchronisation) ont été conduites âge par âge (ANOVA : S<Sexe₂> x Phase₃). Les résultats ne révèlent **aucune différence significative de la variabilité entre les 3 phases chez les enfants de 1 et 2 ans. A 3 ans, il existe un effet de la phase pour certains essais de synchronisation (Tableau 12) : la variabilité augmente pendant la phase de synchronisation, en particulier à partir de 20% de ralentissement.**

3 ans	Effet de la phase		
	Résultats ANOVA	TMS1 vs. Synchro	Synchro vs. TMS2
TMS1 / RS0 / TMS2			
TMS1 / RS5 / TMS2			
TMS1 / RS10 / TMS2			
TMS1 / RS15 / TMS2			
TMS1 / RS20 / TMS2	F(2,64)=4.05; p<.0221	p<.05	
TMS1 / RS25 / TMS2	F(2,64)=4.35; p<.0170	p<.05	p<.05
TMS1 / RS30 / TMS2	F(2,64)=4.20; p<.0193	p<.05	
TMS1 / RS35 / TMS2			
TMS1 / RS40 / TMS2			
TMS1 / RS45 / TMS2	F(2,62)=5.17; p<.0084	p<.05	p<.05
TMS1 / RS50 / TMS2	F(2,64)=4.00; p<.0231	p<.05	

Tableau 12 :
Effets significatifs à 3 ans
révélés par la comparaison de la variabilité des 3 phases expérimentales

En résumé, la tendance des résultats (les résultats significatifs ne concernent jamais tous les essais de la phase de synchronisation) montre que la variabilité diminue avec l'âge, indépendamment de la phase. A 3 ans, la tendance est que pendant la phase de synchronisation, la variabilité augmente par rapport à celle de la phase de TMS1 mais seulement à partir d'un ralentissement des stimulations de 20%.

Comparaison des essais de synchronisation

L'étude de la variabilité au cours des essais de synchronisation de la séance R ne révèle aucun effet principal ni aucune interaction entre les facteurs et les variables (ANOVA : $S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Essai}_{11}$) (Figure 25).

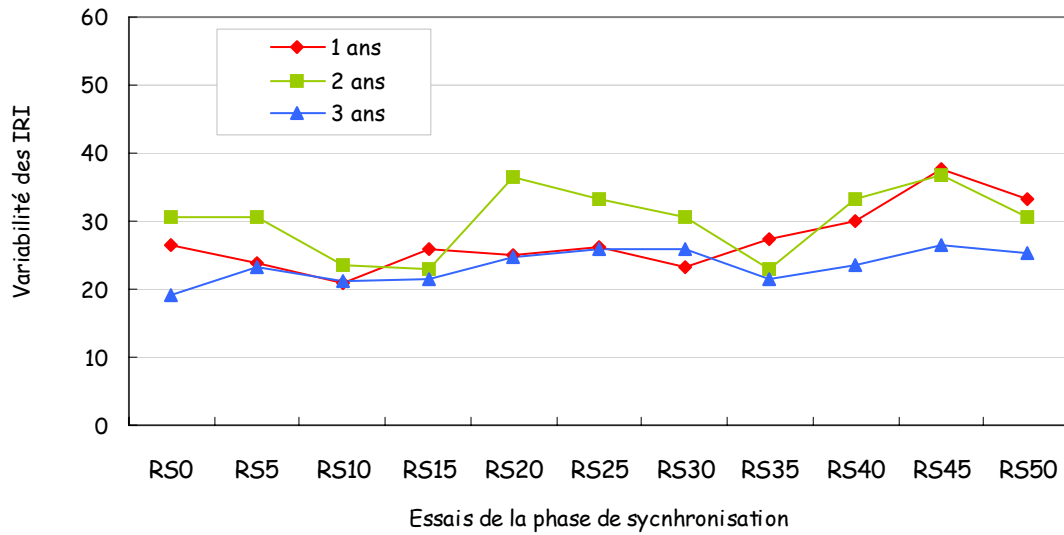


Figure 25 :
Comparaison de la variabilité des IRI en fonction des essais de la phase de synchronisation

3.2.5 Analyse du renforcement

Une ANOVA ($S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Essai}_{11}$) portant sur le **pourcentage de frappes renforcées** à chaque essai montre une **augmentation avec l'âge** [$F(2,47) = 19,54, p < .0001$] : une fois encore, les enfants de 3 ans se distinguent ; ils ont un taux de renforcement significativement plus élevé que celui des enfants de 1 an (test post-hoc de Tukey : $p < .0005$). Le renforcement à 1 an est équivalent à celui des enfants de 2 ans. De même, il est comparable entre les enfants de 2 ans et de 3 ans (Figure 26).

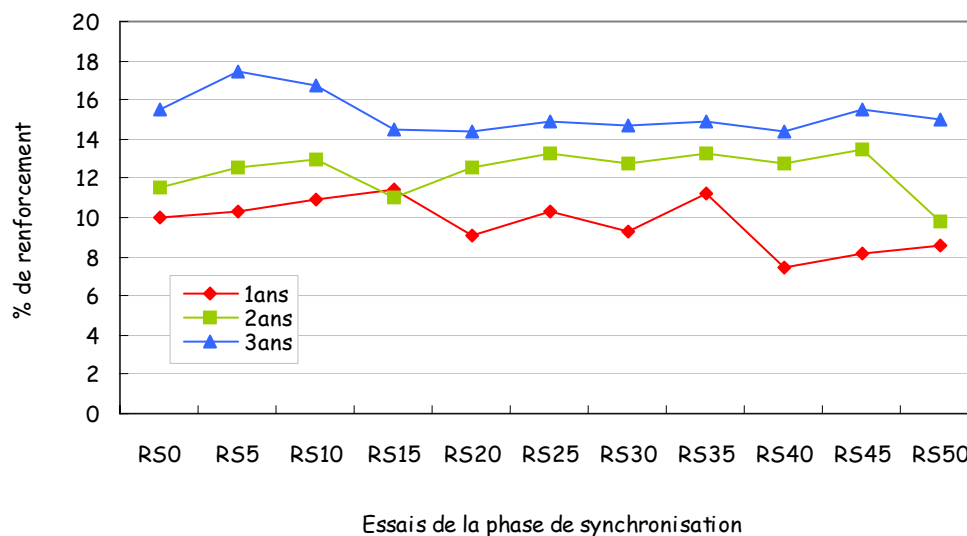


Figure 26 :
Pourcentage de frappes renforcées en fonction des essais de la phase de synchronisation

A **1 an**, il existe un effet des essais (ANOVA $S < \text{Sexe}_2 > \times \text{Essai}_{11}$) [$F(10,130) = 1,94, p < .05$], bien que comparé 2 à 2, les essais ne soient pas différents (test post-hoc de Tukey). La tendance est que les derniers essais sont moins renforcés que les premiers (Figure 26).

A **2 et 3 ans**, aucun effet n'est décelé par cette même analyse : le pourcentage de renforcement n'évolue pas en fonction de la stimulation

En ce qui concerne le **pourcentage de frappes anticipées**, seul un effet de l'âge existe (ANOVA : $S\langle \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 \rangle \times \text{Essai}_{11}$) [$F(2,47) = 14,20, p < .0001$] : **à 3 ans les enfants anticipent significativement mieux que les enfants de 1 an** (test post-hoc de Tukey, $p < .0005$) (Figure 27).

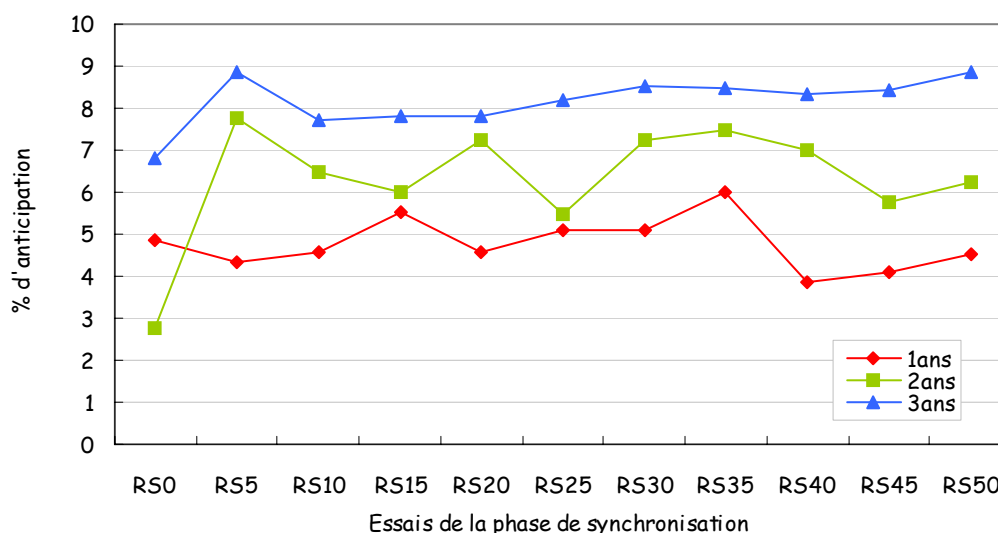


Figure 27 :
Pourcentage de frappes anticipées en fonction des essais de la phase de synchronisation

L'analyse âge par âge (ANOVA : $S\langle \text{Sexe}_2 \rangle \times \text{Essai}_{11}$) ne révèle aucun effet spécifique à 1 an. Il en est de même à 3 ans. A 2 ans, par contre, l'ANOVA révèle un effet des essais [$F(10,20) = 2,41, p < .05$] lié à une plus faible anticipation à l'essai à 0% qu'à l'essai à 5% et qu'à 35% (test post-hoc de Tukey, respectivement : $ps < .05$).

L'ensemble de ces résultats est illustré par la distribution des SRI normalisés par rapport à l'ISI de chaque essai et de chaque enfant (*voir graphiques SRI sous Excel*).

3.3 Discussion

Résumé des résultats

Au cours de cette séance, l'enfant pendant la phase de synchronisation interagit avec des stimulations auditives de plus en plus lente par rapport à son rythme de frappe spontané.

La phase de TMS1 a permis de collecter d'autres valeurs de TMS. Les médianes ne varient pas significativement avec l'âge (bien qu'elles augmentent de 452 à 486 ms). A l'inverse, la variabilité, proche en valeur aussi d'un âge à l'autre, diminue significativement avec l'âge. La variabilité inter-individuelle, quant à elle, augmente avec l'âge.

La comparaison des 3 phases expérimentales montre que globalement, sur les 3 phases, la variabilité des frappes augmente avec l'âge des enfants.

Jusqu'à 10% de ralentissement, les résultats montrent que quel que soit leur âge, les enfants vont accélérer leurs frappes lorsque les stimulations auditives sont légèrement plus lentes (c'est-à-dire de 0 à 10% de ralentissement) que leur TMS initial. Parallèlement, leurs frappes sont aussi stables que pendant la phase de TMS1 (et aussi de TMS2).

A partir d'un ralentissement de 20%, les enfants conservent un rythme de frappes comparables à celui de la phase de TMS1 et celui de la phase de TMS2. Les enfants frappent moins régulièrement lors des essais à 20%, 45% et 50% que pendant les phases de TMS. A 1 et 2 ans, les enfants conservent la même variabilité pendant cette phase que lors des phases de TMS. **Les enfants de 3 ans, par contre, deviennent, à partir de 20% de ralentissement, plus variables pendant la phase de synchronisation que pendant les phases de TMS.**

Pendant la phase de synchronisation, le rythme de frappes des enfants, quel que soit leur âge ralentit par rapport au premier essai où le ralentissement est nul. Le ralentissement est particulièrement important lorsque les stimulations sont décalées de 40% et surtout de 45%. Par contre, la variabilité reste équivalente d'un essai à l'autre, quel que soit l'âge des enfants.

Même si d'une façon globale, les enfants ne ralentissent pas leurs frappes au-delà de la limite de leur TMS initial, les enfants semblent sensibles aux stimulations plus lentes que leur TMS. une faible variation les conduit à accélérer leur TMS, alors qu'au-dessus de 20% de variation ils ralentissent leurs frappes. Ce ralentissement est surtout sensible pour une variation de 45%. Cependant les résultats indiquent qu'à 3 ans, l'interaction influence non seulement la vitesse et mais aussi la variabilité de leurs frappes dès 20% de variation.

Le pourcentage de frappes renforcées ne révèle aucune tendance particulière, même si à 1 an, il existe un effet lié à la variation de vitesse des stimulations. Il en va de même pour les frappes anticipées. Cette fois, c'est à 2 ans qu'il existe un effet des essais. Il faut cependant

noter que dans ce contexte de ralentissement des ISI au cours des essais, obtenir un renforcement est plus difficile. En effet, l'essentiel du délai de la fenêtre temporelle est composé des 100 ms correspondant à la durée du son (et 15% de l'ISI pour permettre l'anticipation). Plus les ISI augmentent, plus la fenêtre temporelle représente une faible proportion de l'intervalle. En conséquence, la probabilité d'obtenir un renforcement diminue (en considérant que les frappes soient aléatoires). Ces éléments sont à prendre en compte lors de l'interprétation des performances de renforcement.

Valeur du TMS

Les mêmes réflexions que dans l'expérience précédente (séance A) peuvent être faites. A savoir : **le TMS n'évolue pas entre 1 et 3 ans**. Les valeurs obtenues sont inférieures à celles rapportées en moyenne pour l'adulte. Elles sont du même ordre de grandeur que celles recueillies par d'autres études expérimentales, bien que légèrement supérieures.

Il sera intéressant de regrouper les données des 2 séances afin d'obtenir des valeurs consistantes (plus grand nombre d'IRI) ; celles-ci seront comparées aux données de la littérature dans le paragraphe suivant, concernant la comparaison des 2 séances.

Influence de stimulations lentes

Le premier résultat remarquable est que tous les enfants répondent de la même façon : par rapport à leur TMS, leur rythme de frappe s'accélère puis redevient comparable à celui-ci, y compris pendant la phase de TMS2. Par contre, la variabilité des frappes diminue globalement avec l'âge : la production des frappes est de mieux en mieux maîtrisée. **Ce résultat confirme l'évolution avec l'âge des capacités de traitement temporel.**

Un autre résultat vient confirmer cette hypothèse et apporte une information supplémentaire : le rythme de frappe des enfants de 1 et 2 ans n'est pas perturbé d'une phase à l'autre. Les stimulations auditives ne semblent pas interférer avec le mécanisme de traitement des enfants de cet âge. A 3 ans, par contre, la variabilité augmente pendant la phase de synchronisation par rapport à la phase de TMS1, mais uniquement à partir de 20% de ralentissement. Ce résultat suggère donc qu'à partir d'un ralentissement suffisamment important, les stimulations auditives interfèrent significativement avec le mécanisme de traitement temporel. Du point de vue développemental, **il existe une étape de maturation du système entre 2 et 3 ans pour le traitement des durées plus lentes**. D'autre part, à cet âge s'est mis en place un seuil, situé entre 15 et 20%, au-delà duquel un traitement significatif devient effectif.

Ce seuil est d'ailleurs sous-jacent lorsque les essais de la phase de synchronisation sont analysés. Mais, au préalable, il est nécessaire de discuter un résultat particulier : le ralentissement des stimulations jusqu'à un seuil de 10% provoque une légère accélération de la vitesse de frappe par rapport à leur TMS (en particulier lorsque les ISI sont égaux au TMS de l'enfant). Cette observation a déjà été décrite chez les bébés, qui en présence de stimulations plus lentes que leur rythme spontané, accélèrent leur rythme de succion (Provasi & Marks, 1994).

Il semble donc que des stimulations de même rythme que le TMS de l'enfant aient eu un effet d'entraînement sur le rythme de frappe, à l'origine de l'accélération des IRI. Mais cette analyse est discutable. En effet, les médianes des IRI ralentissent dès l'essai suivant à 5% de variation (même si elles demeurent plus rapides que le TMS initial), suggérant que cette accélération n'est liée qu'à l'essai à 0%. D'autre part, il faut noter que, parallèlement, la variabilité reste stable au cours de ces premiers essais, suggérant que le système d'horloge n'est pas perturbé par ces stimulations lentes. Cette hypothèse est renforcée par le fait que cette accélération est relevée en particulier pour 0% de variation. Cet essai doit donc être comparable à celui de la séance A à 0% de variation. Or, pour ce dernier, cette accélération n'a pas été observée. Il sera intéressant de comparer statistiquement ces 2 essais afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle une stimulation externe induise une accélération des réponses. Cette analyse sera réalisée au paragraphe suivant.

Il apparaît donc que pour l'analyse des essais de la phase de synchronisation, il est nécessaire de prendre comme référence l'essai de synchronisation avec le propre TMS de l'enfant (soit 0% de variation). Dans ce cas, les 4 premiers essais de la phase de synchronisation (0 à 15%) ne diffèrent pas significativement entre eux. **Sous l'influence de stimulations externes jusqu'à 15% plus lentes que leur TMS, les enfants ne modifient pas leur rythme de frappes, quel que soit leur âge** : ces durées sont traitées de la même manière et ne sont probablement pas perçues comme différentes.

A partir de 20% de ralentissement, les frappes des enfants se ralentissent significativement par rapport au premier essai. La tendance du ralentissement est nette, en particulier pour les essais à 40 et 45% (notamment l'essai à 45% les IRI sont significativement plus lents que ceux des essais de 0 à 20% de ralentissement, donc au delà de la limite de l'effet de l'accélération des premiers essais). Cette modification du rythme est

confirmée chez les enfants de 3 ans dont la variabilité des frappes tend à augmenter à partir de ce seuil de 20%.

Un autre élément doit être mentionné : malgré le ralentissement relatif du rythme de frappes des enfants, celui-ci ne devient **jamais plus lent que leur TMS initial** (même si en moyenne, les IRI sont supérieurs à 1, la comparaison des 3 phases de cette expérience ne montre pas de différences significatives). Ce résultat sous-entend que jusqu'à 3 ans, les enfants sont incapables d'inhiber des frappes, par rapport à leur comportement spontané (TMS). Pourtant, dans l'étude de Provasi & Bobin-Bègue (2003), les enfants de 2,5 et 4 ans parviennent à ralentir significativement leurs IRI par rapport à leur TMS lorsque les stimulations externes sont à 600 ms (soit un tempo 28% plus lent que le TMS moyen à ces âges). Cette différence de résultats peut être imputée à la différence de protocole. En effet, nos variations sont très progressives, à l'inverse de celles du protocole de Provasi & Bobin-Bègue. Si des seuils d'au moins 20% de différences sont nécessaires pour modifier le traitement, alors notre protocole doit minimiser les capacités de traitement par ces variations progressives. **On peut donc confirmer l'hypothèse selon laquelle les enfants sont capables de traiter et de produire des durées plus lentes que leur TMS, à condition que celles-ci soient au moins entre 15 et 20% plus lentes.** Par contre, l'hypothèse sur la difficulté à inhiber des frappes reste valable dans la mesure où seule une partie du groupe des enfants de 4 ans (29%) de l'expérience de Provasi & Bobin-Bègue réussissent à frapper à un tempo de 800 ms (soit environ 70% plus lent que la moyenne du TMS à cet âge).

L'étude de **la phase de TMS2 montre qu'elle n'est pas différente de celle de TMS1**. Dans la mesure où les enfants ne ralentissent pas leur rythme de frappe au-delà de leur propre TMS, ce résultat n'est pas surprenant et ce d'autant plus que seul les enfants de 3 ans sont légèrement perturbés par ces stimulations plus lentes. Néanmoins, l'étude de Provasi & Bobin-Bègue a montré que le TMS pouvait être influencé par des stimulations externes plus lentes, mais seulement pour des enfants de 4 ans et lorsque la stimulation était de 800 ms.

Le dernier point à mentionner concerne **le renforcement des frappes**. Les enfants de 3 ans sont, comme pour la séance A, les plus renforcés. Les enfants les plus âgés réussissent donc à mieux gérer leur rythme de frappe, par rapport aux stimulations pour obtenir plus de renforcement. Il faut remarquer que, pour cette séance, l'obtention d'un renforcement est plus

difficile en probabilité (par rapport à des frappes aléatoires) : plus l'ISI augmentait, plus la proportion de la fenêtre de renforcement diminuait (15% de l'ISI + 100 ms).



En résumé, cette expérience **confirme l'absence d'évolution de la valeur du TMS** entre 1 et 4 ans. Par contre, celui-ci, et donc **la base de temps à sa source se stabilise entre ces âges**. Parallèlement, **la variabilité inter-individuelle augmente**, soulignant l'existence d'une phase d'évolution propre à chaque individu.

Par ailleurs, **les enfants sont capables d'interagir avec une stimulation externe plus lente, mais pas avant l'âge de 3 ans**. L'ensemble des données suggère que les enfants de 1 et 2 ans ne modifient pas leur rythme de frappe (par rapport à leur TMS) tout au long de la phase de synchronisation, ou tout au moins ne font que le récupérer, dans l'hypothèse où l'accélération à 0% de variation est validée. L'évolution des IRI serait due au protocole et ses variations progressives. A 3 ans, par contre, l'enfant deviendrait sensible à ces stimulations lentes, à partir d'un seuil situé entre 15 et 20%. Ces stimulations n'induiraient qu'une perturbation du rythme de frappes, sans le modifier. Il existe donc bien **une mise en place progressive du système de traitement entre 2 et 3 ans** (donc plus tardive que pour les stimulations rapides) et qui fait intervenir **un seuil de sensibilité du même ordre de grandeur** que celui trouvé et en perception et en production de durées plus rapides.

4 Comparaison entre les séances A et R

Un intérêt particulier de cette expérience est que les mêmes sujets ont participé aux 2 séances. L'influence relative des stimulations accélérées ou ralenties par rapport au TMS initial de l'enfant peut être ainsi comparée.

4.1 Absence d'effet de l'ordre de passage des séances

Le premier point consiste à vérifier que les phases de TMS1 sont équivalentes d'une séance à l'autre et qu'il n'existe pas d'effet lié à l'ordre de passage des séances (séance A suivie de la séance R vs. séance R suivie de la séance A). Une ANOVA, prenant en compte la séance à laquelle l'enfant a participé en premier ($S < \text{Ordre}_2 \times \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{TMS1}_2$) permet de comparer le TMS1 de la séance A et celui de la séance R. Les résultats ne révèlent aucun effet de ces facteurs. Les enfants ont des TMS1 comparables d'une séance à l'autre.

Une ANOVA ($S < \text{Ordre}_2 \times \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Phases}_3$) comparant les 3 phases entre elles pour chaque séance permet de confirmer l'indépendance des 2 séances. Cette analyse ne révèle aucun effet du facteur d'ordre sur les 3 phases expérimentales.

L'ordre de passage des séances n'intervient donc pas dans les résultats. **Les 2 séances sont donc comparables entre elles** et autorisent des analyses comparatives.

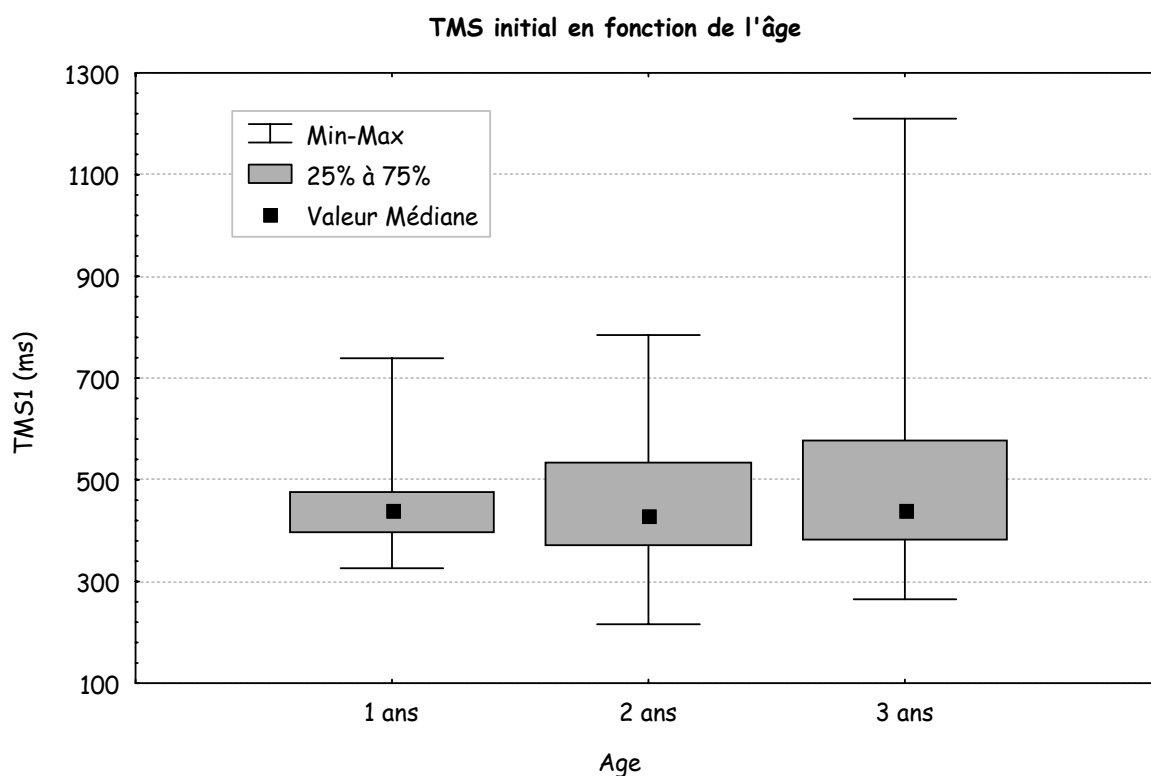
4.2 TMS1

Cette étude a permis de déterminer le TMS entre 1 et 3 ans : en effet, les séances étant comparables, les valeurs de chacune des 2 séances pour cette première phase ont été regroupées et analysées ensemble (les effectifs ont donc été doublés).

Une ANOVA réalisée sur le TMS1 et ayant pour variables indépendantes le sexe et l'âge des enfants ($< \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{TMS1}_1$) ne révèle aucun effet spécifique de ces facteurs. Les résultats indiquent que tous les enfants ont des valeurs de TMS sensiblement équivalentes (Figure 28). Ainsi, **cette étude ne permet pas de mettre en évidence une évolution du TMS entre 1 et 3 ans.**

L'étude de la variabilité intra-individuelle lors de la production du TMS (ANOVA : $S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{TMS1}_1$) révèle des variations en fonction de l'âge [$F(2,154) = 6,86, p < .005$] : **les enfants de 3 ans sont significativement moins variables lors de leurs frappes**

spontanées que les enfants de 1 et 2 ans (test post-hoc de Tukey, respectivement : $p < .005$ et $p < .05$). Par contre, les enfants de 1 et 2 ans ont une variabilité intra-individuelle équivalente.



	Nombre d'IRI		Médiane	Variabilité
1 an	1096	Moyenne	447,07	32,04
		SD	83,53	28,05
2 ans	1404	Moyenne	465,12	29,69
		SD	134,23	26,44
3 ans	2013	Moyenne	494,91	18,32
		SD	172,16	14,05
Moyenne Générale	4513	Moyenne	460,50	24,42
		SD	122,72	22,00

Figure 28 :
Caractéristiques du TMS entre 1 et 3 ans

Il doit être noté que **la variabilité inter-individuelle du TMS augmente avec l'âge**, et ce de façon significative (comparaison des variances, table de Snédécour) entre les enfants de 1 an et ceux de 2 ans ($F_{25, 22}=2,58$, $p < .05$) et entre ceux de 1 an et ceux de 3 ans ($F_{35, 22}=4,25$, $p < .01$).

4.3 Comparaison des TMS2

Une autre analyse concerne l'influence des stimulations sur le TMS2 (médiane des IRI réduite) en fonction du sens de leur variation (accélération ou ralentissement des stimulations). En effet, la séance A a modifié le TMS2 des enfants de 2 et 3 ans ; par contre la séance R n'a pas eu cet effet relativement au TMS initial. La comparaison des TMS2 (ANOVA : $S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Variation}_2$) révèle un effet de la variation [$F(1,64)=11,53$; $p < .005$] et une interaction âge/variation [$F(2,64)=4,48$; $p < .05$].

Le TMS2 de la séance A est plus rapide que celui de la séance R (test post-hoc de Tukey : $p < .001$). Cet effet de la variation est significatif chez les enfants de 2 et 3 ans (test post-hoc de Tukey ; respectivement $p < .05$ et $p < .0005$) et ne l'est pas à 1 an (Figure 29).

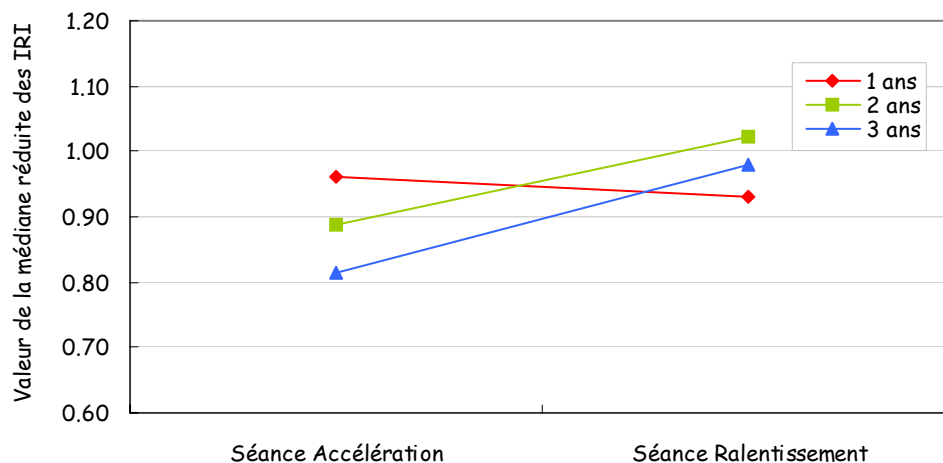


Figure 29 :
Comparaison de la phase de TMS2 en fonction de la séance

Cette analyse confirme que les stimulations de la séance A ont pour effet d'accélérer plus le TMS des enfants que lors de la séance R, tout au moins pour les enfants de 2 et 3 ans.

4.4 Comparaison pour les 2 séances du premier essai de synchronisation avec le TMS initial

Relativement à la question soulevée par la séance R, où il a été montré une accélération des frappes sous l'influence de stimulations extérieures du même rythme que le TMS de l'enfant (qui n'a pas été observé statistiquement lors de la séance A), nous avons voulu comparer ces 2 essais pour les 2 séances avec le TMS initial de l'enfant. L'objectif était de mettre en évidence

si cette accélération était due uniquement aux stimulations extérieures ou si elle n'avait pas de réalité biologique.

En conséquence, nous avons conduit une ANOVA ($S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \times \text{Variation}_2 \times \text{Phase}_3$). Plusieurs effets sont mis en évidence dont seuls seront mentionnés ceux d'intérêt, relativement à la question posée. Un effet de la phase [$F(2,128)=16,45$; $p < .0001$] montre que **pour les 2 séances, les enfants accélèrent tous leur rythme de frappe sous l'influence de stimulations extérieures du même rythme que leur TMS** (test post hoc de Tukey : $p < .0001$). Cette analyse met aussi en évidence une interaction entre la phase et la variation [$F(2,128)=11,78$; $p < .0001$] qui permet de vérifier (test post hoc de Tukey) que **les 2 essais à 0% de variation sont comparables d'une séance à l'autre**.

4.5 Comparaison de la médiane des IRI pendant la phase de synchronisation

La même analyse peut être conduite pour comparer les médianes des IRI (réduites) au cours des essais de synchronisation (ANOVA : $S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \text{Essai}_{11} \times \text{Variation}_2$) (Figure 30). Les résultats montrent plusieurs interactions.

La première est une **interaction entre l'âge et la variation** [$F(2,40)=5,07$; $p < .05$] : les enfants de 3 ans ont des IRI plus rapide au cours de la séance A que pendant la séance R ($p < .001$)¹².

L'interaction la plus intéressante est celle **entre les essais et le sens de la variation** [$F(10,400)=3,29$; $p < .0005$] (Figure 30).

¹² De plus cette analyse confirme qu'au cours de la séance A, les IRI des enfants de 3 ans sont significativement plus rapide que ceux des enfants de 1 an ($p < .01$).

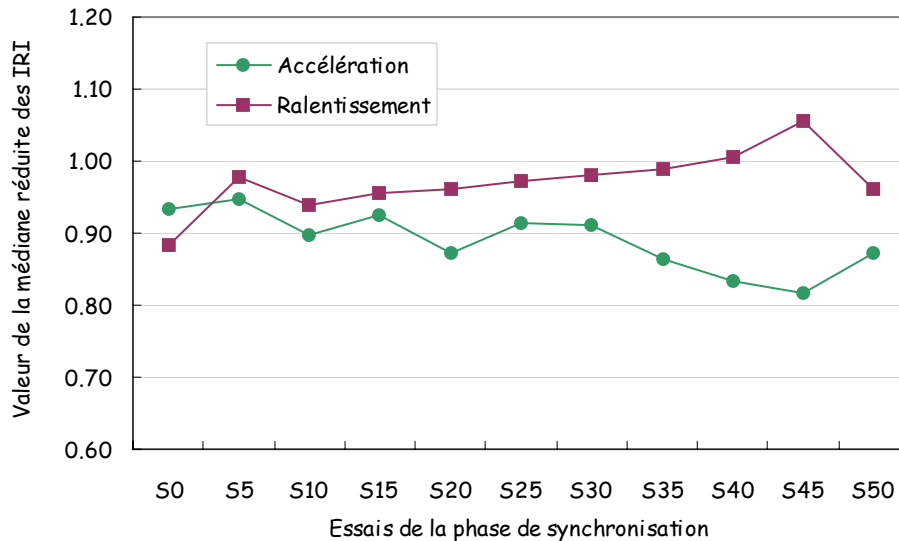


Figure 30 :
Comparaison de la médiane réduite des IRI des essais de la phase de synchronisation en fonction de la séance

Entre les 2 séances, les rythmes de frappes des enfants divergent significativement pour les essais de 35 à 45% de variation (test post-hoc de Tukey ; respectivement $p < .001$, $p < .0001$ et $p < .0001$) et redeviennent comparables à 50% de variation. En premier lieu, les 2 essais à 0% de variation sont comparables entre les 2 séances. Par ailleurs, entre 35 et 45% de variations, les enfants, tout âge confondu, ralentissent leurs frappes au cours de la séance R et les accélèrent au cours de la séance A, suffisamment pour que les 2 séances soient différentes. A noter qu'il existe aussi une interaction entre l'âge, le sexe et la variation [$F(20,400)=1,77$; $p < .05$] ainsi qu'une interaction entre tous les facteurs [$F(20,400)=1,78$; $p < .05$].

4.6 Comparaison de la variabilité au cours de la phase de synchronisation

Une comparaison de la variabilité au cours des essais de synchronisation (ANOVA : $S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \text{Essai}_{11} \times \text{Variation}_2$) met en évidence les effets de plusieurs facteurs :

1. un effet de la variation [$F(1,41)=13,14$; $p < .001$],
2. un effet des essais [$F(10,410)=2,41$; $p < .01$],
3. une interaction entre l'âge et la variation [$F(2,41)=4,65$; $p < .05$],
4. une interaction âge/essai [$F(20,410)=1,79$; $p < .05$],
5. une interaction variation/essai [$F(10,410)=1,99$; $p < .05$] et
6. une triple interaction âge/sexe/variation [$F(2,41)=7,76$; $p < .005$].

Dans le cadre de cette analyse, seuls les effets liés à la variation nous intéressent.

Globalement, les enfants ont des frappes moins variables pendant la séance A que pendant la séance R (effet de la variation). Plus précisément, les enfants de 2 ans sont significativement plus variables pendant la séance R que pendant la séance A (test post-hoc de Tukey ; $p < .05$). Les enfants des 2 autres groupes d'âge conservent une variabilité équivalente entre les 2 séances (toujours pour l'ensemble des essais) (Figure 31).

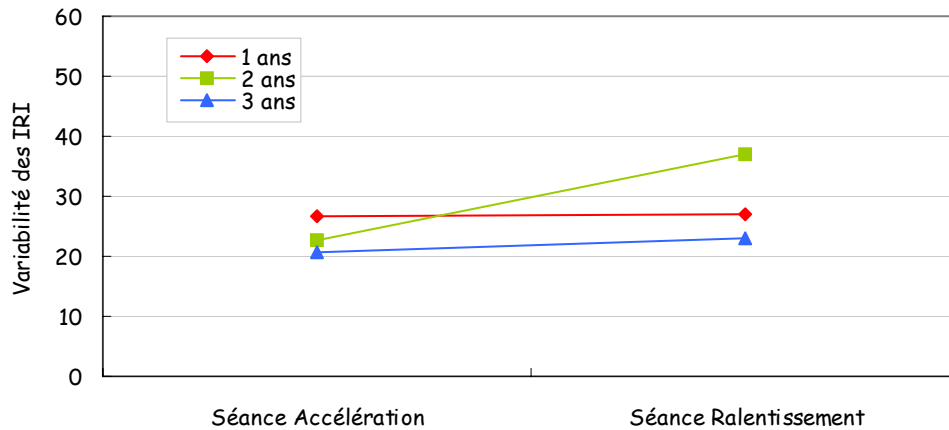


Figure 31 :
Variabilité des IRI en fonction de la séance

La variabilité des IRI n'est pas la même au cours des essais selon la séance (interaction variation/essai). **La variabilité de la séance R est supérieure à celle de la séance A pour l'essai S0** (test post-hoc de Tukey ; $p < .05$), **S20** ($p < .001$), **S45** ($p < .0001$) et **S50** ($p < .005$). Ces valeurs de variations ont déjà été mentionnées comme étant des valeurs charnières (Figure 32).

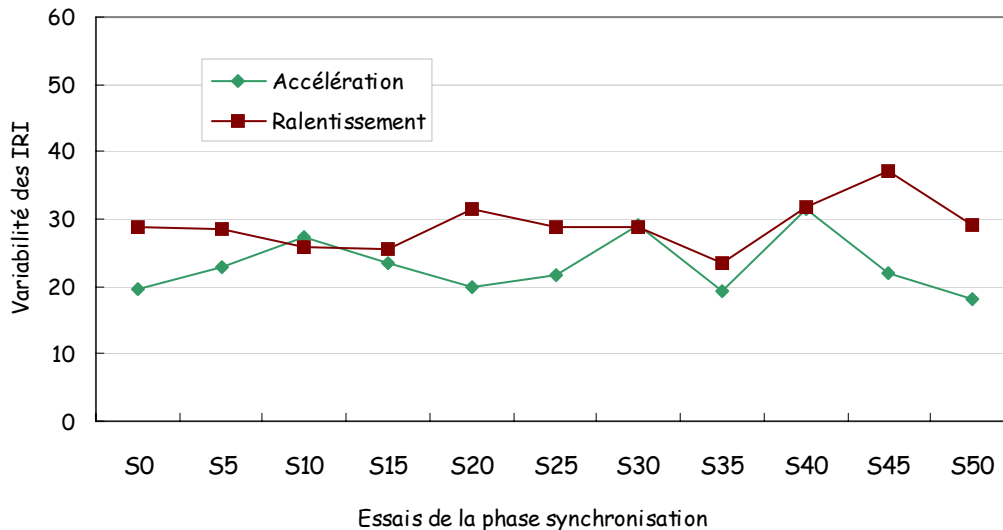


Figure 32 :
Comparaison de la variabilité au cours des essais de la phase de synchronisation en fonction de la séance

4.7 Comparaison du renforcement

Pourcentage de frappes renforcées

Le pourcentage de frappes renforcées de chacune des 2 séances a été comparé essai par essai au moyen d'une ANOVA ($S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \text{Essai}_{11} \times \text{Variation}_2$). Les résultats révèlent un effet significatif de l'âge : pour les 2 séances et tous essais de synchronisation confondus, **les enfants de 3 ans ont été plus renforcés** [$F(2,40)=26,50$; $p < .0001$] **que les enfants de 1 an** (test post hoc de Tukey : $p < .0005$) **et que les enfants de 2 ans** ($p < .005$).

Pourcentage de frappes anticipées

De la même manière, l'analyse comparative des frappes anticipées par une ANOVA ($S < \text{Age}_3 \times \text{Sexe}_2 > \text{Essai}_{11} \times \text{Variation}_2$) révèle un effet de l'âge [$F(2,40)=15,74$; $p < .0001$], de la variation [$F(1,40)=15,72$; $p < .0005$], ainsi qu'une interaction entre la variation et les essais [$F(10,400)=2,17$; $p < .05$].

Les enfants de 3 ans anticipent plus que les enfants de 1 an (test post-hoc de Tukey : $p < .0001$) **et que les enfants de 2 ans** ($p < .05$), confirmant les résultats précédents.

En ce qui concerne le sens de variation, la plus grande anticipation est relevée pour la séance R. Plus particulièrement, c'est à **partir de l'essai à 25% de variation que l'anticipation**

relevée pendant la séance R devient significativement supérieure à celle de la séance A (test post hoc de Tukey, respectivement : $p < .05$; $p < .0001$; $p < .0001$; $p < .0001$; $p < .05$ et $p < .0001$).

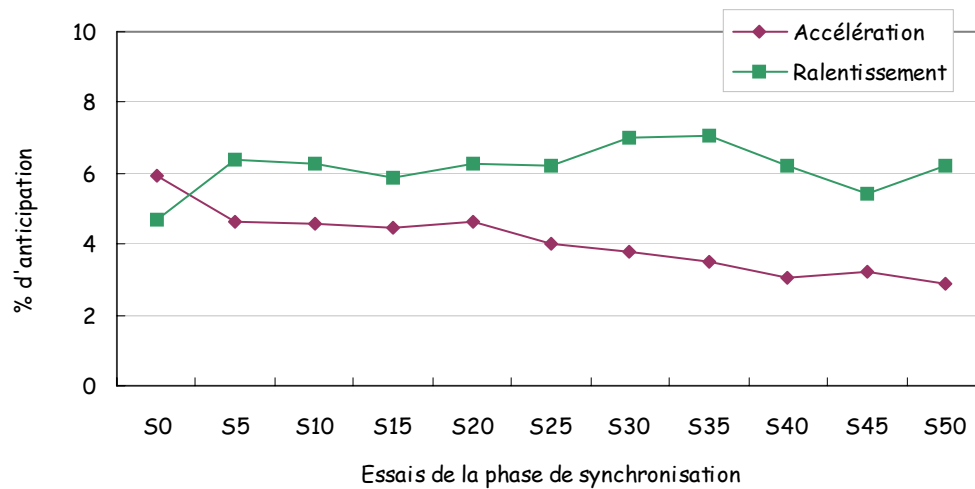


Figure 33 :
Pourcentage de frappes anticipées au cours des essais de la phase de synchronisation en fonction de la séance

4.8 Bilan

Evolution du TMS

L'absence de dépendance et d'effet d'ordre entre les 2 séances a permis de réunir l'ensemble des données de TMS et de les analyser du point de vue développemental. Le regroupement de ces données confirme les résultats trouvés pour chacune de ces 2 séances. Aucune évolution du TMS n'a pu être mise en évidence entre 1 et 4 ans. Il existe cependant un facteur qui évolue : la stabilité des frappes devient plus importante avec l'âge. Il existe donc **une phase transitoire au cours de laquelle le mécanisme central et probablement la base de temps se stabilise, sans que la valeur du TMS change**. L'hypothèse du ralentissement de la période de référence ne peut être validée avant 4 ans. Enfin, une autre caractéristique est l'augmentation de la variabilité inter-individuelle. Elle permet de confirmer qu'il existe une **évolution du système**, et que celle-ci est **propre à chaque individu**.

Comparaison des effets des rythmes de stimulations externes

Il a été montré que les séances pouvaient être comparées dans la mesure où les mêmes enfants ont participé aux 2 séances et que les résultats de chaque séance ne sont pas influencés par celui de la précédente.

Les stimulations rapides induisent une accélération du rythme de frappe spontanées plus importante que le ralentissement engendré par les stimulations lentes mais seulement pour les essais de 35 à 45% de variations (c'est-à-dire, lorsque les modifications de rythme sont les plus prononcées). Les IRI des premiers essais de la phase de synchronisation sont comparables. Notamment, les rythmes de frappe des essais à 0% de variation sont identiques au cours de la séance A et de la séance R. **Ce résultat valide donc l'hypothèse selon laquelle les enfants accélèrent leur rythme de frappe sous l'influence d'une stimulation extérieure de même tempo que leur propre TMS**, mais elle confirme aussi que pendant la séance R, les enfants de 1 et 2 ans récupèrent progressivement leur rythme de frappe.

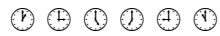
A partir de 20% de variation que les IRI des 2 séances tendent à se différencier, cette différence devenant significative à partir de 35% (et jusqu'à 45%). Les essais à 50% de variation ne sont pas différents entre les 2 séances, ce qui est très probablement lié au fait que pour la séance A, les frappe doivent être 2 fois plus rapides et que les enfants ne parviennent pas à accélérer suffisamment leur frappe (frapper à leur propre TMS étant une stratégie plus facile). La différence entre les 2 séances pour cet essai est donc amoindrie, d'autant plus que les enfants ne ralentissent jamais leur frappe au delà de leur propre TMS.

L'évolution comparée de la variabilité montre une plus faible variabilité des frappes pendant la séance A que pendant la séance R (particulièrement à 2 ans). Ces résultats peuvent être expliqués selon 2 axes déjà abordés. Tout d'abord, la tâche d'accélération apparaît mieux maîtrisée que la tâche de ralentissement. D'autre part, des IRI plus rapides permettent une moins grande variabilité des frappes.

Influence relative des stimulations externes sur le TMS

La modification du rythme de frappe, lorsqu'elle a été effective, a entraîné une modification du TMS uniquement lors de la séance d'accélération et ce, de façon significative pour les enfants de 2 et 3 ans. La séance R n'a pas modifié le TMS des enfants. Ces résultats ne sont pas surprenants dans la mesure où l'importance de la modification du rythme est supérieure au cours de la séance A que de la séance R. **Il existe donc une certaine inertie inhérente au fonctionnement de l'horloge, tout au moins lorsque les modifications du rythme des**

réponses sont importantes. Cette inertie est cependant limitée dans le temps puisqu'il n'existe pas d'effet d'ordre des séances lorsque les TMS1 sont comparés.



Ces analyses ont permis d'éclairer certains résultats obtenus au cours de chacune des 2 séances mais aussi d'apporter des informations complémentaires. L'ensemble des résultats apportés par chacune de ces études expérimentales est discuté de façon synthétique dans la troisième partie de ce document, à la lumière des concepts théoriques.

PARTIE 3

Discussion générale

Conclusions

et

Perspectives de recherches

1 Discussion générale

1.1 Evolution de la période de référence entre 1 et 4 ans

Le **premier résultat original** de cette étude expérimentale est d'avoir exploré le TMS du jeune enfant. Cette capacité de pouvoir frapper à intervalle régulier, en l'absence de tout indice extérieur (préalable ou simultané) est considérée être le reflet direct du fonctionnement de l'horloge. La théorie de l'attention dynamique stipule que l'intégration et le traitement des événements temporels extérieurs, et particulièrement les événements rythmiques, dépendent d'une période de référence, propre à chaque individu. Une bonne approximation de la valeur de cette période de référence est la valeur du tempo moteur spontané.

Le TMS est une valeur bien connue et très stable chez l'adulte. Ses 2 principales caractéristiques développementales sont que ce tempo de référence ralentit avec l'âge, au moins à partir de 6 ans et ce jusqu'à la fin de la vie et que la variabilité interindividuelle augmente avec l'âge.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés, au travers du TMS, à la mise en place de cette période fondamentale au traitement des durées courtes afin de vérifier si les 2 caractéristiques mentionnées ci-dessus sont extrapolables avant 6 ans et d'en déterminer les caractéristiques. Nos résultats ont permis d'apporter des éléments de réponses fournissant des indications quant à l'évolution du traitement temporel.

Le TMS reste constant au cours des premières années suivant la naissance

Nous nous sommes focalisés sur l'évolution du TMS avant 4 ans. Si cette valeur avait déjà été étudiée dès 2,5 ans, elle ne l'avait jamais été à un âge plus précoce. Notre étude a donc permis de réaliser une comparaison de ces valeurs à 3 âges différents. Les résultats montrent que cette valeur n'évolue pas entre 1,5 et 3,5 ans (âge moyen réel de nos groupes d'enfants) et qu'elle se situe autour de **460 ms**.

Le premier point de discussion est de comparer ce résultat et cette valeur aux autres résultats de la littérature. Les **résultats les plus comparables** sont ceux obtenus par Provasi et Bobin-Bègue (2003) avec un protocole équivalent (Tableau 13).

	Etude courante			Provasi & Bobin-Bègue (2003)		
	Sujets	Médiane SD	Variabilité ¹³ SD	Sujets	Médiane SD	Variabilité ¹² SD
1,5 ans	23 enfants 1,57 ans (SD : 0,11)	447 ms	32,0			
		83,5	28,1			
2,5 ans	26 enfants 2,36 ans (SD : 0,17)	465 ms	29,7	15 enfants 2,54 ans (SD : 0,13)	453 ms	22,3
		134,2	26,4		71,4	9,4
3,5 ans	36 enfants 3,52 ans (SD : 0,21)	495 ms	18,3	28 enfants 3,32 ans (SD : 0,35)	412	25,17
		172,2	14,1		78,9	12,9
4,5 ans				17 enfants 4,21 ans (SD : 0,18)	444 ms	19,65
					79,4	10,4

Tableau 13 :
Comparaison des données de la présente étude et de celles de Provasi & Bobin-Bègue (2003)
concernant les caractéristiques du TMS entre 1,5 et 4,5 ans

Les données de ces 2 études sont comparables. Pour obtenir une analyse plus précise, nous avons choisi de compléter nos valeurs de TMS par celles issues de l'expérience de Provasi & Bobin-Bègue, en ne conservant que les sujets dont les âges correspondaient à ceux de nos groupes d'âge. L'objectif est de confirmer ou d'infirmer l'absence d'évolution de TMS entre 1 et 4 ans. L'analyse de variance confirme les résultats déjà obtenus avec nos données : aucune évolution significative du TMS avec l'âge. **Le TMS entre 1,5 et 4 ans est donc en moyenne situé à 460 ms.** Cette valeur de TMS peut être considérée comme très fiable compte-tenu du nombre d'observations analysées.

En adoptant un point de vue développementale plus globale, cette valeur est supérieure à celles fournies par la littérature à 4 ans (Figure 34).

¹³ Il s'agit de la variabilité intra-individuelle

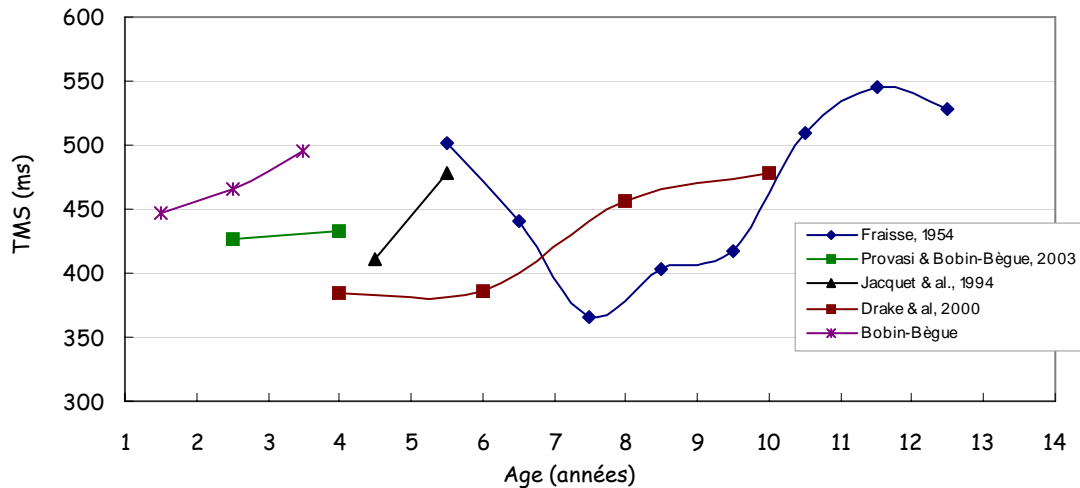


Figure 34 :
Synthèse des données de différentes études
concernant l'évolution du TMS au cours de l'enfance

L'ensemble des données accumulées jusqu'à présent ne permet pas de dégager clairement l'évolution du TMS (les courbes de tendances prédisent selon les différents types de calculs une accélération du TMS au cours de ces premières années tout autant qu'un ralentissement ou une constance). Deux éléments peuvent expliquer ces données faiblement homogènes. Tout d'abord, il est probable que l'augmentation de la variabilité inter-individuelle avec l'âge puisse modifier la valeur moyenne de telle ou telle étude. En effet, si l'échantillon de sujets choisi comporte plusieurs individus avec un TMS extrême, la moyenne se trouvera mal estimée par cet échantillon. D'autre part, ces mesures expérimentales sont dépendantes de la procédure utilisée ainsi que de la précision des instruments de mesure. Notre étude et celle de Provasi & Bobin-Bègue utilisant le même protocole sont, elles, comparables du point de vue de la précision des mesures.

La gamme d'amplitude maximum des TMS trouvés jusqu'à 10 ans est située entre 350 et 500 ms et est inférieure à 150 ms. Comparativement à l'amplitude normale de la gamme de TMS trouvés chez l'adulte (500 ms, pour une gamme allant de 300 à 800 ms), cette valeur est relativement faible.

Pour déterminer de façon fiable l'évolution du TMS de la naissance à l'âge adulte, il faudrait réaliser une étude portant sur un grand nombre de sujets et pour tous les âges. Mais en l'état actuel des données, plusieurs hypothèses peuvent être formulées, sans pour autant contredire les résultats obtenus.

L'hypothèse pour l'évolution du TMS qui nous paraît la plus vraisemblable est que le TMS est constant au moins au cours des 4 premières années après la naissance (et au maximum au cours des 10 premières années). Cette hypothèse est basée essentiellement sur nos données et celles de Provasi & Bobin-Bègue. Cette hypothèse ne contredit pas celle du ralentissement du TMS observé plus tardivement (depuis l'enfance et pendant la vie de l'adulte). Il est cohérent que les toutes premières années de la vie soient soumises à des influences différentes étant donné l'importance des phénomènes développementaux et des maturations du système nerveux qui se déroulent pendant ce laps de temps.

Une autre hypothèse intéressante à mentionner concerne la base de temps du système. En effet, s'il existe une base de temps comme le postule la majorité des modèles (oscillateurs et base de temps sont des notions compatibles), alors elle doit être plus rapide chez l'enfant que chez l'adulte, puisque le TMS est plus rapide et qu'il reflète le fonctionnement de ce système central. Certains auteurs ont montré que la base de temps chez l'adulte devait correspondre à un signal émis toutes les 20 ms (Treisman & al., 1990, 1992). En prenant la valeur moyenne du TMS d'un adulte (600 ms), alors les enfants de moins de 4 ans doivent avoir une base de temps un tiers plus rapide (en considérant le TMS moyen de 460 ms). Ainsi, il peut être postulé que la base de temps (si elle est à la base du mécanisme de traitement des durées courtes) chez l'enfant correspond à un signal émis toutes les 13 ms environ. Conformément aux informations apportées par l'étude du TMS, cette base de temps n'évoluerait pas non plus pendant une phase transitoirement allant de la naissance à l'âge de 6 ans puis ralentirait. Cette hypothèse d'une phase transitoire est par ailleurs renforcée par les résultats sur l'évolution de la variabilité des frappes pour ce type de tâche.

La variabilité intra-individuelle du TMS diminue avec l'âge

L'analyse de la variabilité intra-individuelle révèle que le TMS devient plus régulier au fur et à mesure que les enfants grandissent. L'augmentation de la régularité des frappes avec l'âge est peu documentée, les études ne calculant généralement que la variabilité inter-individuelle. Pour les études qui s'y sont intéressées, cette augmentation n'a pas été montrée chez l'adulte (Vanneste & al., 2001) ni même chez l'enfant entre 2,5 et 4 ans (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Elle est pourtant tout à fait nette dans nos résultats.

L'augmentation de la régularité des frappes pour la tâche de TMS est un très bon indice pour comprendre l'évolution du TMS. **Deux hypothèses** peuvent être proposées pour expliquer cette amélioration de la régularité des frappes.

La première hypothèse est que le **mécanisme central** à l'origine de la production de ces frappes sans contrainte **n'est pas encore suffisamment mature** pour permettre des frappes régulières. Si on admet que ce mécanisme repose sur un fonctionnement périodique, il est possible que celui-ci ne produise pas encore d'oscillations régulières. Si par contre il s'agit d'un ensemble d'intervalles reposant sur les temps de transmissions d'influx nerveux, le fonctionnement du système repose directement sur la maturation du système nerveux. Dans ces 2 cas de figure, ces opérations sont sous la dépendance de systèmes de réseaux de neurones et sont donc tributaires de la stabilité des communications entre neurones. Or, de nombreux phénomènes de maturation se mettent en place au cours des premières années de la vie. Ainsi, par exemple, la myélinisation des neurones, responsable de la vitesse de conduction des influx nerveux, se déroule essentiellement au cours des 18 premiers mois après la naissance pour atteindre sa maturité complète à la fin de l'adolescence¹⁴. D'autres phénomènes tels que la multiplication des fibres nerveuses, des connections intracellulaires, de l'astroglie de support se produisent au cours du développement et peuvent être à l'origine de cette variabilité intra-individuelle précoce ; il est surtout difficile de l'attribuer spécifiquement ou tout au moins uniquement au mécanisme de traitement temporel.

Ceci est d'autant plus vrai que la **seconde hypothèse** doit être considérée. Le TMS est aussi une tâche de production, où l'enfant doit exécuter une série de mouvements. Cette variabilité peut donc aussi être attribuée aux **effecteurs**. Dans ce cas, la source de la variabilité des frappes serait liée à l'exécution même des instructions générées au niveau central. Les jeunes enfants apprennent progressivement à maîtriser leur geste. Il est cohérent qu'avant 3 ans, la production d'un mouvement répétitif soit moins stable même si ce type de mouvements est fréquemment exécuté dès la naissance et joue un rôle développemental primordial (Pouthas et al., 1996).

Ces 2 hypothèses correspondent exactement à la décomposition de la variabilité selon le modèle de Wing & Kristofferson : la variabilité globale des frappes peut être décomposée en 2 sources de variabilité, une liée à la variabilité du mécanisme central, l'autre liée à la variabilité de l'exécution motrice. Il aurait paru intéressant de réaliser cette décomposition, cependant, le protocole expérimental et l'âge des enfants ne permettaient pas une analyse

fiable. En effet, ce type d'analyses est réalisé à partir de données chez l'adulte. L'adulte, en connaissant le protocole expérimental et exécutant une consigne sur de très nombreux essais, fournit suffisamment de données fiables. De plus, le calcul est totalement dépendant de la variabilité motrice, ce qui constitue la principale contrainte de cette analyse. Or, les enfants n'ont jamais reçu la consigne de frapper le plus régulièrement possible. De plus, compte-tenu de l'objectif du protocole expérimental, le nombre d'essais destiné à mesurer le TMS était relativement limité, ce qui ne permettait pas de réaliser cette analyse. Cependant, il est très probable que pour les raisons exposées plus haut (maturation du système nerveux), la diminution de la variabilité soit liée à la diminution de la composante centrale de la variabilité. Une expérience spécifique pourrait être développée pour vérifier cette hypothèse.

Hypothèse générale sur l'évolution de la période de référence

Dès 1,5 ans, les enfants sont capables de produire des intervalles très réguliers. Cette aptitude n'avait jamais été mise en évidence à un âge si précoce. Ce premier résultat est fondamental puisqu'il souligne **l'existence d'un mécanisme fonctionnel dès cet âge** capable de générer des durées identiques en l'absence de toute source d'information temporelle externe. Ce mécanisme est donc aussi capable de mesurer au moins une durée particulière correspondant à la période du tempo moteur spontané.

Dans le cadre des théories développées à partir des données adultes et chez l'enfant de plus de 4 ans, le TMS serait le reflet du fonctionnement de l'horloge de traitement des durées courtes (Jones, 1976 ; Jones & Boltz, 1989 ; Drake & al., 2000). Le cœur de cette horloge reposerait sur des oscillateurs, et en particulier sur une fréquence d'oscillation particulière appelée période de référence, et mesurable par le TMS. Nos données permettent de valider l'existence de cette période de référence pour des enfants de moins de 4 ans. Ce résultat souligne la continuité développementale du traitement temporel. **L'hypothèse d'une période d'oscillation de référence, fondamentale pour le fonctionnement de l'horloge, peut donc être postulée quel que soit l'âge de l'individu.** L'hypothèse alternative est que la période de référence ne se mettrait en place que tardivement (i.e. après 1,5 ans), mais compte-tenu de l'omniprésence des comportements rythmiques dès la naissance, cette hypothèse est peu probable.

La période de référence existerait donc très précocement, mais cependant elle **évoluerait avec l'âge**. Elle resterait stable, aux environs de 460 ms, de la naissance jusqu'à l'âge de 6

¹⁴ http://www.refer.org/liban_ct/rec/periodi/neuro/resonanc.htm

ans approximativement, puis ralentirait lentement jusqu'à la fin de la vie. Il existerait donc 2 phases d'évolution de la période de référence. La **première phase** aurait lieu pendant la petite enfance. La valeur de la période n'évoluerait pas, mais par contre, le système gagnerait en stabilité, parallèlement aux nombreux phénomènes de maturation du système nerveux. Le système responsable de la période de référence disposerait d'un délai de maturation pour affiner son fonctionnement. Pendant ce délai, la période d'oscillation serait grossièrement constante mais les oscillations prises individuellement seraient, elles, très variables. Après quelques années, vers 6 ans, la période de référence passerait à une autre phase d'évolution. Cette **seconde phase**, celle de ralentissement, serait propre à chaque individu. En effet, les jeunes enfants présentent pour cette valeur une faible variabilité inter-individuelle : leur période de référence varie peu d'un individu à l'autre. Progressivement, cette valeur fondamentale devient, à l'âge adulte, très différente d'un individu à l'autre. **L'importance du ralentissement dépendrait donc de l'individu** : si presque tous les enfants de moins de 4 ans ont un TMS de 460 ms, le ralentissement est moins important pour un individu devenu adulte qui a un TMS de 500 ms comparativement à un individu au TMS de 800 ms.

Cette évolution propre à chaque individu peut être la conséquence de 2 types de phénomènes. Ils sont d'une part environnementaux. En effet, l'expertise musicale et donc l'entraînement aux traitements des durées courtes est à l'origine d'une moindre variabilité inter-individuelle dans les tâches de TMS, et ceux quel que soit l'âge (Drake & al., 2000 ; Gérard & Rosenfeld, 1995). L'autre source de cette évolution différentielle est liée directement au développement des structures biologiques à l'origine de la période de référence. Or, aucun mécanisme physiologique n'a été proposé pour expliquer la réalité biologique des oscillateurs dans ce modèle. Selon les données de la littérature, le ralentissement observé chez l'adulte serait directement lié à un ralentissement central de l'horloge et non pas du à des facteurs périphériques tels qu'une modification des vitesses de conduction de l'influx nerveux jusqu'aux effecteurs ou qu'une limitation physiologique des effecteurs liée au vieillissement (Vanneste, 1996). Si on considère le cervelet comme la principale structure cérébrale à l'origine du traitement temporel, sa maturation se termine à l'adolescence. En conséquence, l'explication la plus simple est que l'évolution du TMS serait d'abord liée à la maturation du cervelet et ensuite à son vieillissement (ce qui est en accord avec l'hypothèse d'un ralentissement central). L'identification précise des bases biologiques du fonctionnement du système de traitement révéleront les raisons de cette évolution.

1.2 Seuil de sensibilité du fonctionnement de l'horloge

La seconde question que nous nous sommes posée est relative aux capacités de traitement des durées aux même âges. Les performances, et en particulier la sensibilité du traitement temporel des durées courtes, ont ainsi été étudiées au moyen de tâches de perception et de production.

Les étapes de la mise en place du traitement des durées

Nous avons montré que les enfants devenaient capables avec l'âge de modifier leur rythme de frappes sous l'influence de stimulations extérieures. Ainsi, dès 1,5 ans, une stimulation extérieure du même rythme que le TMS induit une accélération du rythme de frappe. Cette information corrobore les résultats trouvés chez le nourrissons accélérant leur rythme de succion en présence d'une stimulation auditive de tempo équivalent (Provasi & Marks, 1994). Les enfants dès la naissance sont donc sensibles à leur propre tempo. Ces événements extérieurs qui se produisent à une même périodicité que leur période de référence sont donc parfaitement perçus par le système de traitement et doivent interférer avec la base de temps. Ce phénomène n'a jamais été rapporté chez l'adulte (les études analogues font intervenir des stimulations plus rapides, cf. Penton-Voak & al., 1996 et Treisman & al., 1990, 1992) : les performances de synchronisation de l'adulte sont très bonnes. L'hypothèse la plus probable serait l'immaturation du système, qui se traduirait par cette influence particulière. Avec la maturation et l'amélioration des performances, cette perturbation s'estomperait.

Les 2 expériences de production ont par ailleurs fourni des informations quant aux étapes de l'évolution de ce système de traitement. Tout d'abord, pour les 2 séances, la variabilité diminue avec l'âge, quelle que soit la phase. Ce résultat confirme celui trouvé pour le TMS, à savoir qu'une des premières étapes de la maturation du système consiste en une stabilisation des processus.

Les enfants de 1,5 ans, même s'ils ne sont pas capables de modifier significativement leur rythme de frappe spontané, sont cependant sensibles aux stimulations extérieures. A 3,5 ans, les stimulations extérieures induisent des modifications dans la façon de frapper. Les modifications varient selon que les stimulations sont plus rapides ou plus lentes que le TMS. Mais d'une façon globale, ces résultats montrent que le mécanisme de traitement des durées existe et qu'il subit une importante étape de maturation entre 1 et 3 ans.

Le fait que la production de durées soient sensibles aux stimulations extérieures suggère qu'il existe des processus qui intègrent les durées perçues et que les informations ainsi intégrées

interagissent au niveau central avec les processus à l'origine de la production des frappes et ce au moins dès l'âge de 1,5 ans. Cette perturbation devient de mieux en mieux maîtrisée parallèlement au développement de l'enfant. Le système s'affranchit donc progressivement de l'influence extérieure pour pouvoir interagir plus efficacement avec celle-ci. Aucune information n'est disponible dans la littérature sur ce sujet pour nous permettre de faire une comparaison. Néanmoins, il apparaît dorénavant important de tenir compte de ce facteur lors d'études ultérieures.

Existence d'un seuil de sensibilité du traitement temporel

Nos résultats ont montré qu'à partir de 3,5 ans, l'enfant pouvait modifier son rythme spontané de frappe pour l'accélérer ou le ralentir, en fonction des stimulations extérieures perçues. Cependant, cette capacité n'est effective que si le rythme des stimulations diffère **de plus de 20%** (ou plus exactement d'une valeur seuil comprise entre 15 et 20%) de leur rythme de frappe spontané. Ce résultat est soutenu par ceux de l'expérience de Provasi & Bobin-Bègue (2003). En effet, dans cette étude, aucun paramètre relatif aux frappes de l'enfant n'est modifié en présence d'une stimulation externe à 400 ms (soit moins de 20% différente de la période de référence théoriquement situé autour de 460 ms) ; par contre, ces paramètres sont modifiés lorsque les stimulations externes sont à 600 ms (soit environ 30% de variation par rapport à la période de référence).

Par ailleurs, notre expérience de discrimination de tempo révèle qu'au même âge (environ 3,5 ans), le **seuil de sensibilité** est en perception du **même ordre de grandeur** (le seuil de discrimination est situé entre 10% et 20% de différence entre les 2 durées).

Ces résultats permettent de mettre en évidence l'existence d'un seuil de traitement temporel à la fois pour les traitements perceptifs et pour les traitements en production de durées. Dans la mesure où le mécanisme de traitement des durées est commun pour ces 2 types de tâches, il est remarquable que ces 2 seuils soient du même ordre de grandeur, et qu'ils concernent les mêmes âges (des enfants de plus de 3 ans).

Ce seuil de traitement temporel traduit que **pour une différence trop faible entre les durées à traiter** (c'est-à-dire une différence inférieure à 20%) **l'enfant de cet âge ne peut pas les analyser comme différentes, bien qu'elles soient perçues par le système de traitement** (accélération du rythme de frappe). D'une part, elles ne sont pas perçues comme différentes (cf. seuil de discrimination). D'autre part, elles ne peuvent être produites différemment, ce qui n'engendre pas de modifications du rythme de frappes de l'enfant. Enfin, puisque la

production d'une durée nécessite sa perception par le système de traitement, il est logique que ces seuils soient du même ordre de grandeur.

Au-dessus de cette limite, un traitement différentiel est possible : les durées peuvent être discriminées l'une de l'autre et elles peuvent être produites différemment. Ce traitement différentiel s'améliore avec l'âge dans la mesure où les performances de discrimination augmentent entre 3 et 4 ans (et très probablement au-delà). L'amélioration du traitement n'est pas aussi évident en production. Les différentes variations testées n'ont pas permis de mettre en évidence un traitement plus fin, dépendant de cette variation. Cependant, il faut noter que la variabilité vient d'être maîtrisée en présence de stimulations extérieures. Il est donc probable que dans la mise en place progressive du mécanisme de traitement temporel, les modifications plus fines se font plus tardivement.

1.3 Analyse du fonctionnement du système de traitement

L'existence de ce seuil de sensibilité corrélée aux différents résultats expérimentaux recueillis avant 4 ans permettent d'avancer des hypothèses sur les caractéristiques du traitement temporel pendant cette phase particulière. En effet, il a été mentionné que le TMS était constant (à 460 ms) et devenait de plus en plus stable avec l'âge.

Tout d'abord, en considérant le modèle développemental, nos résultats suggèrent que le seuil de traitement optimal est de 20% à partir de 3 ans. En effet, nous avons travaillé à proximité du TMS et donc de la période de référence et, selon ce modèle, le tempo de traitement optimal correspond à la période de référence. Dans ce contexte, il peut être postulé que le seuil de traitement optimal diminue avec l'âge puisqu'il atteint 3% chez l'adulte (Drake & Botte, 1993).

Cette hypothèse est en accord avec les résultats de Provasi & Bobin-Bègue puisque dans leur expérience, les enfants (dont la période de référence est supposée être d'environ 460 ms) ne parviennent pas à modifier leur frappe lorsqu'ils perçoivent un tempo de 400 ms, soit 13% de différence avec leur TMS, et y parviennent pour des tempi de 600 ms et 800 ms, soit des différences de plus de 30%. **Aux environs de 3 ans donc, ces résultats confirment que le seuil de traitement optimal soit d'environ 20%.**

Cette hypothèse est aussi **en accord** avec le seuil de discrimination mis en évidence chez des enfants de plus de 3 ans dans cette étude. En effet, les enfants discriminent un tempo de 540 ms d'un tempo de 660 ms ($600 \text{ ms} \pm 10\%$). Relativement à leur TMS, un tempo de 540 ms correspond à une différence de 17,4%. Si cette valeur est légèrement inférieure au

seuil mentionné de 20%, elle ne contredit pas l'hypothèse. En effet, notre protocole n'a pas permis de déterminer ce seuil avec une précision inférieure à 5%. Il est donc probable que 17% soit une valeur plus proche du seuil de sensibilité réel que la valeur de 20% déterminée expérimentalement. De plus, on peut supposer que le seuil en perception soit plus faible que celui qui peut être déterminé en production : la production de durée nécessite dans un premier temps la perception de la durée (sauf pour le TMS évidemment qui ne nécessite aucune information exogène) et ensuite des processus de production.

Cependant, cette hypothèse est **remise en cause** par 2 résultats. Le premier concerne de nouveau notre expérience de discrimination de tempo. Les enfants ne discriminent pas un tempo de 570 ms d'un tempo de 630 ms ($600 \text{ ms} \pm 5\%$). Or, un tempo de 570 ms représente un écart de 24% par rapport à la période de référence de l'enfant, ce qui est supérieur au seuil. Or, aucune hypothèse ne permet de fournir une explication à ce résultat. Le second résultat concerne l'expérience de Baruch & Drake (1997) : les enfants discriminent un tempo de 510 ms d'un tempo de 600 ms. De la même façon, un tempo de 510 ms représente une différence de 11% avec la période de référence de l'enfant (supposée stable de la naissance à au moins 4 ans). Ces 2 résultats s'opposent au fait que le seuil de discrimination optimal puisse s'améliorer avec l'âge.

L'ensemble des résultats mentionnés ici amène à envisager une autre hypothèse : le seuil de sensibilité ne devrait pas être considéré en valeur relative mais en valeur absolue. En reprenant les résultats expérimentaux selon ce point de vue, toutes ces expériences montrent que les enfants sont sensibles à une **différence entre les durées qui soit supérieure approximativement à 90 ms** (où au moins compris entre 70 et 90 ms). En effet, les bébés discriminent 2 durées si elles diffèrent de 90 ms (600 ms vs 600 ms-15%) mais pas si cette différence est de 45 ms (300 ms vs 300 ms-15%) (Baruch & Drake, 1997). A 3 et 4 ans, les enfants discriminent 2 tempi différant de 120 ms ($600 \pm 10\%$) mais pas de 60 ms ($600 \pm 5\%$) (expérience de discrimination de tempo de cette étude). A 3,5 ans, les enfants modifient leur rythme de frappes au-delà d'une différence de 92 ms par rapport à leur rythme de frappe spontané (variation de 20% testé dans cette étude), mais n'y parviennent pas si elle est inférieure à 70 ms. Enfin, les enfants de 2,5 et 4 ans modifient leur rythme de frappe spontané pour 140 ms de différence par rapport à leur rythme de frappe spontané (ISI de 600 ms, Provasi & Bobin-Bègue, 2003) mais pas lorsqu'elle est de 60 ms (soit 13% de leur TMS pour un ISI de 400 ms).

Un point doit être cependant mentionné : les bébés ne discriminent pas une différence de 15% pour les autres tempi testés de 100 ms et 1500 ms. Cependant, ces valeurs de tempi représentent les extrêmes de la gamme de durées concernée par le traitement défini pour être celui des durées courtes. De plus, le modèle développemental de Drake & al. postule un élargissement avec l'âge de la gamme de tempi accessible au traitement temporel. Il est alors logique que les bébés ne discriminent pas ces tempi extrêmes.

Cette dernière proposition peut donc être envisagée sérieusement et ce d'autant plus si un dernier point est considéré. Il a été mentionné que si une base de temps était à la source du traitement temporel, alors chez l'enfant elle serait d'un signal émis toutes les 13 ms environ. Par ailleurs, considérant la stabilisation du système de traitement et particulièrement du TMS avant 4 ans, ce seuil absolu de 90 ms est cohérent. En effet, une différence de 90 ms entre 2 durées représente une marge d'erreur pour le traitement temporel d'environ 6 signaux. Ce nombre n'est pas très important pour un système en pleine maturation de son fonctionnement. Comparativement chez l'adulte, le seuil optimal est de 3% à 600 ms, soit 18 ms ; or la base de temps est de 20 ms. Ce seuil optimal représente donc une marge d'erreur d'un unique signal. Les seuils optimaux, obtenus sur des sujets après entraînement et après de nombreux essais, correspondaient à 10 ms de différence traitée, soit une erreur d'un demi signal. Cette proposition d'interprétation du fonctionnement de l'horloge est donc compatible avec les données expérimentales et devrait être testée par des protocoles expérimentaux spécifiques.

1.4 Influence sur le rythme endogène

Un autre type d'information sur le fonctionnement du système de traitement est apporté par l'analyse de la phase de TMS ayant suivi la phase d'interaction avec des stimulations extérieures. Les résultats montrent que la modification du TMS augmente avec l'âge, ce qui est confirmé par les résultats de Provasi & Bobin-Bègue (2003).

Cependant, nos résultats ne permettent pas de déterminer à partir de quelle variation de la stimulation extérieure par rapport au TMS initial, le TMS va être modifié (la phase de TMS2 ayant eu lieu uniquement après l'essai à 50% de variation). Il est probable que cette modification devienne significative à partir des 20% de variation correspondant au seuil de sensibilité du système de traitement temporel.

Par ailleurs, cette modification n'est que transitoire, puisqu'elle ne se retrouve pas d'une séance à l'autre. Il peut s'agir soit d'une modification nécessaire au traitement temporel, soit d'une modification liée uniquement à l'interaction avec le système de traitement. La première

hypothèse est probable dans la mesure où cette modification du TMS devient plus importante avec l'âge c'est-à-dire parallèlement au perfectionnement du système de traitement.

Il faut pourtant mettre en balance d'autres données. En effet, tout d'abord chez l'enfant, il a été mentionné que des stimulations extérieures de même rythme que le TMS de l'enfant induisaient une accélération des réponses de l'enfant, suggérant une interaction parasite plus que nécessaire au traitement. De la même manière, chez l'adulte, une stimulation auditive très rapide modifie la perception de la durée (Penton-Voak & al., 1996).

Ces informations ne sont pas suffisantes pour conclure. Des études spécifiques devraient poser la question de savoir si le traitement des durées courtes nécessite ou non une modification du rythme de la base de temps.

1.5 Interactions avec d'autres paramètres

Dissymétrie entre stimulations plus rapides et stimulations plus lentes

La littérature fait référence dans la majorité des cas à des traitements temporels impliquant une durée test plus rapide que la durée de référence du protocole. Les seuls résultats concernant le traitement d'une durée test plus lente rapportent une absence de résultats chez les enfants.

Les résultats issus de nos 2 séances fournissent des résultats globalement équivalents quant au traitement temporel. Certaines différences peuvent toutefois être mentionnées.

Tout d'abord, il apparaît plus facile d'accélérer les frappes que de les ralentir. Ce résultat est compatible avec le fait que les enfants ont du mal à inhiber un comportement. Cependant, il faut considérer qu'une stimulation extérieure induit une légère accélération des réponses de l'enfant. Provasi & Marks (1994) ont ainsi mis en évidence que chez les nourrissons, le rythme de succion accélérât que les stimulations extérieures soient plus rapides ou plus lentes que leur rythme de succion spontané. Ce résultat se retrouve dans nos 2 expériences A et R. Evidemment, au cours de la séance A, l'accélération des frappes par rapport au TMS1 est attendue compte-tenu du protocole. Par contre, pour la séance R, cette accélération reflète réellement l'interaction entre le système endogène et les stimulations extérieures. La comparaison des premiers essais de ces 2 séances révèle que les IRI sont comparables. Il peut donc être interprété que les 2 types de stimulations externes ont la même interaction avec le système de traitement. Pour cette raison, il était donc important de déterminer le seuil à partir de l'essai à 0% et non à partir du TMS1.

Pourtant, une analyse plus détaillée montre que pour la séance A, le facteur âge intervient dans l'importance de la modification des IRI (la modification devient plus importante avec l'âge). Les enfants parviennent à interagir avec les stimulations dès 1,5 ans et à modifier leur rythme de frappes dès 2,5 ans, leurs frappes devenant très stables à 3,5 ans. Pour la séance R, l'étude de la médiane des IRI ne permet pas de mettre en évidence une variation liée à l'âge. Tous les enfants réagissent de manière similaire. Cependant, seuls les enfants de 3,5 ans ont un rythme de frappes plus variables au-delà du seuil de sensibilité. Les frappes deviennent plus stables en présence de stimulations externes vers 4 ans (Provasi & Bobin-Bègue, 2003).

Le traitement suit donc la même évolution dans les 2 situations. Tout d'abord, la variabilité des frappes est perturbée, puis les enfants parviennent à modifier leur rythme de frappe. La différence est que le traitement des durées plus lentes se met en place plus tardivement (entre 2,5 et 3,5 ans puis pour la seconde étape entre 3,5 et 4 ans) que celui des durées plus rapides (entre 1,5 et 2,5 ans puis entre 2,5 et 3,5 ans). Ces résultats suggèrent que globalement les durées plus rapides ou plus lentes sont traitées de la même façon par le système de traitement. Mais, il faut tenir compte d'une limitation supplémentaire dans le traitement des durées plus lentes liée à la difficulté à inhiber une réponse par rapport au TMS. Nous avons souligné ce point qui ne peut être ici bien discuté dans la mesure où notre protocole expérimental, avec ses faibles variations d'un essai à l'autre, a sûrement accentué ce phénomène.

Différence de performances liées au sexe

Ce facteur doit être mentionné ici. En effet, nos résultats en perception comme en production ont mis en évidence de meilleures performances, à partir du moment où elles étaient bien maîtrisées (donc dans les groupes d'âge les plus grands) chez les filles que chez les garçons. Ces résultats sont exactement l'inverse de ceux trouvés dans la littérature et chez l'adulte et à des âges équivalents. Il est donc peu probable que ces divergences de résultats puissent s'interpréter par une différence dans la vitesse de maturation du système de traitement (qui serait donc plus rapide chez les filles que chez les garçons avant 4 ans. Nous avons plutôt interprété cette différence comme étant la conséquence d'une attention dédiée à la tâche plus grande (plus de ressources attentionnelles consacrées au traitement de la tâche) chez les filles que chez les garçons ; cette interprétation est soutenue aussi par le fait qu'il existe des différences liées au sexe dans les capacités de traitement, spécifiques à chaque type de tâche (Dittmar & al., 1993). Ce résultat doit être complété par des données complémentaires.

2 Conclusions

En résumé, la période de référence est un concept formel conçu pour expliquer la focalisation de l'attention sur des événements rythmiques complexes. Cette période de référence permet en outre d'expliquer la capacité à produire des intervalles réguliers en l'absence de base de temps exogènes. Notre étude a permis de préciser les caractéristiques de sa mise en place avec le développement de l'enfant puis tout au long de la vie. Celle-ci suit 2 phases d'évolution. La première est une phase où les oscillations sources se stabilisent, la période restant la même et étant très similaire d'un individu à l'autre. La seconde est une phase de ralentissement lié au fonctionnement même de l'horloge. L'importance du ralentissement est propre à chaque individu, expliquant l'augmentation de la variabilité inter-individuelle. Deux facteurs peuvent être à l'origine de cette évolution différentielle : l'expérience et des facteurs biologiques intrinsèques.

Dès lors, il est envisageable que la base de temps à l'origine de la période de référence et du TMS et surtout à la base du traitement temporel suive les mêmes phases de développement et de maturation. Ainsi l'unité de la base de temps passerait chez le jeune enfant de une pulsation toutes les 13 ms environ à une toutes les 20 ms à partir de 4 ans. Il est encore difficile de déterminer si le ralentissement de la base de temps est le même pour tous les individus et qu'ensuite les processus qui génèrent le TMS modulent l'importance de ce ralentissement ou si cette base de temps est une moyenne et qu'elle aussi est spécifique à chaque individu. La régularité des pulsations quant à elle se stabiliserait au cours du développement. Ainsi tout le système de traitement bénéficierait de cette maturation.

Cette analyse est cohérente avec celle issue de l'analyse du traitement temporel. Le système est en place dès la naissance, mais ces capacités de traitement sont immatures, en particulier en production d'intervalles ne correspondant pas au TMS de l'enfant (puisque les nourrissons sont capables de discrimination de tempo et d'activités rythmiques plus ou moins modulées). En ce qui concerne l'interaction avec des stimulations externes, dès 1,5 ans, les enfants y sont sensibles et accélèrent systématiquement et sans doute de façon automatique leur rythme de frappes spontané. Par contre, ces stimulations ne semblent pas interagir avec le système de traitement temporel, bien qu'elles soient perçues par celui-ci. L'étape suivante est que les stimulations externes interagissent avec le système et ont pour conséquence de perturber le rythme des productions. Le système évolue ensuite en maîtrisant cette variabilité et parvient à modifier significativement le rythme de ses réponses.

Ces étapes ne se mettent pas en place au même moment selon que les durées à traiter sont plus rapides ou plus lentes que la période de référence de l'enfant. Cette période semble donc effectivement une référence pour le traitement temporel. Selon le modèle développemental, la maturation du système donne accès à une plus grande gamme de tempi, pour couvrir toute la gamme des durées courtes à l'âge adulte.

Un autre point important concerne le seuil de sensibilité du système de traitement temporel. Les seuils déterminés dans cette étude confirment que le mécanisme de traitement est commun à la fois aux tâches perceptives et aux tâches de production. Mais s'ils sont du même ordre de grandeur, la confrontation avec les résultats de la littérature suggère que le système n'est pas sensible à une différence relative entre les durées à traiter, mais à une durée absolue (uniquement dans le cadre du traitement des durées courtes évidemment). Ce seuil serait situé chez l'enfant de moins de 4 ans entre 70 et 90 ms et évoluerait vers 20 ms (10 ms pour les sujets les plus entraînés) chez l'adulte. En se référant à la base de temps, la sensibilité du traitement passerait de quelques pulsations à une pulsation, confirmant nettement le gain de performance parallèlement aux maturations du système nerveux.

Ces interprétations ne peuvent être précisées plus avant dans la mesure où les bases cérébrales du système ne sont pas clairement définies. Le modèle développemental ne propose pas de base biologique à son système d'oscillateurs. Le modèle le plus complet à l'heure actuelle quant à lui n'a pas été développé à partir de données concernant les durées courtes, mais il a été basé sur des études concernant le traitement de durées supérieures à la seconde. Il a été mentionné un autre modèle concernant spécifiquement les durées courtes et impliquant le cervelet. Le cervelet est un très bon candidat puisque sa maturation dure jusqu'à l'adolescence. Le modèle qu'il lui est associé ne se réfère pas à une base de temps mais à un ensemble d'intervalles de référence. Cependant, les interprétations sont aussi valables. Dans ce cas, il est nécessaire de postuler que le nombre d'intervalles de référence augmente avec l'âge (il passerait d'un intervalle de référence à tout un ensemble d'intervalles) et que la maturation du système est directement corrélée à la stabilisation des délais de conduction le long des neurones (par les phénomènes de myélinisation notamment).

Enfin, un dernier point concerne l'influence des stimulations externes sur la période de référence. Mais s'il a pu être montré qu'il existait une influence qui augmentait avec la maturation du système, il n'est pas possible de déterminer avec les données actuelles si cette influence est nécessaire ou si elle est une conséquence du fonctionnement du système.

Toutes ces données si elles ont permis de préciser le fonctionnement et les étapes de la mise en place du système de traitement des durées courtes ont aussi soulevé d'autres questions qui pourront être abordées par des études expérimentales complémentaires.

3 Perspectives de recherches

De nombreuses interrogations assez pointues ont été soulevées tout au long des discussions des résultats de cette étude. Il n'est pas intéressant de les reprendre une par une ici. Par contre, elles s'intègrent à des questions plus générales qui sont synthétisées ici.

Le premier point à préciser concerne toujours le TMS. Nous avons émis l'hypothèse qu'il existait dès la naissance (et pourquoi pas avant ?) et qu'il avait la même valeur. Cette hypothèse demande à être vérifiée et mettrait sans doute en évidence d'autres étapes de développement qui pourraient être inférées à la mise en place de la base de temps. De la même façon, les données au cours de l'enfance jusqu'à l'âge adulte restent rares et elles pourraient permettre de dresser un profil de développement plus complet, qui mis en relation avec les capacités de traitement, pourrait aider à la compréhension du mode de traitement des durées.

Le point principal qui reste à explorer concerne la relation entre la période de référence et les performances de traitement. Le modèle développemental suggère un traitement optimal pour des tempi proches de la période de référence. Nos résultats ont soulevé différentes questions par rapport à cette hypothèse. D'une part, quel rôle joue la période de référence dans le traitement temporel. Ensuite, la question est de savoir pourquoi elle est influençable par des stimulations extérieures. Si cette période est le reflet direct de la base de temps, alors quels sont les processus qui permettent la perception d'une durée et sa production. Cette question débouchera inévitablement sur la représentation mentale d'une durée et les processus qui permettent son élaboration. La réponse à ces questions permettront de préciser le lien et la cause de l'évolution du seuil de sensibilité. Il est aussi nécessaire de tester l'hypothèse selon laquelle le seuil de sensibilité doit s'exprimer en valeur absolue et non en valeur relative. Dans ce cas, si les performances sont moins bonnes chez l'enfant loin de la période de référence, est-ce que l'explication est due au fait que la gamme de tempi accessibles s'élargit avec l'âge. La question qui en découle est comment s'élargit cette gamme de tempi. Enfin, quelle est la cause au fait que le traitement des durées plus lentes soit mis en place plus tardivement que celui des durées rapides.

Ces nombreuses interrogations relèvent toutes d'une nécessité de modélisation du fonctionnement du traitement des durées courtes. Mais elles ne doivent pas occulter qu'elles possèdent une réalité biologique et que la recherche des réponses à ces questions ne doit pas

être indépendante des mécanismes neuronaux. Ce point de vue complémentaire suscite lui aussi de nombreuses autres interrogations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allan, L. G. (1979). The perception of time. *Perception & Psychophysics*, 26, 340-354.
- Allan, L. G., & Kristofferson, A. B. (1974). Psychophysical theories for duration discrimination. *Perception & Psychophysics*, 16, 26-34.
- Arlin, M. (1986). The effects of quantity and depth of processing on children's time perception. *Journal of experimental child psychology*, 42, 84-98.
- Arriada_Mendicoa, N., Otero_Siliceo, E., & Corona_Vazquez, T. Current concepts regarding the cerebellum and cognition. *Revista de Neurologia*, 29, 1075-82.
- Artieda, J., & Pastor, M. A. (1996). Neurophysiological mechanisms of temporal perception. In M. A. Pastor & J. Artieda (Ed.), *Time, Internal Clocks and Movements* (pp. 1-25): Elsevier Science B.V.
- Artieda, J., Pastor, M. A., Lacruz, F., & Obeso, J. A. (1992). Temporal discrimination is abnormal in Parkinson's disease. *Brain*, 115, 199-210.
- Aschersleben, G. (2002). Temporal control of movements in sensorimotor synchronization. *Brain and Cognition*, 48, 66-79.
- Aschersleben, G., & Prinz, W. (1995). Synchronizing actions with events: the role of sensory information. *Perception & Psychophysics*, 57, 305-17.
- Aschersleben, G., & Prinz, W. (1997). Delayed auditory feedback in synchronization. *Journal of Motor Behavior*, 29, 35-46.
- Aschoff, J. (1985). On the perception of time during prolonged temporal isolation. *Hum. Neurobiol.*, 4, 41-52.
- Aschoff, J., & Daan, S. (1997). Human time perception in temporal isolation: effects of illumination intensity. *Chronobiology International*, 14(6), 585-596.
- Barlett, N. R., & Barlett, S. C. (1959). Synchronization of a motor response with an anticipated sensory event. *Psychological Review*, 66, 203-218.
- Baruch, C., & Drake, C. (1997). Tempo discrimination in infants. *Infant behavior and development*, 20-4, 573-577.
- Batejat, D., Lagarde, D., Navelet, Y., & Binder, M. (1999). Evaluation de la capacité d'attention chez 10000 enfants scolarisés âgés de 8 à 11 ans. *Arch Pediatr*, 6, 406-415.
- Billon, M., Semjen, A., Cole, J., & Gauthier, G. (1996). The role of sensory information in the production of periodic finger-tapping sequences. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale*, 110, 117-30.
- Block, R. A. (1990). Models of psychological time. In R. A. Block (Ed.), *Cognitive models of psychological time* (pp. 1-35). Hillsdale, N.J.: Erlbaum Associates.

- Block, R. A. (1996).** Psychological time and memory systems of the brain. In J. T. Fraser & M. P. Soulsby (Ed.), *Dimension of time and life - the study of time VIII* (Vol. the study of time, pp. 61-76). Madison, Connecticut: International Universities Press, Inc.
- Block, R. A., Zakay, D., & Hancock, P. A. (1999).** Developmental changes in human duration judgments: a meta-analytic review. *Developmental Review, 19*, 183-211.
- Boltz, M. G. (1992).** The remembering of auditory event durations. *Journal of Experimental Psychology, 18* (5), 938-956.
- Boltz, M. G. (1994).** Changes in internal tempo and effects on the learning and remembering of event durations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 20*, 1154-1171.
- Boltz, M. G. (1995).** Effects of event structure on retrospective duration judgments. *Perception & psychophysics, 57*, 1080-1096.
- Boltz, M. G. (1998).** Tempo discrimination of musical patterns : effects due to pitch and rhythmic structure. *Perception and psychophysics, 60 No 8*, 1357-1373.
- Braitenberg, V. (1967).** Is the cerebellar cortex a biological clock in the millisecond range ? , 334-346.
- Burle, B., & Bonnet, M. (1997).** Further argument for the existence of a pacemaker in the human information processing system. *Acta Psychologica, 97*, 129-143.
- Campbell, S. (1990).** Circadian rhythms and human temporal experience. In R. A. Block (Ed.), *Cognitive models of psychological time* (pp. 101-118). Hillsdale, N.J.: Erlbaum Associates.
- Carr, J. A. R., & Wilkie, D. M. (1997).** Ordinal, phase and interval timing. In B. C. M. & S. E. (Ed.), *Time and behaviour : psychological and neurobehavioural analyses* (pp. 265-327): Elsevier Science B.V.
- Casini, L., Macar, F., & Grondin, S. (1992).** Time estimation and attentional sharing. In P. V. Macar F. Friedman W.J. (Ed.), *Time, Action and Cognition - toward bridging the gap* (pp. 177-180). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Church, R. M. (1997).** Timing and temporal search. In B. C. M. & S. E. (Ed.), *Time and behaviour : psychological and neurobehavioural analyses* (pp. 41-78): Elsevier Science B.V.
- Clarke, S., Ivry, R., Grinband, J., Roberts, S., & Shimizu, N. (1996).** *Exploring the domain of the cerebellar timing system*: Elsevier Science B.V.
- Cohen, R. A., Barnes, H. J., Jenkins, M., & Elliott, A. H. (1997).** Disruption of short-duration timing associated with damage to the suprachiasmatic region of the hypothalamus. *Neurology, 48*, 1533-1539.
- Collyer, C. E., Boatright-Horowitz, S. S., & Hooper, S. (1997).** A motor timing experiment implemented using a musical instrument digital interface (MIDI) approach. *Behavior research methods, instruments and computers, 29 No 3*, 346-352.

- Collyer, C. E., Broadbent, H. A., & Church, R. M. (1992).** Categorical time production: evidence for discrete timing in motor control. *Perception & psychophysics*, *51* No 2, 134-144.
- Collyer, C. E., Broadbent, H. A., & Church, R. M. (1994).** Preferred rates of repetitive tapping and categorical time production. *Perception and psychophysics*, *55* No 4, 443-453.
- Collyer, C. E., & Church, R. M. (1998).** Interresponse intervals in continuation tapping. In D. A. C. Rosenbaum C.E. (Ed.), *Timing of Behavior* (pp. 63-87).
- Condon, W. S., & Sander, L. W. (1974).** Synchrony demonstrated between movements of the neonates and adult speech. *Child Development*, *45*, 456-462.
- Creelman, C. D. (1962).** Human discrimination of auditory duration. *Journal of the acoustical Society of America*, *34*, 582-593.
- Darcheville, J. C., Rivière, V., & Wearden, J. H. (1993).** Fixed-interval performance and self-control in infants. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *60*, 239-254.
- Delcomyn, F. (1980).** Neural basis of rhythmic behavior in animals. *Science*, *210*, 492-498.
- Demany, L., McKenzie, B., & Vurpillot, E. (1977).** Rhythm perception in early infancy. *Nature*, *266* N°5604, 718-719.
- Diamond, A. (2000).** Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex. *Child Development*, *71*, 44-56.
- Dittmar, M. L., Warm, J. S., Dember, W. N., & Ricks, D. F. (1993).** Sex differences in vigilance performance and perceived workload. *The Journal of General Psychology*, *120*, 309-22.
- Drake, C. (1998).** *Processus perceptifs et cognitifs impliqués lors de l'écoute des séquences sonores*. Non publié - Habilitation à diriger des recherches, université René Descartes et EPHE.
- Drake, C., & Baruch, C. (1995).** De la mesure de la sensibilité temporelle aux modèles d'organisation temporelle: hypothèses et données sur l'acquisition des capacités temporelles auditives. *L'Année Psychologique*, *95*, 555-569.
- Drake, C., & Botte, M.-C. (1993).** Tempo sensitivity in auditory sequences : evidence for a multiple-look model. *Perception & Psychophysics*, *54* (3), 277-286.
- 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.
- Droit-Volet, S. (2000).** Les différentes facettes du temps. *Enfances & Psy*, *13*, 26-40.
- Duchek, J. M., Balota, D. A., & Ferraro, F. R. (1994).** Component analysis of a rhythmic finger tapping task in individuals with senile dementia of the Alzheimer type and in individuals with Parkinson's disease. *Neuropsychology*, *8*, 218-226.
- Fitzpatrick, P., Schmidt, R. C., & Lockman, J. J. (1996).** Dynamical patterns in the development of clapping. *Child development*, *67*, 2691-2708.

- Fortin, C., & Breton, R. (1995).** Temporal interval production and processing in working memory. *Perception and Psychophysics*, *57*, 203-215.
- Fortin, C., & Rousseau, R. (1998).** Interference from short-term memory processing on encoding and reproducing brief durations. *Psychological Research*, *61*, 269-276.
- Fraisse, P. (1948).** Etude comparée de la perception et de l'estimation de la durée chez les enfants et les adultes. *Enfance*, *3*, 199-211.
- Fraisse, P. (1957).** *Psychologie du temps*. Paris: PUF.
- Fraisse, P. (1967).** Le seuil différentiel de durée dans une suite régulière d'intervalles. *Année Psychologique*, *1*, 43-49.
- Fraisse, P. (1971).** L'apprentissage de l'estimation de la durée et ses repères. *Année Psychologique*, *71*, 359-379.
- Fraisse, P. (1974).** *Psychologie du rythme*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Fraisse, P. (1984).** Perception and estimation of time. *Ann. Rev. Psychol.*, *35*, 1-36.
- Fraisse, P., Oléron, G., & Paillard, J. (1958).** Sur les repères sensoriels qui permettent de contrôler les mouvements d'accompagnement de stimuli périodiques. *Année Psychologique*, *58*, 321-338.
- Fraisse, P., Pichot, P., & Clairouin, G. (1969).** Les aptitudes rythmiques. Etude comparée des oligophrènes et des enfants normaux. *Journal de Psychologie Normale et pathologique*, *42*, 309-330.
- Fraisse, P., & Voillaume, C. (1971).** Les repères du sujet dans la pseudo-synchronisation. *L'année Psychologique*, *71*(2), 359-369.
- Gérard, C., & Rosenfeld, M. (1995).** Pratique musicale et régulations temporelles. *L'année psychologique*, *95*, 571-591.
- Getty, D. J. (1975).** Discrimination of short temporal intervals : a comparison of two models. *Perception & Psychophysics*, *18*, 1-8.
- Getty, D. J. (1976).** Counting processes in human timing. *Perception & Psychophysics*, *20*, 191-197.
- Gibbon, J. (1977).** Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological review*, *84*, 279-325.
- Gibbon, J. (1991).** Origins of scalar timing. *Learning and motivation*, *22*, 3-38.
- Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. H. (1984).** Scalar timing in memory. In Gibbon & Allan (Ed.), *Timing and time perception* (Vol. 263, pp. 52-77). New York: Annals New York academy of science.
- Gibbon, J., Malapani, C., Dale, C. L., & Gallistel, C. R. (1997).** Toward a neurobiology of temporal cognition : advances and challenges. *Current opinion in neurobiology*, *7*, 170-184.

- Gillette, M. U., & Tischkau, S. A. (1999).** Suprachiasmatic nucleus: the brain's circadian clock. *Recent Progress in Hormone Research*, 54, 33-58; discussion 58-9.
- Goldstone, S., & Goldfarb, J. L. (1966).** The perception of time by children. In A. K. & J. Rivoire (Ed.), *Perceptual development in children* (pp. 445-486). New York: International University Press.
- Griffiths, T. D., Johnsrude, I., Dean, J. L., & Green, G. G. R. (1999).** A common neural substrate for the analysis of pitch and duration pattern in segmented sound? *NeuroReport*, 10, 3825-3830.
- Grondin, S., & Macar, F. (1992).** Dividing attention between temporal and nontemporal tasks: a performance operating characteristic -POC- analysis. In P. V. Macar F. Friedman W.J. (Ed.), *Time, Action and Cognition - toward bridging the gap* (Vol. 66, pp. 119-128). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Grondin, S., Meilleur_Wells, G., Ouellette, C., & Macar, F. (1998).** Sensory effects on judgments of short time-intervals. *Psychological Research*, 61, 261-8.
- Guay, M., & Wilberg, R. B. (1983).** Immediate reproduction of temporal information under four cognitive strategies. *Perceptual and motor skills*, 56, 375-381.
- Harrington, D. L., & Haaland, K. Y. (1999).** Neural underpinnings of temporal processing: a review of focal lesion, pharmacological, and functional imaging research. *Reviews in the Neurosciences*, 10, 91-116.
- Harrington, D. L., Haaland, K. Y., & Hermanowicz, N. (1998).** Temporal processing in the basal ganglia. *Neuropsychology*, 12(1), 3-12.
- Harrington, D. L., Haaland, K. Y., & Knight, R. T. (1998).** Cortical networks underlying mechanisms of time perception. *The journal of neuroscience*, February 1 18(3), 1085-1095.
- Hary, D., & Moore, G. P. (1985).** Temporal tracking and synchronization strategies. *Human Neurobiology*, 4, 73-77.
- Hary, D., & Moore, G. P. (1987).** Synchronization human movement with an external clock source. *Biological Cybernetics*(56), 305-311.
- Hicks, R. E., & Allen, D. A. (1979).** The repetition effect in judgments of temporal duration across minutes, days and months. *American Journal of Psychology*, 92, 323-333.
- Hicks, R. E., & Miller, G. W. (1976).** Transfer of time judgments as a function of feedback. *American Journal of Psychology*, 89, 303-310.
- Ho, M.-Y., Velázquez-Martinez, D. N., Bradshaw, C. M., & Szabadi, E. (2002).** Hydroxytryptamine and interval timing behaviour. *Pharmacology, Biochemistry and Behavior*, 71, 773-785.
- Ivry, R. B., & Hazeltine, R. E. (1992).** Models of timing-with-a-timer. In P. V. Macar F. Friedman W.J. (Ed.), *Time, Action and Cognition - toward bridging the gap* (pp. 183-189). Netherlands: Kluwer academic publishers.

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.

Ivry, R. B., & Keele, S. W. (1989). Timing functions of the cerebellum. *J. of cognitive neuroscience*, *1*(2), 136-152.

Ivry, R. B., Keele, S. W., & Diener, H. C. (1988). Dissociation of the lateral and medial cerebellum in movement timing and movement execution. *Experimental Brain Research*, *73*, 167-80.

Ivry, R. B., & Richardson, T. C. (2002). Temporal control and coordination: the multiple timer model. *Brain and Cognition*, *48*, 117-132.

Jacquet, A. Y., Gérard, C., & Pouthas, V. (1994). *Rythmes et synchronisation chez le jeune enfant*, Poster presented at the "Troisième Journée Scientifique du Réseau CogniSeine", Programme CogniSciences du CNRS, Paris.

Jones, M. R. (1976). Time, our lost dimension: toward a new theory of perception, attention and memory. *Psychological Review*, *83*(5), 323-355.

Jones, M. R., & Boltz, M. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychological Review*, *96*, 459-491.

Jueptner, M., Rijntjes, M., Weiller, C., Faiss, J. H., Timmann, D., Mueller, S. P., & Diener, H. C. (1995). Localisation of a cerebellar timing process using PET. *Neurology*, *45*, 1540-1545.

Kampen, J. K., & Snijders, T. A. B. (2002). Estimation of the Wing-Kristofferson model for discrete motor responses. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, *55*, 159-168.

Keele, S. W., Pokorny, R. A., Corcos, D. M., & Ivry, R. (1985). Do perception and motor production share common timing mechanisms: a correctional analysis. , *60*, 173-91.

Large, E. W., & Jones, M. R. (1999). The dynamics of attending: how people track time-varying events. *Psychological Review*, *106* (1), 119-159.

Lavialle, M., Bègue, A., Papillon, C., & Vilaplana, J. (2000). Modifications of retinal afferent activity induce changes in astroglial plasticity in the Hamster circadian clock. *Glia*, *34*, 88-100.

Lockhart, J. M. (1967). Ambient temperature and time estimation. *Journal of Experimental Psychology*, *73*, 286-291.

Macar, F., Lejeune, H., Bonnet, M., Ferrara, A., Pouthas, V., Vidal, F., & Maquet, P. (2002). Activation of the supplementary motor area and of attentional networks during temporal processing. *Exp Brain Res*, *142*, 475-485.

Macar, F., & Vitton, N. (1979). Contingent negative variation and accuracy of time estimation: a study on cats. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *47*, 213-28.

- Madison, G. (2001).** Variability in isochronous tapping: higher order dependencies as a function of intertap interval. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 411-22.
- Mangels, J. A., Ivry, R. B., & Shimizu, N. (1998).** Dissociable contributions of the prefrontal and neocerebellar cortex to time perception. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 7, 15-39.
- Maricq, A. V., & Church, R. M. (1983).** The differential effects of haloperidol and methamphetamine on time estimation in the rat. *Psychopharmacology*, 79, 10-15.
- Maricq, A. V., Roberts, S., & Church, R. M. (1981).** Methamphetamine and time estimation. *Journal of experimental psychology*, 7, 18-30.
- Matell, M. S., & Meck, W. H. (2000).** Neuropsychological mechanisms of interval timing behavior. *Bioessays*, 22, 94-103.
- Mates, J. (1994a).** A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence. I. Timing and error corrections. *Biological Cybernetics*, 70, 463-73.
- Mates, J. (1994b).** A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence. II. Stability analysis, error estimation and simulations. *Biological Cybernetics*, 70, 475-84.
- Mates, J., & Aschersleben, G. (2000).** Sensorimotor synchronization: the impact of temporally displaced auditory feedback, *104*, 29-44.
- Mates, J., Radil, T., Muller, U., & Pöppel, E. (1994).** Temporal integration in sensorimotor synchronization. *j. Cog. Neurol.*, 6(4), 332-340.
- McAuley, J. D., & Kidd, G. R. (1998).** Effect of deviations from temporal expectations on tempo discrimination of isochronous tone sequences. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24 (6), 1786-1800.
- Meck, W. H. (1996).** Neuropharmacology of timing and time perception. *Cognitive brain research*, 3, 227-242.
- Michon, J. A. (1964).** Studies on subjective duration: I. Differential sensitivity in the perception of repeating temporal sequences. *Acta Psychologica*, 22, 441-450.
- Michon, J. A. (1967).** *Timing in temporal tracking*. Assen, NL.: van Gorcum.
- Nichelli, P., Alway, D., & Grafman, J. (1996).** Perceptual timing in cerebellar degeneration. *Neuropsychologia*, 34 n°9, 863-871.
- Nichelli, P., Clark, K., Hollnagel, C., & Grafman, J. (1995).** Duration processing after frontal lobe lesions(pp. 183-190): *Ann NY Acad Sci*.
- O'Boyle, D. J., Freeman, J. S., & Cody, F. W. J. (1996).** The Accuracy and Precision of Timing of Self-paced, Repetitive Movements in Subjects with Parkinson's Disease. *Brain*, 119, 51-70.

- Pastor, M. A., Artieda, J., Jahanshahi, M., & Obeso, J. A. (1992).** Time estimation and reproduction is abnormal in Parkinson's disease. *Brain, 115 Pt 1*, 211-25.
- Penton_Voak, I. S., Edwards, H., Percival, A., & Wearden, J. H. (1996).** Speeding up an internal clock in humans? Effects of click trains on subjective duration. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 22, 307-20.
- Peters, M. (1989).** The relationship between variability of intertap intervals and interval duration. *Psychological research*, 51, 38-42.
- Pöppel, E. (1978).** Time perception. In L. Held, H. Leibowitz & H. L. Teuber (Ed.), *Handbook of sensory physiology: Perception* (Vol. 8, pp. 713-729). Berlin: Springer.
- Pöppel, E. (1994).** Temporal mechanisms in perception. *International Review of Neurobiology*, 37, 185-202.
- Pöppel, E. (1997).** A hierarchical model of temporal perception. *Trends in Cognitive Science*, 1, 56-61.
- Posner, M. I., & Dehaene, S. (1994).** Attentional networks. *Trends in Neurosciences*, 17, 75-9.
- Pouthas, V., Provasi, J., & Droit, S. (1996).** Biobehavioral rhythms : development and role in early human ontogenesis. In J. T. Fraser & M. P. Soulsby (Ed.), *Dimensions of time and life : The study of time VIII* (pp. 19-30): International universities press, inc.
- Povel, D. (1981).** Internal representation of simple temporal patterns. *Journal of Experimental Child Psychology (O.P. Human Perception & Performance)*, 7 (1), 3-18.
- Povel, D.-J., & Essens, P. (1985).** Perception of temporal patterns. *Music perception*, 2 No 4, 411-440.
- Preusser, D. (1972).** The effect of structure and rate on the recognition and description of auditory temporal patterns. *Perception & Psychophysics*, 11(3), 233-240.
- Provasi (1988).** *Capacités et apprentissage de régulations temporelles chez le nourrisson dans l'activité de succion*. Non publié - Thèse de Doctorat de Psychologie, Université René Descartes - Paris 5.
- Provasi, J., & Bobin-Bègue, A. (2003, sous presse).** Spontaneous motor tempo and rhythmical synchronization in 2 1/2 & 4 years old children. *International Journal of Behavioral Developpement*.
- Provasi, J., & Marks, A. (1994).** Entraînement du rythme de succion par une cadence auditive : une approche développementale: Programme Cognosciences du CNRS, Paris, France.
- Rammsayer, T. H., & Lima, S. D. (1991).** Duration discrimination of filled and empty auditory intervals : cognitive and perceptual factors. *Peception & psychophysics*, 50(6), 565-574.

- Rammsayer, T. H., & Vogel, W. H. (1992).** Pharmacologic properties of the internal clock underlying time perception in humans. *Neuropsychobiology*, *26*, 71-80.
- Rao, S. M., Harrington, D. L., Haaland, K. Y., Bobholz, J. A., Cox, R. W., & Binder, J. R. (1997).** Distributed neural systems underlying the timing of movements. *The Journal of Neuroscience*, *17*, 5528-5535.
- Repp, B. H. (2000).** Compensation for subliminal timing perturbations in perceptual-motor synchronization. *Psychological Research*, *63*, 106-128.
- Roland, P. E., Skinhoj, E., & Lassen, N. A. (1981).** Focal activations of human cerebral cortex during auditory discrimination. *Journal of Neurophysiology*, *45*, 1139-51.
- Rubia, K., Overmeyer, S., Taylor, E., Brammer, M., Williams, S., Simmons, A., & Bullmore, E. (1998).** Prefrontal involvement in "temporal bridging" and timing movement. *Neuropsychologia*, *36* n°12, 1283-1293.
- Satinoff, E., Li, H., Tchong, T. K., Liu, C., McArthur, A. J., Medanic, M., & Gillette, M. U. (1993).** Do the suprachiasmatic nuclei oscillate in old rats as they do in young ones? *The American Journal of Physiology*, *265*, R1216-22.
- Schulze, H.-H., & Vorberg, D. (2002).** Linear phase correction models for synchronization: parameter identification and estimation of parameters. *Brain and Cognition*, *48*, 80-97.
- Schulze, H. H. (1989).** The perception of temporal deviations in isochronic patterns. *Perception & Psychophysics*, *45*, 291-296.
- Schulze, H. H. (1992).** The error correction model for the tracking of a random metronome: Statistical properties and empirical test. In P. V. Macar F. Friedman W.J. (Ed.), *Time, Action and Cognition - toward bridging the gap* (pp. 33-43). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Semjen, A., Schulze, H.-H., & Vorberg, D. (2000).** Timing precision in continuation and synchronization tapping. *Psychological Research*, *63*, 137-147.
- Semjen, A., Vorberg, D., & Schulze, H.-H. (1998).** Getting synchronized with the metronome: comparisons between phase and period correction. *Psychological Research*, *61*, 44-55.
- Serviere, J., & Laviolle, M. (1996).** [The suprachiasmatic nucleus: cellular approach to clock functioning]. , *44*, 497-508.
- Sternad, D., Dean, W. J., & Newell, K. M. (2000).** Force and timing variability in rhythmic unimanual tapping. *Journal of motor behavior*, *32* No 3, 249-267.
- Summers, J. J., Bell, R., & Burns, B. D. (1989).** Perceptual and motor factors in the imitation of simple temporal patterns. *Psychological research*, *50*, 23-27.
- Szelag, E., Kowalska, J., Rymarczyk, K., & Pöpple, E. (2002).** Duration processing in children as determined by time reproduction: implications for a few seconds temporal window. *Acta Psychologica*, *110*, 1-19.

Torre, V., Ashmore, J. F., Lamb, T. D., & Menini, A. (1995). Transduction and adaptation in sensory receptor cells. *The Journal of Neuroscience : the Official Journal of the Society For Neuroscience*, *15*, 7757-68.

Tracy, J. I., Faro, S. H., Mohamed, F. B., Pinsk, M., & Pinus, A. (2000). Functional localization of a "Time Keeper" function separate from attentional resources and task strategy. *NeuroImage*, *11*, 228-242.

Treisman, M., & Brogan, D. (1992). Time perception and the internal clock: effects of visual flicker on the temporal oscillator. *European journal of cognitive psychology*, *4(1)*, 41-70.

Treisman, M., Faulkner, A., & Naish, P. L. (1992). On the relation between time perception and the timing of motor action: evidence for a temporal oscillator controlling the timing of movement. *Quarterly Journal of Experimental Psychology. a, Human Experimental Psychology*, *45*, 235-63.

Treisman, M., Faulkner, A., Naish, P. L. N., & Brogan, D. (1990). The internal clock : evidence for a temporal oscillator underlying time perception with some estimates of its characteristics frequency. *Perception*, *19*, 705-743.

Vanneste, S. (1996). *Evolution des conduites temporelles au cours du vieillissement normal*. Non publié - Thèse de Doctorat, Paris V.

Vanneste, S., Pouthas, V., & Wearden, J. H. (2001). Temporal control of rhythmic performance : a comparison between young and old adults. *Experimental aging research*, *27*, 83-102.

Vos, P. G., & Helsen, E. L. (1992). Tracking simple rhythms: on-beat versus off-beat performance. In P. V. Macar F. Friedman W.J. (Ed.), *Time, Action and Cognition - toward bridging the gap* (pp. 33-43). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Vos, P. G., Mates, J., & Van Kruysbergen, N. W. (1995). The perceptual centre of the stimulus as the cue for synchronization to a metronome: evidence from asynchronies. *Exp Psych*, *Nov 48*, 1024-1040.

Wearden, J. H., & Penton_Voak, I. S. (1995). Feeling the heat: body temperature and the rate of subjective time, revisited. *Quarterly Journal of Experimental Psychology. B, Comparative and Physiological Psychology*, *48*, 129-41.

Wing, A. M. (2002). Voluntary timing and brain function: an information processing approach. *Brain and Cognition*, *48*, 7-30.

Wing, A. M., & Kristofferson, A. B. (1973a). Response delays and the timing of discrete motor responses. *Perception and psychophysics*, *14 No 1*, 5-12.

Wing, A. M., & Kristofferson, A. B. (1973b). The timing of interresponse intervals. *Perception and psychophysics*, *13 No 3*, 455-460.

Wittmann, M. (1999). Time perception and temporal processing levels of the brain. *Chronobiology international*, *16(1)*, 17-32.

Zakay, D. (1992). The role of attention in children's time perception. *Journal of Experimental Child Psychology*, 54, 355-371.

Zakay, D., & Block, R. A. (1996). The role of attention in time estimation processes. In M. A. Pastor & J. Atieda (Ed.), *Time, internal clocks and movement* (pp. 143-164). Amsterdam: Elsevier Science.

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques du protocole expérimental en fonction des séances	76
Tableau 2 : Résultat de l'analyse (χ^2) des réponses correctes en fonction des séances et des essais	78
Tableau 3 : Synthèse des caractéristiques de chacune des 3 phases du protocole expérimental	95
Tableau 4 : Caractéristiques du TMS en fonction de l'âge des enfants	98
Tableau 5 : Effets significatifs révélés par la comparaison de la médiane des IRI des 3 phases expérimentales (ANOVA)	99
Tableau 6 : Effets significatifs révélés par la comparaison de la variabilité des IRI des 3 phases expérimentales (ANOVA)	104
Tableau 7 : Synthèse des caractéristiques de chacune des 3 phases du protocole expérimental	121
Tableau 8 : Caractéristiques du TMS en fonction de l'âge des enfants	123
Tableau 9 : Effets significatifs révélés par la comparaison des médianes des IRI des 3 phases expérimentales	124
Tableau 10 : Effets significatifs révélés par la comparaison de la variabilité des IRI des 3 phases expérimentales	127
Tableau 11 : Différences significatives entre les groupes d'âge révélées par l'étude de la variabilité au cours des 3 phases expérimentales	128
Tableau 12 : Effets significatifs à 3 ans révélés par la comparaison de la variabilité des 3 phases expérimentales	130
Tableau 13 : Comparaison des données de la présente étude et de celles de Provasi & Bobin-Bègue (2003) concernant les caractéristiques du TMS entre 1,5 et 4,5 ans	151

INDEX DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Synthèse des données de différentes études concernant l'évolution du TMS au cours de l'enfance	15
Figure 2 : Anatomie du cervelet	38
Figure 3 : Coupe du cervelet et localisation des noyaux gris	40
Figure 4 : Localisation des noyaux gris centraux	41
Figure 5 : Boucles de contrôle : Interrelations fonctionnelles entre les noyaux gris centraux, le cortex et le thalamus	44
Figure 6 : Relation entre neurotransmetteurs et structures cérébrales impliquées (d'après Meck, 1996) Acétylcholine (Ach) ; Dopamine (DA) ; Récepteurs à la dopamine (D1 et D2) ; Encéphaline ; acide γ-aminobutyrique (GABA) ; L-glutamate (Glu) ; Substance P .	49
Figure 7 : Pourcentage de réponses correctes en fonction des séances et de l'âge des enfants	78
Figure 8 : Pourcentage de réponses correctes des enfants de 4 ans en fonction des séances	80
Figure 9 : Relation temporelle entre le stimulus auditif duffusé, la définition de la fenêtre temporelle et la date de la frappe pour l'obtention d'un renforcement visuel	93
Figure 10 : Représentation de la répartition des IRI en fonction de l'âge des enfants et en fonction des essais	99
Figure 11 : Valeur de la médiane réduite des IRI en fonction de la phase expérimentale	100
Figure 12 : Comparaison des médianes réduites des IRI en fonction de la phase expérimentale	101
Figure 13: Comparaison des médianes réduites des IRI en fonction de la phase expérimentale	102
Figure 14 : Comparaison des médianes réduites des IRI en fonction des essais de la phase de synchronisation	103
Figure 15 : Comparaison de la variabilité des IRI en fonction de la phase expérimentale (moyenne des essais pour la phase de synchronisation)	105
Figure 16 : Comparaison de la variabilité des IRI en fonction de la phase expérimentale	106

Figure 17 : Comparaison de la variabilité des IRI en fonction de la phase expérimentale	107
Figure 18 : Comparaison de la variabilité des IRI en fonction des essais de la phase de synchronisation	108
Figure 19 : Pourcentage de frappes renforcées en fonction des essais de la phase de synchronisation	109
Figure 20 : Pourcentage de frappes anticipées, tout âge confondu, en fonction des essais de la phase de synchronisation	110
Figure 21 : Pourcentage de frappes anticipées en fonction de l'âge au cours des essais de la phase de synchronisation	111
Figure 22 : Comparaison des médianes réduites des IRI en fonction des essais des 3 phases expérimentales	125
Figure 23 : Comparaison de la médiane réduite des IRI en fonction des essais de la phase de synchronisation	126
Figure 24 : Comparaison de la variabilité des IRI en fonction des essais des 3 phases expérimentales	129
Figure 25 : Comparaison de la variabilité des IRI en fonction des essais de la phase de synchronisation	131
Figure 26 : Pourcentage de frappes renforcées en fonction des essais de la phase de synchronisation	132
Figure 27 : Pourcentage de frappes anticipées en fonction des essais de la phase de synchronisation	133
Figure 28 : Caractéristiques du TMS entre 1 et 3 ans	140
Figure 29 : Comparaison de la phase de TMS2 en fonction de la séance	141
Figure 30 : Comparaison de la médiane réduite des IRI des essais de la phase de synchronisation en fonction de la séance	143
Figure 31 : Variabilité des IRI en fonction de la séance	144
Figure 32 : Comparaison de la variabilité au cours des essais de la phase de synchronisation en fonction de la séance	145
Figure 33 : Pourcentage de frappes anticipées au cours des essais de la phase de synchronisation en fonction de la séance	146
Figure 34 : Synthèse des données de différentes études concernant l'évolution du TMS au cours de l'enfance	152