



HAL
open science

Développement, temps et attention : comportements et modélisation.

Quentin Hallez

► **To cite this version:**

Quentin Hallez. Développement, temps et attention : comportements et modélisation.. Psychologie. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2019. Français. NNT : 2019CLFAL006 . tel-02310658

HAL Id: tel-02310658

<https://theses.hal.science/tel-02310658>

Submitted on 10 Oct 2019

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.



Développement, Temps et Attention : Comportement et Modélisation

THÈSE en vue de l'obtention du
DOCTORAT en psychologie

Par **Quentin HALLEZ**

Sous la direction du Professeure
Sylvie DROIT-VOLET

Membres du jury :

Sylvie DROIT-VOLET - Professeure des universités, Laboratoire de Psychologie Sociale et Cognitive - CNRS, UMR 6024, Université Clermont-Auvergne.

Sandrine GIL - Professeure des universités, Centre de Recherche sur la Cognition et l'Apprentissage, UMR 7295, Université de Poitiers. (Rapporteuse).

Martial MERMILLOD - Professeur des universités, Laboratoire de Psychologie et Neuro-cognition, CNRS, UMR 5105, Université Grenoble Alpes.

François OSIURAK - Professeur des Universités, Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs - EA3082, Université Lumière Lyon 2.

Anne-Claire RATTAT - Maître de conférences, Laboratoire Sciences de la Cognition, Technologie, Ergonomie - EA 7420, Institut National Universitaire Champollion.

Valérie TARTAS - Professeure des universités, Laboratoire Cognition, Langues, Langages, Ergonomie, UMR 5263, université de Toulouse. (Rapporteuse).



Université Clermont Auvergne

UFR de Psychologie Sociale, Sciences Sociales et Sciences de l'Éducation
Laboratoire de Psychologie Sociale et Cognitive - CNRS, UMR 6024



THÈSE

Soutenue publiquement le 18 Juillet 2019

Présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Psychologie

Développement, Temps et Attention : Comportement et Modélisation

Par Quentin HALLEZ

Réalisée sous la direction du Professeure Sylvie DROIT-VOLET

Membres du jury :

Sylvie DROIT-VOLET - Professeure des universités, Laboratoire de Psychologie Sociale et Cognitive - CNRS, UMR 6024, Université Clermont-Auvergne.

Sandrine GIL - Professeure des universités, Centre de Recherche sur la Cognition et l'Apprentissage, UMR 7295, Université de Poitiers. (Rapporteuse).

Martial MERMILLOD - Professeur des universités, Laboratoire de Psychologie et Neuro-cognition, CNRS UMR 5105, Université Grenoble Alpes.

François OSIURAK - Professeur des Universités, Laboratoire d'Etude des Mécanismes Cognitifs - EA3082, Université Lumière Lyon 2.

Anne-Claire RATTAT - Maître de conférences, Laboratoire Sciences de la Cognition, Technologie, Ergonomie - EA 7420, Centre Université de Formation et de Recherche Jean-François Champollion.

Valérie TARTAS - Professeure des universités, Laboratoire Cognition, Langues, Langages, Ergonomie, UMR 5263, université de Toulouse. (Rapporteuse).

Tout démarre d'une page blanche...

Remerciements

J'adresse mes premiers remerciements à Sylvie Droit-Volet. Sachez que par votre simple présence et par l'engouement que vous portez pour la recherche, vous mettez à mal tout manque de motivation ou d'idée. Au cours de ces 3 années de doctorat, j'ai appris que votre professionnalisme n'avait d'égal que votre grand cœur. Profondément bienveillante, vous avez toujours su être à mon écoute. Vous avez été une réelle source d'inspiration pour moi, merci pour votre encadrement sans faille.

Je remercie également Martial Mermillod pour sa disponibilité tant pour la formation qu'il m'a dispensée sur la modélisation en réseau de neurones, que pour le suivi du travail relatif à ce sujet.

Plus généralement, je remercie tous les rapporteurs et les membres du jury pour le temps et l'intérêt qu'ils ont consacrés à évaluer ce travail de thèse.

Je tiens également à remercier tous les enfants qui se sont portés volontaires pour participer à ces expériences, parfois longues, ainsi que tous les professeurs et les directeurs ayant permis leurs réalisations.

Mes prochains remerciements iront à ma famille, notamment à mon père pour lequel ces mots expriment insuffisamment toute ma reconnaissance envers son soutien indéfectible. Je remercie bien évidemment aussi ma mère qui, bien qu'éloignée n'a pas cessé de m'encourager. Merci aussi à Aurélien, Aurélie et à ma sœur. Enfin, je remercie Armand, même s'il m'a poussé à tout sauf au travail. Merci à vous d'avoir toujours cru en moi.

Merci aussi à Sandrine, Alice et Aurélie pour leur aide dans la relecture de ma thèse. Sandrine, je te remercie également pour ton accompagnement depuis la maternelle.

Je souhaite également remercier ma belle-famille. Merci à Denis et à Nathalie pour votre accueil dans votre famille. Sachez que je suis fier d'y être un membre à part entière. Merci aussi à Marine et à Charly.

Enfin, je remercie cette thèse, sans qui je n'aurai jamais rencontré Alisée. Si ma thèse s'arrête au terme de ces 3 années, j'ai encore tout le reste de ma vie pour te découvrir. Ce n'est pas ici le lieu pour se laisser s'emporter dans une envolée lyrique, ni le moment d'ailleurs. J'espère te faire savoir chaque jour ô combien tu es importante pour moi et à quel point j'ai besoin de toi dans ma vie...

Table des matières

INFUNDIBULUM	1
CHAPITRES THEORIQUES	4
CHAPITRE I : LES CONDUITES D'ESTIMATION DU TEMPS CHEZ L'HOMME.	5
I – METHODE D'ETUDE CHEZ L'HOMME.....	7
I – 1. Méthodes de comparaison (tâches de discrimination, de bissection et de généralisation)	8
I – 1.1. Présentations des méthodes.....	8
I – 1.2. Utilisation des méthodes de discrimination chez le jeune enfant	13
I – 2. Tâches de Production et Reproduction temporelle	17
I – 2.1. Présentation des diverses méthodes	17
I – 2.2. Utilisation des méthodes de production et reproduction chez le jeune enfant	19
II – LES GRANDES PROPRIETES DU JUGEMENT DU TEMPS	21
II – 1. Propriété scalaire du temps et loi de Weber.....	21
II – 2. La variation de la perception du temps	23
II – 2.1. L'effet de modalité sensorielle.....	23
II – 2.2. L'erreur d'ordre temporel	25
II – 2.3. L'effet Vierordt.....	25
CHAPITRE II : LES MODELES DE LA PERCEPTION DU TEMPS	28
I – LES MODELES DITS « PACEMAKER-ACCUMULATOR ».....	28
I – 1. Le modèle de Treisman (1963).....	28
I – 2. Le modèle de traitement de l'information temporelle de Gibbon, Church et Meck (1984).....	31
II – LES MODELES DITS « OSCILLATORS / COÏNCIDENCE-DETECTION »	35
II – 1. Les modèles de détection de coïncidence	36
II – 1.1. Le modèle de fréquence de battement de Miall (1989).....	36
II – 1.2. Le modèle de fréquence de battement striatal de Mattel et Meck (2000).....	37
II – 1.3. Le modèle connexionniste de Church et Broadbent.	39
III - STRUCTURES CORTICALES IMPLIQUEES DANS LES MODELES.....	42
CHAPITRE III : DEVELOPPEMENT DE LA PERCEPTION ET DE L'ESTIMATION DU TEMPS.....	45
I – D'UN TEMPS AUTOMATIQUE A UN TEMPS CONTROLE	45
I – 1. Le traitement temporel primitif et automatique	45
I – 1.1. Régulation des activités rythmiques	45
I – 1.2. Procédure d'apprentissage comportemental basé sur le conditionnement temporel : Régulation des activités non-rythmiques	47
I – 2. D'un jugement implicite à un jugement explicite du temps : le temps représenté et contrôlé.....	48
I – 2.1. Un temps procédural chez le jeune enfant de 3 ans	48
I – 2.2. Conceptualisation et homogénéisation du temps chez l'enfant de 5 à 8 ans	51
II – UN PROBLEME DE CAPACITES COGNITIVES	52
II – 1. La Mémoire.....	52
II – 2. L'Attention	57
CHAPITRE IV : ATTENTION ET DEVELOPPEMENT.....	57
I – LES PROCESSUS ATTENTIONNELS	57
I – 1. Fonction d'intensité.	58
I – 2. Fonction de sélection et impact du contexte	61
I – 2.1. Définition	61
I – 2.2. Répercussion des émotions	63

I – 3. <i>Le contrôle attentionnel</i>	64
I – 3.1. Définition	64
I – 3.2. Le modèle de Baddeley et Hitch (1974)	65
II – PERSPECTIVE DEVELOPPEMENTALE DES PROCESSUS ATTENTIONNELS	66
II – 1. <i>Substrat neurologique de l'attention</i>	66
II – 2. <i>Développement du substrat attentionnel</i>	72
CHAPITRE V : ETUDES ATTENTION – TEMPS : APPROCHE DEVELOPPEMENTALE ET QUESTIONS POSEES	77
I – LE PARADIGME DE DOUBLE-TACHE APPLIQUE AU TEMPS	77
II – LES MODELES ATTENTIONNELS	78
II – 1. <i>Modèle de Thomas et Weaver (1975)</i>	78
II – 2. <i>Le modèle attentionnel de Zakay et Block</i>	81
II – 2.1. Présentation du modèle.....	81
II – 2.2. Discussion du modèle.....	82
III – ATTENTION ET ESTIMATION DU TEMPS CHEZ L'ENFANT : SON ETUDE ET LES PERSPECTIVES DE RECHERCHES	84
CHAPITRES EXPERIMENTAUX	86
AXE I : TEMPS ET NEUROPSYCHOLOGIE DEVELOPPEMENTALE	89
I – 1. MODELISATION DU DEVELOPPEMENT DES CAPACITES DE DISCRIMINATION DU TEMPS AU SEIN D'UNE TACHE DE BISSECTION TEMPORELLE AUPRES D'UNE POPULATION AGE DE 3 A 19 ANS.....	89
<i>Introduction</i>	90
<i>Method</i>	91
Participants	91
Material and Procedure.....	92
<i>Results</i>	94
Proportion of long responses.....	94
Bisection Point	94
Weber Ratio	98
<i>Discussion</i>	101
I – 2. ETUDE DE LA CONTRACTION TEMPORELLE CAUSEE PAR UNE DOUBLE-TACHE EN SITUATION DE REPRODUCTION TEMPORELLE CHEZ DES ENFANTS AGES DE 5 A 7 ANS ET CHEZ LES ADULTES.	104
<i>Introduction</i>	105
<i>Method</i>	108
Participants	108
Materials	108
Procedure	109
<i>Results</i>	110
Temporal performance.....	110
Correlations between the single-/dual-task difference in reproduced durations and cognitive abilities.....	112
Non-temporal performance.....	115
Correlations between the single-/dual-task difference in non-temporal performance and cognitive abilities.....	116
<i>Discussion</i>	117
I – 3. ETUDE DES DIFFERENCES DE CONTRACTION TEMPORELLE ENTRE UNE SIMPLE ET UNE DOUBLE-TACHE SELON QUE LA NATURE DE LA TACHE CONCURRENT (TEMPORELLE VS NON-TEMPORELLE) CHEZ DES ENFANTS AGES DE 5 A 8 ANS ET DES ADULTES.	122
<i>Introduction</i>	123
<i>Method</i>	126
Participants	126
Material.....	127
Procedure	127
<i>Results</i>	130
Performance in temporal reproduction.....	130

Single/dual-task difference:	131
Correlations between the single/dual- task difference in reproduced durations and cognitive abilities	133
Performance in discrimination tasks.....	135
Correlations between single/dual-task difference in discrimination performance and cognitive abilities.....	136
<i>Discussion</i>	137
I – 4. ETUDE DU TRAITEMENT SIMULTANEE DE DUREES CHEZ DES ENFANTS ET DES ADULTES QUAND L’ATTENTION PREDIT L’EFFET D’INTERFERENCE.	143
HALLEZ, MONIER & DROIT-VOLET (SUBMITTED).....	143
<i>Introduction</i>	144
<i>Experiment 1</i>	146
Method	146
Procedure	147
Results.....	148
Discussion	153
<i>Experiment 2</i>	154
Method	154
Results.....	157
<i>General discussion</i>	163
I – 5. ETUDE DE LA CONTRACTION TEMPORELLE CAUSEE PAR UN DISTRACTEUR EN SITUATION DE BISSECTION TEMPORELLE CHEZ DES ENFANTS AGES DE 5 A 8 ANS.	170
<i>Introduction</i>	172
<i>Method</i>	172
Participants	172
Material	172
Procedure	173
<i>Results</i>	175
Temporal performances	175
Correlations between the underestimation of time and the cognitive abilities	178
<i>Discussion</i>	180
AXE II – TEMPS ET CONTEXTE	181
II – 1. EXPERIENCE TESTANT L’EFFET DE LA MODALITE SENSORIELLE SUR LE JUGEMENT DU TEMPS DANS UNE TACHE DE BISSECTION TEMPORELLE.	181
<i>Introduction</i>	182
<i>Method</i>	185
Participants	185
Material	185
Procedure	185
<i>Results</i>	187
Temporal Performance.....	187
Correlation between temporal performance and neuropsychological scores.....	190
<i>Discussion</i>	193
II – 2. ETUDE DU CONTEXTE TEMPOREL SUR LE JUGEMENT DU TEMPS CHEZ LES ENFANTS ET LES ADULTES.	197
<i>Introduction</i>	198
<i>Methods</i>	200
Participants	200
Apparatus and stimuli	200
Procedure	201
Data analysis	202
<i>Results</i>	203
Mean in temporal reproduction	203
Variance in temporal reproduction	204

Global context effect	204
Local context effects	205
<i>Discussion</i>	208
II – 3. ÉTUDE SUR L'EFFET DU CONTEXTE SOCIAL SUR LES JUGEMENTS DU TEMPS CHEZ L'ENFANT AGE DE 4 A 7 ANS.	212
<i>Introduction</i>	213
<i>Method</i>	215
Participants	215
Material	216
Procedure	216
<i>Results</i>	218
Control condition	219
Movement condition	219
Object movement condition	221
Aging condition	222
Emotion condition	222
<i>Discussion</i>	223
AXE III : TEMPS ET MODÉLISATION	227
III – 1. CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU MECANISME D'HORLOGE INTERNE DEVELOPPEMENTAL.	227
<i>Introduction</i>	228
<i>Virtually based internal clock system</i>	233
Model construction and stimuli	233
Computer simulation	236
<i>Final internal clock, integrating the 4 criteria variables</i>	241
Model construction and Stimuli	241
Simulation	242
<i>Real based internal clock</i>	243
Model construction and stimuli	243
Computer Simulations	246
<i>Discussion</i>	248
DISCUSSION GENERALE	252
I - TEMPS ET NEUROPSYCHOLOGIE DEVELOPPEMENTALE	253
I – 1. <i>Le rôle prépondérant de l'attention</i>	254
I – 2. <i>Le rôle du temps de réaction</i>	259
I – 3. <i>Limitations et futures recherches</i>	260
II – TEMPS ET CONTEXTE	261
II – 1. <i>Contexte et mémoire</i>	261
II – 2. <i>Limitations et futures recherches</i>	264
III - MODELISATION DE L'HORLOGE	265
III – 1. <i>Influences de la Cognitive Plastic Clock model (CPC model)</i>	265
III – 2. <i>Limitations et futures recherches</i>	268
CONCLUSION GENERALE.	269
BIBLIOGRAPHIE	270

Table des illustrations

<i>Figure 1.</i> Représentation schématique des différentes échelles de durées, selon Buhusi et Meck (2005).	6
<i>Figure 2.</i> Courbe psychophysique typique obtenue par l'Homme lors d'une tâche de bissection temporelle, avec le point de bissection (BP) et la Difference-Limen (D) matérialisés par la jonction des lignes pointillées en noir et gris, respectivement.....	11
<i>Figure 3.</i> Courbe psychophysique typique d'une tâche de généralisation temporelle.....	13
<i>Figure 4.</i> Courbes de Bissection (A) et de Généralisation Temporelle (B) chez des enfants âgés de 3 ans (en haut), 5 ans (au centre) et 8 ans (en bas), tirées de Droit-Volet & Wearden (2001), et Droit-Volet, Clément & Wearden (2001).	16
<i>Figure 5.</i> Reproduction temporelle et variabilité typique d'adultes, avec la durée physique représentée en ligne pointillée.	18
<i>Figure 6.</i> Reproduction temporelle et variabilité associées aux enfants de 4-5 ans (en rouge), 6-7 ans (en vert) et 8-9 ans (en bleu), avec la durée physique représentée en ligne pointillée.	20
<i>Figure 7.</i> (A) Augmentation proportionnelle de la variance avec la durée du stimulus (B) taux de réponse moyen par minute en fonction de la durée du signal pour des animaux testés avec des durées de 8, 12 et 21 s. Tiré de Shi, Church & Meck, 2013.	22
<i>Figure 8.</i> Intervalles moyens reproduits dans la modalité auditive (en noir) et visuelle (en blanc). Extrait de Wearden, Todd et Jones (2006).	24
<i>Figure 9.</i> Illustration de l'effet Vierordt, avec en noir des productions typiques d'adultes et en gris, une reproduction parfaite de la durée.	26
<i>Figure 10.</i> Représentation de la « Ready – Set – Go » task.....	27
<i>Figure 11.</i> Représentation schématique du modèle d'horloge interne de Treisman (1963).....	29
<i>Figure 12.</i> Le pacemaker calibré selon Treisman (2013).....	30
<i>Figure 13.</i> Modèle d'horloge interne de traitement de l'information temporelle de Gibbon, Church et Meck (1984).	31
<i>Figure 14.</i> Systèmes existants permettant de rendre compte du traitement du temps de plusieurs durées en parallèle. Le panneau (A) décrit un système à un seul pacemaker et un seul accumulateur. Le panneau (B) décrit plusieurs accumulateurs dépendants d'un même pacemaker. Enfin, le panneau (C) est un système à plusieurs accumulateurs indépendants (MIA). Les entités avec les lignes pointillées désignent les éléments du système qui permettent le temps parallèle. Extrait de van Rijn & Taagten, 2008.	33
<i>Figure 15.</i> Représentation de l'activité rythmique d'un groupe de 6 oscillateurs à fréquences diverses, avec le codage temporel correspondant à la durée t_1	37
<i>Figure 16.</i> Modèle de fréquence de battement striatal, selon Mattel et Meck (2000).....	39
<i>Figure 17.</i> Modèle connexionniste de l'horloge interne selon Church et Broadbent (1990). V_s = Vecteur de stockage ; V_r = Vecteur de référence ; V_{st} = Vecteur de stockage transformé.	41
<i>Figure 18.</i> Théorie Bayésienne de l'inférence perceptuelle du temps, en lien avec un modèle d'horloge interne. Extraite de Rhodes, 2018.....	53
<i>Figure 19.</i> Reproductions du temps dans différents contextes temporels, la condition de distribution longue en rouge, intermédiaire en marron et courte en noir. Extrait de Jazayeri & Shadlen (2010). ...	55
<i>Figure 20.</i> Les composantes de l'attention, selon Cohen, 1993 ; Norman & Shallice, 1986 ; Posner & Rafal, 1987 ; van Zomeren & Brouwer, 1994.	58
<i>Figure 21.</i> Modèle de mémoire de travail (selon Baddeley & Hich 1974 ; Baddeley, 2000).	65

<i>Figure 22.</i> (A) Représentation schématique du modèle d'attention du réseau de neurones initialement décrit par Posner et ses collaborateurs (Posner, 1995, Posner & Rothbart, 1991). (B) Représentation schématique des régions corticales et sous-corticales impliquées dans l'attention. Le réseau antérieur (en bleu) comprend le Cortex Préfrontal (CPF), l'Aire Motrice Supplémentaire (AMS) et le Gyrus Cingulaire antérieur (GCA). Le réseau postérieur (en rouge) comprend le Sillon Intrapariétal (SIP), les colliculi supérieurs (CS), le noyau pulvinar (P) et le cervelet. Enfin, le réseau de vigilance (en rouge) comprend la jonction temporo-pariétale (JTP), le cortex préfrontal dorsolatéral (CPFDL) et le cortex frontal insulaire ventral (CFIV).....	68
<i>Figure 23.</i> Méta-analyse de 5 études utilisant un paradigme de Stroop exposant une activation cingulaire antérieure. Extrait de Parasuraman (2000).	70
<i>Figure 24.</i> Représentation des substrats neuronaux de l'attente temporelle. Extrait de Coull (2009)...	72
<i>Figure 25.</i> Maturation de la matière grise au cours du développement. Vue latérale droite du cerveau montrant la séquence dynamique des changements temporels du volume de la matière grise sur la surface corticale. Les images représentent des données modélisées issues de 52 examens IRM anatomiques effectués chez 13 personnes âgées de 4 à 21 ans, chacune balayée quatre fois à intervalles d'environ deux ans. L'échelle de couleur représente les unités de volume de matière grise. (Graphique extrait de Lenroot & Giedd, 2006).	74
<i>Figure 26.</i> Myélinisation du cerveau à travers le développement. En haut, images IRM (Image par Résonance Magnétique) axiales d'un enfant capturées de façon longitudinale, montrant une augmentation de la taille du cerveau et de l'intensité de la substance blanche liée à l'âge. En bas, images DTI (Diffusion tensor imaging) de la tractographie de la substance blanche dans une comparaison transversale montrant une augmentation liée à l'âge de l'organisation de la substance blanche du corps calleux. Chaque panneau représente un sujet. L'échelle de couleur représente l'anisotropie fractionnelle ; des valeurs plus élevées sont en corrélation avec une plus grande organisation des pistes de fibres. Extraite de Tau & Peterson (2009).	75
<i>Figure 27.</i> Equation fonctionnelle du modèle de Thomas & Weaver (1975).	79
<i>Figure 28.</i> Modèle de portail attentionnel selon Zakay et Block (1994).....	82
<i>Figure 29.</i> Schéma des différents fonctionnements de l'interrupteur attentionnel au sein de l'horloge interne. X1 et X2 correspondent à des durées pour lesquelles l'interrupteur est fermé, et les unités temporelles sont accumulées. « Y » correspond à l'ouverture de l'interrupteur, quand les unités temporelles sont perdues. Extrait de Lejeune, 1998.....	83
<i>Figure 30.</i> Mean bisection points for each age year going from 3 to 19 years, for the short (0.5/1.0-s) and the long (5/10-s) duration condition.	95
<i>Figure 31.</i> Empirical data (dotted lines) and fitted functions (continuous lines) of the bisection points plotted against the participants' age in months for the short (0.5/1.0-s) and the long (5/10-s) duration condition.....	97
<i>Figure 32.</i> Mean Weber Ratio for each age year going from 3 to 19 years, for the short (0.5/1.0-s) and the long (5/10-s) duration condition.	98
<i>Figure 33.</i> Empirical data (dotted lines) and fitted functions (continuous lines) of the Weber Ratio plotted against the participants' age in months for the short (0.5/1.0-s) and the long (5/10-s) duration condition.....	100
<i>Figure 34.</i> Mean reproduced durations in children aged 5, 6, and 7 years for the simple task (ST) and the dual task (DT) for the 6-s and 12-s target durations.....	111
<i>Figure 35.</i> Standard deviations of reproduced durations in children aged 5, 6, and 7 years for the simple task (ST) and the dual task (DT) for the 6-s and 12-s target durations.....	113
<i>Figure 36.</i> Correct response rates in the non-temporal task for the single task and dual task (DT) when the stimulus durations were 6 s and 12 s in children aged 5, 6, and 7 years.	117

<i>Figure 37.</i> Experimental design used in the two experimental conditions: (A) with the concurrent non-temporal discrimination task used in the dual task, and (B) the concurrent temporal discrimination task used in the dual task. The participants performed two single tasks (counterbalanced between subjects) before the dual task: a discrimination task and a temporal reproduction task.	129
<i>Figure 38.</i> Mean reproduced duration for children aged 5, 6 and 7 years as well as adults in the single task condition and the dual-task condition for the 6-s and 12-s with the concurrent non-temporal discrimination task and the concurrent temporal discrimination task.	131
<i>Figure 39.</i> Proportion of correct responses for the non-temporal and the temporal discrimination task in the single task condition and the dual-task condition with the temporal reproduction task for the children aged 5, 6, 7 years and adults.	136
<i>Figure 40.</i> Mean temporal Time Error paired with different (A) conditions of timing (solo, dual and triple timing) and (B) duration of timing (3, 6 seconds).	150
<i>Figure 41.</i> Attention scores plotted against the mean difference in temporal error between multi- and single timing.	151
<i>Figure 42.</i> Illustration of the experimental conditions.	156
<i>Figure 43.</i> Mean reproduced duration for the two conditions of timing (solo, dual) for both the 4 and 6s duration.	157
<i>Figure 44.</i> Attention scores plotted against the mean difference in temporal error between dual- and single timing.	158
<i>Figure 45.</i> Standard deviation (SD) of reproduced duration with age groups (5-6, 7-8 and adults), for the conditions of timing (solo, dual) and target durations (6, 12s).	160
<i>Figure 46.</i> Summarizing graphic of the mean reproduced Temporal Error for each age group according to the each condition of overlap (16, 33%), appearance of the target duration (1 st , 2 nd) and additional duration (longer, shorter).	161
<i>Figure 47.</i> Illustration of the internal clocks adapted from van Rijn & Taagten, 2008 with (A) an internal clock with a single pacemaker and a single accumulator, (B) multiple dependent accumulators, (C) multiple independent accumulators and (D) the model we proposed with multiple independent accumulators.	166
<i>Figure 48.</i> Illustration of the complex circles used as distractor.	173
<i>Figure 49.</i> Proportion of long responses - $p(\text{long})$ - plotted against the stimulus durations for the trials with and without distractor in the short (400-1500ms) and the long (600-1950ms) duration condition for 5-, 6-, 7- and 8 years.	176
<i>Figure 50.</i> Mean (A) Bisection point and (B) Weber Ratio for each age (4, 6, 7 and 8 years old) and condition (with or without distractor).	178
<i>Figure 51.</i> Proportion of long responses plotted against comparison durations for the auditory and the visual stimuli for the adults, the 8-year-olds and the 5-year-olds.	188
<i>Figure 52.</i> Bisection point for the auditory and the visual stimuli for the 5-year-olds, the 8-year-olds and the adults.	189
<i>Figure 53.</i> Ready-set-go procedure: (a) temporal context, (b) procedure.	202
<i>Figure 54.</i> Average reproductions of the durations (A) and CV value (B) for the different age groups. Error bars represent the standard error of the mean.	204
<i>Figure 55.</i> Average difference of the 0.9 s reproduction between the short and the long context for the different age groups. Error bars represent the standard error.	205
<i>Figure 56.</i> The weight of previous durations as quantified by the beta estimates of our linear mixed models. Figure A shows the effect of previous <i>objective</i> duration on the current reproduction, whereas figure B shows the effect of previous <i>subjective</i> duration on the current reproduction. To disentangle	

performance drift from the effect of previous subjective duration, Figure C and D shows the weights of the previous relative error and previous reproduction on the current relative error, respectively.....	208
<i>Figure 57.</i> Illustration of the temporal reproduction task used in the reference phase and of the different silhouettes used in the experiment testing phase	218
<i>Figure 58.</i> Mean temporal standard errors for children “with” or “without” theory of mind (ToM) in the control condition (a walking man) for the 4-s and 8-s target durations.....	219
<i>Figure 59.</i> Mean temporal standard errors for children “with” or “without” theory of mind (ToM) in the movement condition (running, walking, and crawling) for the 4-s and 8-s target durations.....	220
<i>Figure 60.</i> Mean temporal standard errors for children “with” or “without” theory of mind (ToM) in the object-movement condition (cycling, walking, and overburdened) for the 4-s and 8-s target durations	221
<i>Figure 61.</i> Mean temporal standard errors for children “with” or “without” theory of mind (ToM) in the aging condition (old and young) for the 4-s and 8-s target durations.....	222
<i>Figure 62.</i> Mean temporal standard errors for children with or without theory of mind (ToM) for the emotion condition (joy and sad) for the 4-s and 8-s target durations	223
<i>Figure 63.</i> Connectionist model of the internal clock, according to Church and Broadbent, 1990. Vs = Storage vector; Vr = reference vector; Vst = Transformed storage vector.....	229
<i>Figure 64.</i> Matell and Meck’s Striatal Beat Frequency model, extracted from Matell & Meck, 2000	231
<i>Figure 65.</i> Simple Recurrent Model: x_t , input vector at the time, t ; ht , hidden layer vector at time t ; yt output vector, A, R, U parameters paired with each layer.....	234
<i>Figure 66.</i> Representation of (A) oscillation’s value for each oscillator, and (B) their relative spectrum value obtained by Fourier transformation.	236
<i>Figure 67.</i> Illustration of the (A) Euclidean distance and (B) cumulated Euclidean distance for each millisecond’s prediction.	237
<i>Figure 68.</i> Illustration of temporal dispersion coefficient dispersion matched with all the modalities of our 4 variables (neurons, epochs, plasticity, informations within database). The black dot represents the matched dispersion coefficient of the model described in section 2.1.1.	241
<i>Figure 69.</i> Illustration of data fit with (A) the Euclidean distance values observed from the SRN model in blue and estimated by the MLP model in orange with time t as well as (B) the paired square errors.	243
<i>Figure 70.</i> temporal estimation bias plotted against age in month.....	244
<i>Figure 71.</i> Final architecture of the internal clock system neural network. The neuropsychological tests as well as age in month situated as inputs predicts, through a hidden layer the state of the 4 criteria variables of the internal clock, which allows to predict the final temporal bias.	246
<i>Figure 72.</i> Illustration of the fitting of the data for (A) the model with 29 hidden neurons (three hidden layers 15 – 11 – 3) and (B) the model with 24 neurons (two hidden layers 15 – 9).....	248

Table des tableaux

Table 1. <i>Tableau d'un vecteur de stockage représentant une durée de 17secondes : (0.2 + 0.8 + 3.2 + 12.8 = 17s).</i>	41
Table 2. <i>Means, standard deviations, and minimums and maximums of raw scores for different neuropsychological tests.</i>	113
Table 3. <i>Correlation matrix between age and the raw scores of neuropsychological test.</i>	114
Table 4. <i>Correlations between simple-/dual-task differences in reproduction durations, ages, and scores on neuropsychological tests.</i>	114
Table 5. <i>Mean, Standard Deviation, minimum and maximum of raw scores of different neuropsychological tests.</i>	133
Table 6. <i>Correlation between the single/dual-task difference in reproduced duration, the age and the different neuropsychological scores with the concurrent non-temporal discrimination task and the concurrent temporal discrimination task used in the dual-task condition.</i>	134
Table 7. <i>Hierarchical regression analysis on the overall single/dual-task difference in reproduced duration for the concurrent non-temporal discrimination task used in the dual-task condition.</i>	134
Table 8. <i>Correlations between single/dual-task differences in the proportion of correct responses, the age and the z-score of neuropsychological tests for the non-temporal discrimination task and the temporal discrimination task in the dual task condition with the same temporal reproduction task.</i> .	137
Table 9. <i>Mean, Standard Deviation, minimum and maximum of raw scores of different neuropsychological tests in the different age groups for Experiment 1 and 2.</i>	148
Table 10. <i>Correlations between the age, the attention and working memory scores and the difference in time error between different characteristics of multi-timing in the dual timing condition.</i>	163
Table 11. <i>Mean, Standard Deviation, minimum and maximum of the raw scores of different neuropsychological tests.</i>	179
Table 12. <i>Mean, Standard Deviation, minimum and maximum of the raw scores of different neuropsychological tests.</i>	179
Table 13. <i>Mean and standard error of Bisection Point and Weber Ratio for the auditory and the visual duration for the 5-year-olds, the 8-year-olds and the adults.</i>	190
Table 14. <i>Raw scores on neuropsychological tests in children and adults</i>	190
Table 15. <i>Correlations between the age, the z-scores on neuropsychological scores, the difference in the auditory and visual Bisection Point (BP) and the mean Weber Ratio (WR).</i>	191
Table 16. <i>Hierarchical regression analysis on the difference between the auditory and the visual Bisection Point.</i>	192
Table 17. <i>Hierarchical regression analysis on the mean Weber ratio.</i>	193
Table 18. <i>Mean, Standard Deviation, minimum and maximum of raw scores of different neuropsychological tests.</i>	245
Table 19. <i>Mean weight of our psychological dimensions.</i>	248

Résumé

L'objectif de cette thèse est d'étudier le développement des conduites temporelles et leurs changements en fonction des contextes et des capacités cognitives des enfants, afin de proposer un modèle des distorsions du jugement du temps. Un ensemble de 9 études expérimentales ont été réalisées dans cette thèse s'inscrivant dans 3 axes principaux.

Axe 1 – Temps et neuropsychologie développementale. Cet axe a pour but d'examiner le rôle des capacités cognitives (attention, mémoire, vitesse de traitement) dans les distorsions du jugement du temps chez l'enfant. Pour cela, des enfants âgés de 5 à 8 ans, ainsi que des adultes, ont été soumis à des paradigmes de distracteur attentionnel et de double-tâche, avec des tâches concurrentes de nature différente, soit non-temporelle (discrimination de couleurs) soit temporelle (discrimination ou reproduction de durées). Les capacités des enfants étaient évaluées au moyen de différents tests neuropsychologiques.

Les résultats montrent que les distorsions du temps (sous-estimation du temps) chez l'enfant sont liées à leurs capacités attentionnelles limitées, plus particulièrement à leurs capacités en termes d'attention sélective dans le cas de la double tâche et d'inhibition dans celui de la distraction attentionnelle. Ainsi, deux mécanismes attentionnels impactent le jugement du temps, l'un lié au déclenchement du traitement du temps « attentional switch » et l'autre aux ressources attentionnelles « attentional gate ». Néanmoins, quand le sujet doit traiter deux durées en parallèle, on n'observe pas de sous-estimation temporelle, voire au contraire une surestimation du temps. De plus, cette distorsion du temps n'est plus liée aux capacités cognitives de l'enfant, même s'il est plus difficile pour l'enfant de réaliser une seconde tâche temporelle qu'une seconde tâche non-temporelle. Cela suggère l'existence d'un système d'horloge interne (ou de plusieurs horloges) capable de traiter de façon indépendante de multiples durées. Cependant nos résultats montrent que des processus attentionnels interfèrent avec ce système, causant dès lors des distorsions temporelles.

Axe 2 – Temps et contexte. Dans le cadre de cet axe, on a étudié l'influence du contexte temporel sur les distorsions du temps chez l'enfant et l'adulte, selon l'ordre de présentation des durées dans la séance expérimentale, leur modalité sensorielle (visuelle ou auditive), et la signification sociale du stimulus à estimer (état de l'autre).

Les résultats montrent la forte influence des contextes sur le jugement des durées chez le jeune enfant. En effet, ils font preuve de plus grandes surestimations du temps quand les durées varient de modalité sensorielle d'un essai à l'autre. Leur jugement temporel est aussi plus influencé par la valeur des durées présentées auparavant. Ils sont également sujets à plus de distorsions temporelles, incorporant dans leurs estimations l'état perçu chez l'autre (mouvement, émotion), bien que l'acquisition explicite de la théorie de l'esprit accentue ces distorsions. De plus, nos résultats montrent que l'amplitude de ces distorsions du temps contextuelles est directement liée aux capacités cognitives de l'enfant, notamment de ses capacités d'attention et de mémoire de travail. Ces résultats témoignent de l'influence déterminante du développement des fonctions cognitives sur le jugement du temps.

Axe 3 – Temps et modélisation. Dans ce 3ème axe, on a entrepris une modélisation en réseaux de neurones (Simple Recurrent Network et Multi-Layer Perceptron) permettant de proposer un nouveau modèle développemental du jugement du temps, alliant des processus automatiques d'horloge interne à des processus cognitifs interférents. Notre modèle permet de prédire de façon satisfaisante les distorsions du temps chez l'homme à différents âges. Notre modèle est donc apte à simuler les biais de jugement temporel sur la base des différences cognitives inter- et intra-individuelles. Ce modèle original devrait permettre d'étudier de façon systématique les difficultés de jugement du temps dans différents contextes et auprès de populations variées présentant ou non des troubles.

Mots clefs : Développement, Modélisation, Temps, Cognition

Abstract

The aim of this thesis is to study the development of temporal behaviors and their changes according to children's contexts and cognitive abilities, in order to propose a model of the distortions of time judgment. A set of 9 experimental studies were carried out in this thesis belonging to 3 main axes.

Axis 1 – Development of time and neuropsychology. This axis aims to examine the role of cognitive abilities (attention, memory, processing speed) in the distortions of time judgment in children. For this reason, children aged from 5 to 8 years, as well as adults, have been subjected to paradigms of attention distractor and double-task, with competing tasks of different natures, either non-temporal (color discrimination) or temporal (discrimination or reproduction of durations). Children's abilities were assessed using different neuropsychological tests.

The results show that time distortions (underestimation of time) in children are related to their limited attentional abilities, particularly to their abilities in selective attention in the case of dual tasks and to that of inhibition in attentional distraction. Thus, two attentional mechanisms impact the judgment of time, one linked to the triggering of the "attentional switch" time processing and the other to the "attentional gate" attentional resources. Nevertheless, when the subject has to treat two durations in parallel, one does not observe temporal underestimation, contrarily, an overestimation of the time is revealed. Moreover, this distortion of time is no longer linked to the cognitive abilities of the child, although it is more difficult for the child to perform a second temporal task than a second non-temporal task. This suggests the existence of an internal clock system (or multiple clocks) capable of independently processing multiple durations. However, our results show that attentional processes interfere with this system, thus causing temporal distortions.

Axis 2 - Time and context. Within the framework of this axis, we studied the influence of the temporal context on the distortions of time in the child and the adult, according to the order of presentation of the durations in the experimental session, their sensory modality (visual or auditory), and the social significance of the stimulus to be estimated (state of the other).

The results show the strong influence of the contexts on the duration's judgment in the young child. In fact, they show greater time overestimation when the durations vary from sensory modality from one trial to another. Their temporal judgment is also more influenced by the value of the durations presented previously. They are also subject to more temporal distortions, incorporating in their estimations the perceived state of the other (movement, emotion), although the explicit acquisition of the theory of mind accentuates these distortions. Moreover, our results show that the amplitude of these contextual distortions of time is directly related to the cognitive abilities of the child, notably of his attention and working memory abilities. These results testify to the determining influence of the development of cognitive functions on the judgment of time.

Axis 3 - Time and modeling. In this third area, a series of neural networks (Simple Recurrent Network and Multi-Layer Perceptron) has been undertaken to propose a new developmental model of time judgment, combining automatic internal clock processes with interfering cognitive processes. Our model allows us to predict significantly the distortions of time in humans at different ages. Our model is therefore able to simulate temporal judgment bias based on inter and intra-individual cognitive differences. This original model should make it possible to systematically study the difficulties of time judgment in different contexts and in various populations with or without disorders.

Keywords: Development, Modeling, Time, Cognition

Infundibulum

Qu'est-ce que le temps ? C'est la première question qu'il serait légitime de se poser avant d'aller plus en amont dans ce travail de thèse. Cependant, au cours de l'histoire de l'humanité, nul n'a été réellement apte à définir ce qu'est fondamentalement le temps. Comme le disait déjà Saint Augustin (354-430), le temps ne peut être décrit d'une manière satisfaisante en usant d'une seule explication ou définition. Toute tentative d'expliquer ce qu'est le temps constituerait une accentuation de certaines dimensions au détriment d'autres. De nos jours, les physiciens s'accordent à dire que le temps est l'une des propriétés de notre univers les plus difficiles à comprendre (Klein, 2002 ; Rovelli, 2008). Il est d'ailleurs impossible de décrire le temps sans le rapporter à lui-même. Ainsi, nous sommes en droit de nous demander si le temps existe vraiment. Cette question est d'autant plus pertinente lorsque l'on sait que les lois microscopiques sont invariantes par rapport au renversement du temps (Lederman & Hill, 2008).

Cependant, ce fait physique est un paradoxe pour notre esprit, car tout comme l'histoire de notre vie, le temps est linéaire et irréversible. Pour nous, observateurs, le temps est cette chose qui permet aux événements d'être séquencés de façon ordonnée et chronologique. Les causes précèdent toujours les effets. On parle d'ailleurs de « flèche du temps ». En physique, cette idée d'un temps unique et linéaire a été initialement décrite dans la physique classique de Newton (1687). Néanmoins, elle a été remise en cause avec la théorie de la relativité restreinte d'Einstein (1905). Selon cette théorie, le temps n'est pas universel, mais dépend du référentiel. C'est ce qu'ont prouvé Joseph Hafele et Richard Keating en 1971, en embarquant deux horloges atomiques dans des avions faisant le tour du monde (l'une vers l'Ouest et l'autre vers l'Est). En comparant ces horloges à une horloge fixe de référence, ils ont alors constaté que l'horloge qui a voyagé à l'encontre du sens de rotation de la terre avance de 273 nanosecondes par rapport à l'horloge fixe, alors que l'autre horloge retarde de 59 nanosecondes. De la même façon, le temps dépend de la gravité exercée sur l'observateur. Plus la gravité est importante, plus le temps s'allonge. Par exemple, le temps est ralenti quand on est assis sur la terre ferme par rapport à un autre observateur assis au 20ème étage de son appartement. Il y a alors potentiellement autant de temps qu'il y a d'observateurs. Ainsi, selon cette théorie, nous vivons tous dans le passé ou dans le futur d'un autre observateur. Depuis, le caractère unidirectionnel du temps a été remis à jour dans le second principe de la théorie des systèmes thermodynamiques, qui établit

l'irréversibilité de certains phénomènes physiques (théorie formalisée en 1850 par Clausius, voir aussi Borghi, 2008, Gremaud, 2013). En effet, avec l'introduction du phénomène d'entropie, c'est-à-dire de la tendance de l'univers à évoluer vers un état de désordre croissant, tout système n'est pas réversible.

Le temps tel qu'il est défini par les physiciens change au gré des théories et des moyens scientifiques. On peut donc se demander si le temps physique n'est finalement pas que la simple émergence de nature thermodynamique statistique, indissociable du manque d'information de l'observateur macroscopique qu'est l'homme. Certains physiciens pensent effectivement que le temps n'est qu'une illusion due à notre connaissance incomplète (Rovelli, 2018). Si le temps n'existe pas, alors ce n'est pas le temps qui nous fait vieillir, mais ce qu'il advient en nous à mesure qu'il passe (Klein, 2007). En d'autres termes, le temps ne passe pas, c'est nous qui passons. « *Le temps s'en va, le temps s'en va, madame ; Las ! Le temps, non, mais nous nous en allons.* » (Ronsard, 1555 – Sonnet à Marie).

Au demeurant... Qu'importe la véritable nature du temps ? Quelle est l'importance de savoir si le temps existe ou non ? Si nous en faisons l'expérience, alors le temps existe psychologiquement parlant ! Comme le disait Shakespeare (1603) "Discuter pourquoi le jour est le jour, la nuit la nuit et le temps le temps, ce serait perdre les jours, les nuits et le temps" (Hamlet Acte 2, scène 2, 86–92). La Psychologie en tant que science a donc suivi le conseil Shakespearien en laissant les grandes questions de la réalité physique du temps aux autres sciences, pour ne se pencher que sur le temps psychologique, c'est-à-dire le temps tel qu'il est perçu, tel qu'il est vécu, tel qu'il est ressenti. Alors ne perdons pas davantage de temps physique et parlons du temps psychologique.

Chaque individu peut éprouver une « sensation » de temps alors même qu'aucun organe sensoriel ne s'active pour nous permettre de le percevoir. Cette sensation est omniprésente dans notre vie quotidienne. Dans le cas d'un simple trajet en voiture, on peut se demander « Combien de temps me faut-il pour aller à mon rendez-vous ? » « Il est 8h, il va probablement y avoir des bouchons, combien de temps me faut-il en plus ? », « Ai-je le temps de sortir de ma place de stationnement avant l'arrivée de l'autre voiture ? » « Le feu est orange, ai-je le temps de freiner ? »... Cependant, si tout le monde peut faire l'expérience du temps et en parler de la même façon, celle-ci est propre à chacun selon ce que l'on vit, selon les circonstances. Comme le disait Einstein (1879 - 1955) : « *Placez votre main sur un poêle une minute et ça vous semble durer une heure. Asseyez-vous auprès d'une jolie fille une heure et ça vous semble durer une minute* ». Les chercheurs dans le domaine de la psychologie s'intéressent donc à la relation

entre le temps objectif et ce temps subjectif. Le premier temps (objectif) est le temps physique mesurable par notre montre. Le second temps psychologique renvoie à l'estimation subjective du temps objectif.

A nos dépens, le temps subjectif fluctue selon les situations dans lesquelles nous nous trouvons (Block, Hancock & Zakay, 2010 ; Brown, Collier & Night, 2013), selon nos états émotionnels par exemple (Droit-Volet, 2018 ; Droit-Volet, Fayolle, Lamotte & Gil, 2013 ; Droit-Volet & Meck, 2007 ; Lake, Labar & Meck, 2016), ou même selon le cadre dans lequel nous nous trouvons : campagne, ville ou bureau (Roseboom, Fountas, Nikiforou, Bhowmik, Shanahan & Seth, 2017). Il existe aussi de grandes différences interindividuelles lors de la mesure du temps (Muhs, Karwowski & Kern, 2018), notamment selon les âges (Coelho, Ferreira, Dias, Sampaio, Martins & Castro-Caldas, 2004 ; Droit-Volet, 2013, 2016 ; Droit-Volet & Coull, 2016 ; Ferreira, Paiva, Prando, Graça & Kouyoumdjian, 2016). Nous savons par exemple que l'enfant est moins bon dans ses estimations temporelles que ne l'est l'adulte. Il est aussi plus sujet aux illusions temporelles. La question est donc : pourquoi les enfants sont-ils plus sujets à ces illusions temporelles ? C'est la "grande" question à laquelle j'ai essayé de répondre durant ces 3 années de thèse. J'ai qualifié cette question de grande, car elle résulte elle-même de multiples questionnements : Existe-t-il un sens primitif du temps, non sujet aux distorsions ? Quel est alors le mécanisme neurologique responsable de la mesure précise du temps ? D'où proviennent ces illusions temporelles et sous quelles conditions sont-elles les plus fortes ? Sont-elles dues au développement d'un mécanisme spécifique à la perception du temps ou à un problème plus général de développement cognitif ? Essayons à présent d'apporter des réponses à toutes ces questions.

Chapitres théoriques

CHAPITRE I : LES CONDUITES D'ESTIMATION DU TEMPS CHEZ L'HOMME.

De la milliseconde aux multiples années d'une vie, il existe un continuum de temps permettant de guider nos actions au quotidien (Buhusi & Meck, 2005) (Figure 1). Comme on peut le voir sur la Figure 1, au début de ce continuum se trouve la milliseconde, nécessaire au contrôle du mouvement (Edwards, Alder & Rose 2002), à la reconnaissance (Mauk & Buonomano, 2004) ou encore à la production verbale (Schirmer, 2004). A l'autre extrême se trouvent les rythmes circadiens, entraînés par des cycles temporels qui peuvent s'étendre sur plusieurs jours (Czeisler et al., 1999). Pour cette thèse, je me suis intéressé aux durées intermédiaires, situées entre ces deux extrêmes, autrement dit, aux intervalles temporels de l'ordre de la seconde. Ceux-ci sont impliqués dans les processus de prise de décision (Gallistel, 1990 ; Kacelnik & Brunner, 2002 ; Richelle & Lejeune, 1980), ou le séquençage dans le temps de nos propres actions (Bortoletto, Cook, & Cunnington, 2011).

Les habiletés à estimer les durées dans la tranche temporelle des secondes ont été mises en évidence chez de nombreuses espèces animales, comme chez les primates (Gribova, Donchin, Bergman, Vaadia & de Oliveira, 2002 ; Janssen & Shadlen, 2005 ; Leon & Shadlen, 2003), les rongeurs (Brown, Höhn, Faure, Von Hörsten, Le Blanc, Desvignes, El Massioui & Doyère, 2011 ; Buhusi, Sasaki & Meck, 2002 ; Gallistel, King, & McDonald, 2004), les oiseaux (Buhusi, Sasaki & Meck, 2002 ; Henderson, Hurly, Bateson & Healy, 2006 ; Ohyama, Gibbon, Deich & Balsam, 1999 ; Pinheiro de Carvalho, Machado & Tonneau, 2016), et même les poissons (Drew, Zupan, Cooke, Couvillon, & Balsam, 2005). Il s'agit donc d'une habileté primaire commune à toutes les espèces animales.

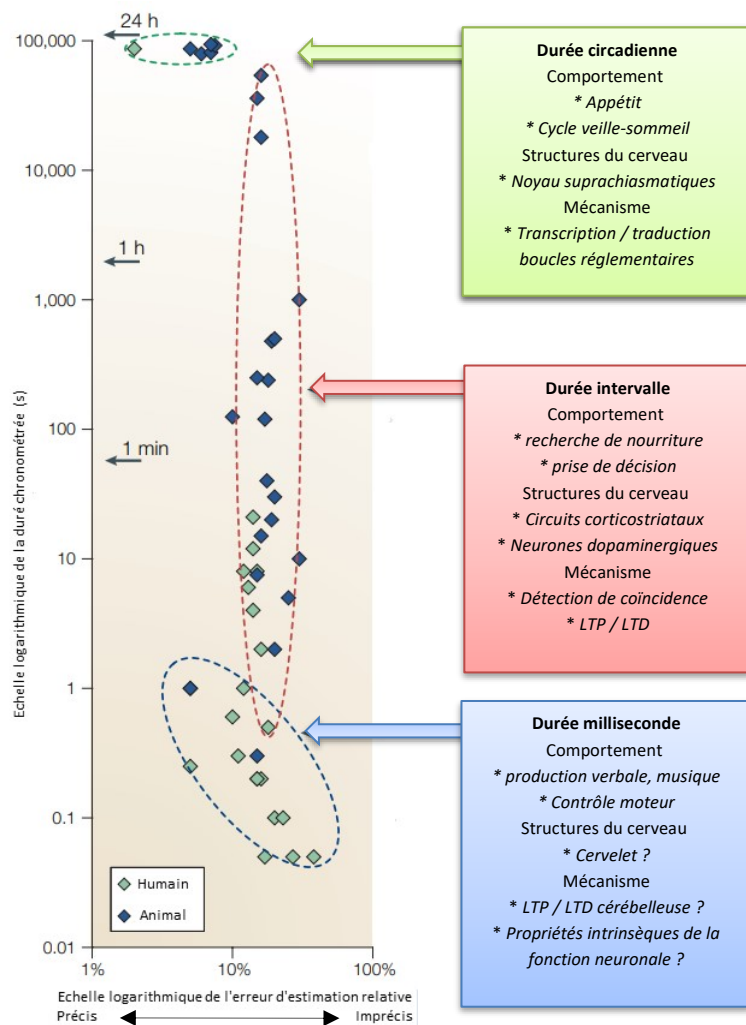


Figure 1. Représentation schématique des différentes échelles de durées, selon Buhusi et Meck (2005).

Cependant, les méthodes de recherche employées pour mettre en exergue ces aptitudes temporelles de base sont différentes de celles employées chez l'humain. En effet, chez l'animal, ces capacités ont été mises en évidence au moyen de méthodes de conditionnement. Or, il est difficile de conditionner l'homme au temps. La méthode de conditionnement temporel à intervalle fixe (FI) a par exemple été utilisée chez l'homme, mais celui-ci formule immédiatement des règles verbales de fonctionnement (« dans cette situation, je dois attendre ») entravant tout conditionnement authentique de ses comportements (Lejeune, Richelle et Wearden, 2006). De plus, lorsque l'on travaille en conditionnement, on travaille sur une réponse apprise. Or, ce type d'apprentissage nécessite plusieurs séances s'étalant sur plusieurs jours. Il peut être aisé de maintenir un niveau de motivation élevé chez l'animal, qui est affamé pour cet apprentissage. Néanmoins, pour des raisons éthiques et déontologiques évidentes, il est bien

entendu impossible d'affamer les êtres humains. Il est donc difficile de maintenir leur niveau de motivation sur plusieurs séances d'apprentissage. Quoi qu'il en soit, nous devons les premiers travaux de conditionnement au temps chez l'animal à Skinner (1938) pour le conditionnement opérant, et à Pavlov (1927 / 1960) pour le conditionnement classique (Lejeune et al., 2006). Toutefois, je ne m'attarderai pas sur ces travaux préférant présenter les méthodes utilisées plus couramment chez l'homme et l'enfant.

I – Méthode d'étude chez l'homme

Les chercheurs ont mis au point des méthodes visant à mesurer facilement la perception du temps auprès de l'être humain. Dans les travaux chez l'Homme, il est cependant important de distinguer deux méthodes d'investigation selon que le temps est jugé de façon prospective ou rétrospective (Block, 1992 ; Block & Zakay, 1997 ; Brown & Stubbs, 1988,1992 ; Grondin, 2010 ; Hicks, Miller & Kinsbourn, 1976 ; Tobin, Bisson, & Grondin, 2010). Dans une situation de jugement temporel prospectif, au moyen de consigne(s) verbale(s) et/ou écrite(s), il est clairement expliqué au sujet qu'il va devoir estimer la durée. Par exemple, l'expérimentateur peut dire : "Vous allez devoir estimer la durée qui s'écoule entre le début et la fin de lecture de la prochaine page". En revanche, dans une situation de jugement temporel rétrospectif, il n'y a aucune consigne temporelle. Le sujet n'est donc pas conscient du caractère temporel de la tâche qu'il doit effectuer. Par exemple, l'expérimentateur peut dire à la fin de la lecture d'un chapitre : "Combien de temps s'est écoulé depuis le début de ce chapitre ?". Etant donné que nous estimons rarement la durée de chaque événement de façon consciente, certains chercheurs considèrent que la tâche d'estimation temporelle rétrospective est la plus écologique.

Cependant, bien que l'estimation du temps prospective soit moins représentative de nos évaluations temporelles, c'est la méthode d'étude la plus employée pour analyser l'estimation du temps chez l'Homme. En effet, il est difficile d'étudier le temps rétrospectif. Après un seul essai, le sujet n'est plus en jugement rétrospectif parce qu'il sait qu'il doit traiter le temps. De plus, le traitement prospectif du temps fait davantage appel à des processus de perception, et dépend moins des processus cognitifs de haut niveau. Le traitement rétrospectif du temps reposerait en effet sur des processus de recherche en mémoire (Block & Zakay, 1997 ; Zakay & Block, 1997, 2004). Selon les travaux de Boltz, cette estimation se base sur le traitement de l'information non-temporelle (Boltz, 1995, 2005). Certains chercheurs ont notamment montré

que le temps jugé rétrospectivement dépend directement du nombre d'événements constituant la durée (Block, 1978 ; Poynter, 1989). Néanmoins, les explications divergent. Certains pensent que cet effet résulte de la charge en mémoire (Ornstein, 1969), d'autres pensent qu'il résulte du nombre de changements perçus (Block, 1978, 1982 ; Block & Reed, 1978 ; Poynter, 1989). Quoi qu'il en soit, plus il y a d'informations non-temporelles à traiter, et plus la durée est jugée rétrospectivement longue. Pour toutes ces raisons, nous avons décidé de n'utiliser que les méthodes d'étude prospective du temps qui se veulent plus "time process pure", comme on le dirait en Anglais (Brown & Stubbs, 1988 ; Grondin, 2010).

I – 1. Méthodes de comparaison (tâches de discrimination, de bissection et de généralisation)

I – 1.1. Présentations des méthodes

Tâche de discrimination :

La méthode d'investigation prospective la plus simple à comprendre est sans doute la méthode de discrimination temporelle. Dans cette méthode, un stimulus standard et un stimulus de comparaison sont présentés, l'un à la suite de l'autre. La tâche du participant consiste alors à comparer ces deux stimuli afin de déterminer lequel des deux est le plus long. De nombreuses études ont utilisé cette méthode et ont montré la sensibilité au temps de l'homme, ce que certains appellent les interrelations fonctionnelles entre le monde physique et phénoménal (Ehrenstein & Ehrenstein, 1999 ; Fechner, 1860). Le seuil temporel différentiel "JND" (i.e., "Just Noticeable Difference" aussi appelé "Difference limen") a ainsi été calculé. Il s'agit de la plus petite différence de détection pouvant exister entre deux durées. Pour déterminer ce seuil, les stimuli ne sont généralement pas présentés de façon aléatoire, mais via une méthode adaptative, essai par essai, tel que le contraste entre les deux durées dépend de la précision du jugement temporel du sujet. Celui-ci est diminué au fur et à mesure des bonnes réponses (discrimination) et augmenté en cas de non-discrimination (Rammsayer & Brandler, 2007). Le seuil perceptif est alors établi à un taux de 75% de bonnes réponses. Le seuil temporel dépend des caractéristiques du stimulus utilisé (auditive, visuelle, intensité) et de la méthode employée. Nous en reparlerons plus en détails après la présentation des autres méthodes ayant été utilisées pour calculer ce type de seuil différentiel.

La méthode de discrimination a également permis de mettre à jour des phénomènes relatifs à notre perception du temps. Parmi les phénomènes étudiés, on peut d'ores et déjà évoquer la différence entre le temps plein et le temps vide. Dans ce cas, on présente deux

intervalles de même durée, mais le premier intervalle est composé d'un stimulus continu (e.g., bip ou lumière présentés durant toute la durée de l'intervalle) et le second d'un stimulus discontinu (e.g., 2 bips ou 2 flashes l'un au début et l'autre à la fin de l'intervalle). Le temps est alors perçu comme étant plus long pour l'intervalle plein que pour l'intervalle vide. Cet effet portant le nom « d'illusion d'intervalle plein » (i.e., filled-interval illusion) a été observé indépendamment de la modalité de présentation du stimulus (Adams, 1977 ; Bald, Berrien, Price, & Sprague, 1942 ; Buffardi, 1971 ; Droit-Volet, 2008 ; Horr & Di Luca, 2015a ; Thomas & Brown, 1974 ; Wearden et al., 2007). D'autres phénomènes ont été étudiés, mais notre objectif n'est pas d'en faire une liste exhaustive ici. Nous y reviendrons plus tard.

Tâche de bissection :

Parmi les méthodes de comparaison utilisées, on trouve également les tâches de bissection et de généralisation temporelle. La tâche de bissection temporelle a beaucoup été employée chez l'animal depuis les travaux de Church et DeLuty (1977). Bien que les premières études chez l'homme aient été antérieures (Bovet, 1968), la méthode de bissection temporelle n'a réellement été adoptée chez l'homme que plusieurs années après, dans les années 90, par Lorraine Allan et John Wearden. La tâche de bissection est généralement composée de deux phases : une phase d'entraînement et une phase test. Dans la phase d'entraînement, deux durées standard, l'une courte (ex. 400ms) et l'autre longue (ex. 600ms), sont présentées au sujet de façon aléatoire. Sa tâche consiste alors à dire si la durée présentée est la durée « courte » ou « longue ». Pendant la phase d'entraînement chez l'homme, aucun feedback n'est donné. Trois essais suffisent pour que l'individu parvienne à discriminer les deux durées standard. Ensuite, dans la phase test, des durées se trouvant entre la durée standard courte et la durée standard longue sont également présentées. Selon la méthode employée, le sujet peut être mis au courant (Allan & Gibbon, 1991 ; Melgire, Ragot, Samson, Penney, Meck & Pouthas, 2005 ; Penney, Gibbon & Meck, 2000), ou non de ce changement (Allan, 2002 ; Wearden & Ferrara, 1995 ; Wearden, Todd & Jones, 2006). Dans le premier cas, le sujet doit décider si la durée test ou de comparaison se rapproche le plus de la durée standard courte ou de la durée standard longue. Dans le second cas, il doit continuer à dire si la durée à laquelle il a été confronté est la durée standard courte ou la durée standard longue. Dans tous les cas, il s'agit d'un choix forcé que le sujet doit opérer même s'il sait parfois que la durée de comparaison n'est ni la durée standard courte, ni la durée standard longue (Droit-Volet et Izaute, 2009). Dans certaines études, des renforcements sont aussi délivrés durant la phase d'entraînement et la phase test. Dans cette

dernière phase, les feedbacks sont délivrés uniquement pour les durées similaires aux durées standard car il n'y a pas de réponse correcte pour les durées intermédiaires.

Depuis l'adaptation de la tâche de bissection temporelle de l'animal à l'homme, des variantes ont été utilisées. On peut noter une variante dénommée tâche de bissection partition (Droit-Volet, Rattat, 2007 ; Wearden, Ferrera, 1995). Dans cette tâche, il n'y a aucune phase d'entraînement. Les sujets doivent directement catégoriser les durées en durée « longue » ou durée « courte », sans référence préalable, autrement dit sans représentation des durées standard. Contrairement à l'animal qui demande plusieurs séances pour parvenir à catégoriser les durées en bissection, chez l'homme, on obtient dans la tâche de bissection partition une performance temporelle proche de celle obtenue en bissection sans entraînement préalable (Allan, 2002). De façon assez remarquable, le sujet se construit donc rapidement, en quelques essais seulement, des catégories temporelles. En analysant les réponses des sujets essai par essai, Droit-Volet et Rattat (2007) concluent que seulement 3 à 4 essais suffisent pour pouvoir observer la construction d'une catégorie temporelle.

Dans la tâche de bissection, les résultats sont représentés sous la forme d'une fonction psychophysique, appelée aussi courbe de bissection temporelle. Cette fonction représente la proportion de réponses « long » en fonction de la durée du stimulus présenté. La courbe présentée Figure 2 représente la courbe de bissection typique obtenue chez l'homme en tâche de bissection temporelle. On peut alors constater que plus la durée est longue, plus le sujet répond « long ». Ceci atteste de la bonne discrimination temporelle des sujets. A partir de cette courbe sigmoïde, on calcule aussi trois indices de performance temporelle : le « Bissection Point », la « Difference Limen » et le « Weber Ratio ».

- *BP ('bisection point')*. Le BP représente la durée stimulus (t) donnant lieu à la proportion de réponse longue, $p(\text{long})$, égale à 0.50. Autrement dit, c'est la durée donnant lieu à 50% de réponse « court » et 50% de réponse « long ». Certains auteurs trouvent que le PB est proche de la moyenne arithmétique (Wearden, 1991), alors que d'autres trouvent qu'il est proche de la moyenne géométrique (Allan & Gibbon, 1991). Quoi qu'il en soit, le PB est toujours apparié à des valeurs centrales et sa valeur dépend de l'échelle temporelle utilisée (Wearden, 2016).

- *DL ('Difference Limen')*. La DL représente quant à elle le plus petit changement perçu dans les durées de stimulus, autrement dit, le seuil à partir duquel un individu parvient à distinguer deux durées. Il est déterminé en calculant la différence entre la durée de stimulus (t) donnant lieu à 75% de réponse longue et celle donnant lieu à 75% de réponse courte, selon

l'équation $t(p(\text{long}) = 0.75) - t(p(\text{long}) = 0.25) / 2$. Ainsi, plus la DL est petite, plus la précision temporelle est grande (Killeen et al., 1997).

- *WR* ('Weber Ratio'). Il s'agit d'un coefficient de variation permettant de rendre compte de la pente de la courbe. Un faible WR indique une grande sensibilité au changement de durée. La courbe de bissection est alors obtuse. Inversement, plus le WR est important, moins la sensibilité au temps est élevée et plus la courbe est plate. Il s'agit en fait de la DL divisée par le BP. La loi de Weber stipule que le seuil de catégorisation répond à une constante selon l'intensité du milieu. Un environnement « bruyant » augmente alors le seuil auquel la catégorisation est réalisée. Par exemple, pour entendre un individu dans un environnement bruyant, celui-ci doit parler très fort, voire hurler, alors que l'on peut entendre un murmure provenant de cette même personne dans une pièce calme. Ce phénomène s'applique donc à toutes les intensités, même temporelles. En outre, alors que le DL co-varie de façon linéaire avec la durée, le WR reste quant à lui constant car il est divisé par la moyenne des durées. Cette caractéristique des paramètres de sensibilité temporelle illustre l'une des principales propriétés du temps que l'on appelle la propriété du temps scalaire (Wearden, 2016). Celle-ci sera plus amplement décrite dans la seconde partie de ce chapitre.

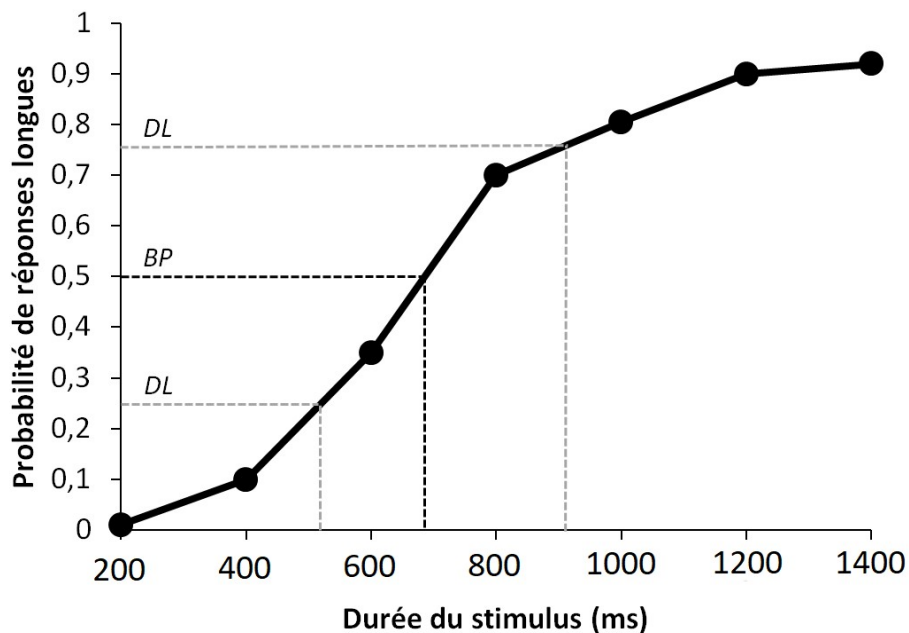


Figure 2. Courbe psychophysique typique obtenue par l'Homme lors d'une tâche de bissection temporelle, avec le point de bissection (BP) et la Différence-Limen (D) matérialisés par la jonction des lignes pointillées en noir et gris, respectivement.

Tâche de Généralisation :

Dans la tâche de généralisation temporelle, les sujets apprennent la durée d'une seule durée standard, par exemple 800ms (Figure 3). Une fois celle-ci mémorisée, plusieurs durées, soit égales, soit supérieures, soit inférieures à la durée standard, sont présentées au sujet. Celui-ci doit alors dire si chaque durée est « oui » ou « non » égale à la durée standard. Il s'agit donc d'un jugement de similarité et non de catégorisation comme en tâche de bissection temporelle. Selon les méthodes utilisées, un feedback est ou non donné pour chaque essai.

Les résultats de la tâche de généralisation sont représentés sous la forme d'un gradient de généralisation temporelle, qui relie la proportion de réponses « oui » aux durées de comparaison, comme on peut le voir dans la Figure 3. On peut alors calculer le pic temporel du gradient (peak time) et son étendue, c'est-à-dire sa largeur. Pour apprécier la largeur du gradient temporel, les chercheurs évaluent l'étendue intégrale de la distribution (width). Cependant, la plupart calcule la FWHM « Full Width at Half Maximum ». Le FWHM est l'étendue de la fonction donnée par la différence entre les deux valeurs extrêmes de la variable indépendante pour laquelle la variable dépendante est égale à la moitié de sa valeur maximale.

Si nous examinons la Figure 3 représentant les données typiquement obtenues chez l'Homme, il est possible de constater que le pic des réponses « oui » est à son paroxysme à la valeur de la durée standard (ici 800ms), témoignant de ses bonnes capacités de discrimination temporelle. Le sujet répond donc plus fréquemment oui pour la durée similaire à la durée standard. De ce fait, la proportion de réponses « oui » diminue au fur et à mesure que la durée de comparaison s'éloigne de la durée standard. Cependant ce pic dépend lui aussi de la valeur du stimulus (t). En effet, celui-ci devient d'autant plus important que la durée standard s'allonge : au plus la durée est élevée, au plus le pic de réponses « oui » est élevé et inversement. Cependant, chez l'homme, on observe une légère asymétrie du gradient vers la droite, tel que le sujet répond davantage « oui » pour les durées plus longues que la durée standard qu'il ne le fait pour les durées plus courtes que la durée standard. Cette asymétrie n'est pas observée chez l'animal. Son origine fait donc l'objet de discussions. Selon Wearden (2001), cette asymétrie proviendrait d'un seuil de décision moins conservateur chez l'homme conduisant à une sorte de fusion plus importante entre les durées longues. En d'autres termes, les durées plus longues sont plus difficilement différenciables de la durée standard que ne le sont les durées plus courtes. Cependant, chez l'homme, cette asymétrie dépend aussi de l'âge des sujets. Les jeunes enfants tendent en effet à produire des courbes plus symétriques (Droit-Volet, Clément & Wearden, 2001 ; McKormak, Brown, Maylor & Green, 1999). Droit-Volet et Izaute (2005) ont

montré que ces changements avec l'âge dans la symétrie du gradient de généralisation dépendent pour l'essentiel du changement des règles de décision avec l'âge de l'enfant. En l'occurrence, les jeunes enfants seraient plus conservateurs dans leurs décisions, ceux-ci ayant moins confiance en leurs connaissances que les adultes ou les enfants âgés de 8 ans.

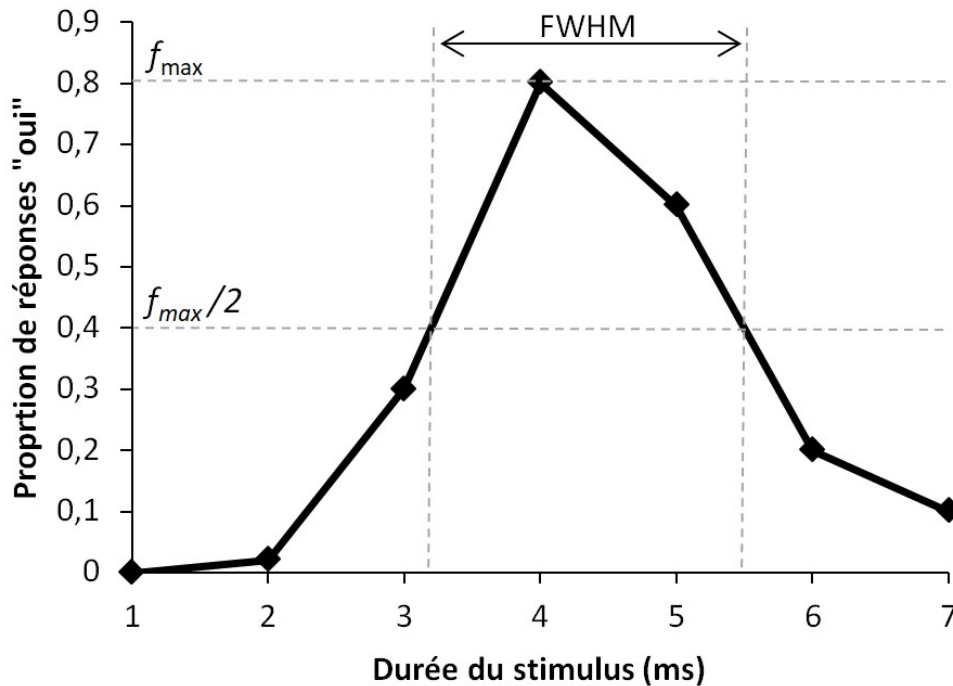


Figure 3. Courbe psychophysique typique d'une tâche de généralisation temporelle

I - 1.2. Utilisation des méthodes de discrimination chez le jeune enfant

Bissection temporelle :

Les différentes tâches de discrimination décrites ci-dessus ont été utilisées chez l'enfant. Quelques adaptations de procédure se sont quelques fois avérées nécessaires. En l'occurrence, dans la tâche de bissection temporelle, la présentation d'un nombre restreint de durées standards (3 ou 6 fois) s'est avérée souvent insuffisante pour permettre aux jeunes enfants âgés de 3 à 5 ans de discriminer la durée standard courte de la durée standard longue. Chez l'enfant, il y a une forte hétérogénéité interindividuelle dans les capacités d'apprentissage (Tizard & Hughes, 2008). Certains chercheurs ont donc utilisé dans leurs tâches de bissection temporelle un critère d'apprentissage des durées standards (Droit-Volet & Rattat, 2007 ; Droit-Volet & Wearden, 2001). L'enfant doit par exemple obtenir un pourcentage de bonnes réponses égal ou supérieur à 75% avant d'être soumis à la phase test. Il apparaît cependant que les enfants âgés de 5 ans n'aient pas besoin de beaucoup d'essais pour atteindre ce pourcentage de bonnes

réponses. A l'âge de 5 ans, la plupart d'entre eux n'ont besoin que d'un bloc de 8 essais (4 essais pour chaque durée) pour différencier les durées standards. Le nombre de bloc d'essais requis est néanmoins plus élevé à l'âge de 3 ans, de l'ordre en moyenne de 2 à 3 blocs de 8 essais.

Plus récemment, la tâche de bissection a même été adaptée à des nourrissons âgés de 4 mois par Provasi, Rattat et Droit-Volet (2011). Dans cette étude originale, les nourrissons étaient entraînés à regarder d'un côté après un son standard court (0.5s) et de l'autre côté après un son standard long (1.5). Chaque action du regard correcte était suivie d'un feedback positif. Ainsi, suivant une procédure de conditionnement opérant, les enfants apprenaient à regarder à gauche pour les durées longues et à droite pour les durées courtes, et vice versa. Puis, dans la phase test, des durées intermédiaires étaient ajoutées aux durées standards (750, 1000, 1250ms). Dans cette phase, les durées standard « court » et « long » étaient suivies du renforcement, son apparition étant différée de 3 secondes. La réponse enregistrée était donc la localisation du regard (à droite ou à gauche), ainsi que la durée de la fixation oculaire pendant la période de 3 secondes après l'apparition du référentiel temporel. Les résultats de bissection ont alors montré que, dès l'âge de 4 mois, les fonctions de la bissection sont cohérentes avec des $p(\text{long})$ qui augmentent avec la valeur de la durée (t). Ceci prouve que les nourrissons sont capables de discriminer les durées. Cela conforte les résultats obtenus chez les nourrissons en tâche de conditionnement temporel, notamment du conditionnement à intervalle fixe (Bentall, Lowe & Beasty, 1985 ; Brackbill & Fitzgerald, 1972 ; Darcheville, Rivière & Wearden, 1992) (pour une revue voir Droit-Volet, Pouthas & Jacquet, 1991; Pouthas, 1981; Richelle & Lejeune, 1980).

Les résultats en bissection temporelle démontrent que tous les enfants, quelque soit leur âge, sont capables de discriminer les durées. Cependant, comme on peut le voir sur la Figure 4, les courbes de bissection sont plus plates chez les jeunes enfants de 3 ans que ceux de 8 à 10 ans (Droit-Volet, 2001 ; Droit-Volet & Wearden, 2001). A ces âges (> 8 ans), les courbes de bissection s'apparentent à celle de l'adulte, bien que des différences puissent subsister. Ceci se traduit donc par un Ratio de Weber élevé à l'âge de 3 ans qui diminue avec le développement. La sensibilité au temps est donc faible chez le jeune enfant. Autrement dit, les enfants sont plus variables dans leurs estimations temporelles. Comme nous le verrons, se pose alors la question des processus à l'origine de cette moins bonne sensibilité au temps chez le jeune enfant (Droit-Volet, 2002).

Par ailleurs, la valeur du PB ne change pas avec l'âge, au cours du développement. Il y a donc peu de variation développementale quant à la précision temporelle ('temporal

accuracy'). Toutefois, quelques études reportent un décalage vers la droite de la courbe de bissection pour les enfants les plus jeunes (Addyman, Rocha & Mareschal, 2014 ; Droit-Volet, 2016). Ce décalage vers la droite est généralement expliqué par des processus décisionnels (Allan, 1998 ; Wearden, 1993), que nous définirons plus amplement dans notre second chapitre. On peut d'ores et déjà dire que ce décalage vers la droite pourrait venir du rythme de l'horloge interne plus rapide chez le jeune enfant (Droit-Volet, 2010). Les réponses aléatoires plus nombreuses chez le jeune enfant peuvent aussi contribuer à ce décalage, comme chez l'animal (Wearden & Lejeune, 1993). Quoi qu'il en soit, à ce niveau de la discussion, on retiendra qu'il n'y a pas de résultat probant pour l'une ou l'autre de ces hypothèses, chaque facteur pouvant concourir à la moins bonne performance temporelle des enfants en bissection temporelle. De plus, les changements avec l'âge des capacités cognitives peuvent concourir aux changements avec l'âge des courbes de bissection temporelle. Nous reviendrons plus tard sur cette question importante.

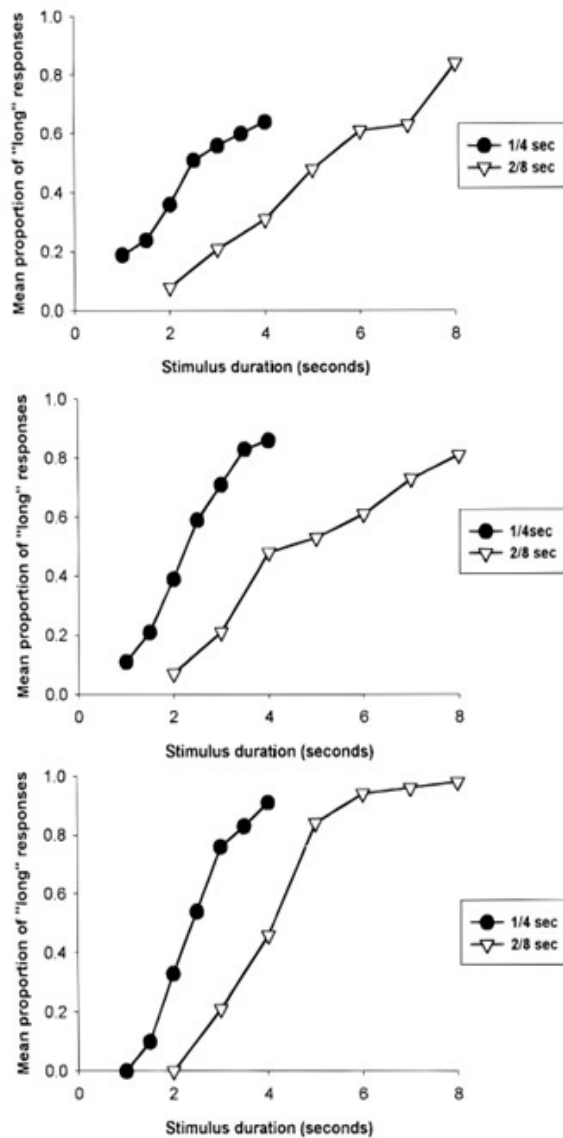
Il est important de préciser que les variations dans les performances temporelles au cours du développement ne sont pas dues à l'utilisation de stratégie de comptage du temps différente selon les enfants d'âges différents, ou d'autres stratégies de mesure du temps. D'une part, il est toujours demandé aux participants de ne pas compter et Rattat et Droit-Volet (2012) ont montré que cette simple consigne est fiable, qu'elle limite effectivement les stratégies de comptage. Cependant, on ne donne pas de consignes particulières aux enfants les plus jeunes. D'autre part, il a été démontré que les enfants n'utilisent pas de stratégie de comptage de la durée avant l'âge de 8-10 ans (Levin & Wilkening, 1989 ; Wilkening, Levin & Druyan, 1987). Quand bien même un jeune enfant utiliserait ce type de stratégie, ceci se verrait sur ses lèvres. En effet, les enfants ne parviennent pas à dissimuler l'utilisation d'une stratégie de comptage ; son utilisation est ouverte avant d'être interne. Par ailleurs, il a été montré que l'utilisation de stratégie de comptage du temps produit une violation de la propriété du temps (Clément & Droit-Volet, 2006). Or, cette propriété est vérifiée en bissection chez l'enfant et chez l'adulte.

Généralisation Temporelle :

Les résultats obtenus dans la tâche de généralisation temporelle chez l'enfant confirment les résultats obtenus chez le jeune enfant dans la tâche de bissection temporelle. Comme on peut le constater Figure 4, à tous les âges, le pic du gradient de généralisation temporelle se situe, comme pour l'adulte, à la valeur de la durée égale à la durée standard. Cependant, les gradients de généralisation sont plus larges chez les jeunes enfants, liés une fois

encore à leur moins bonne sensibilité au temps. Comme nous l'avons déjà dit, on reviendra sur l'origine de cette moins bonne sensibilité au temps chez l'enfant. Toutefois, on peut noter que les performances temporelles sont moins bonnes en généralisation temporelle qu'en bissection temporelle, la tâche de généralisation temporelle étant plus difficile à réaliser pour les enfants que la tâche de bissection temporelle (Droit, Wearden & Zélandi, 2015). C'est du reste pour cette raison que je n'ai pas décidé d'utiliser cette tâche dans mes propres travaux de thèse.

(A)



(B)

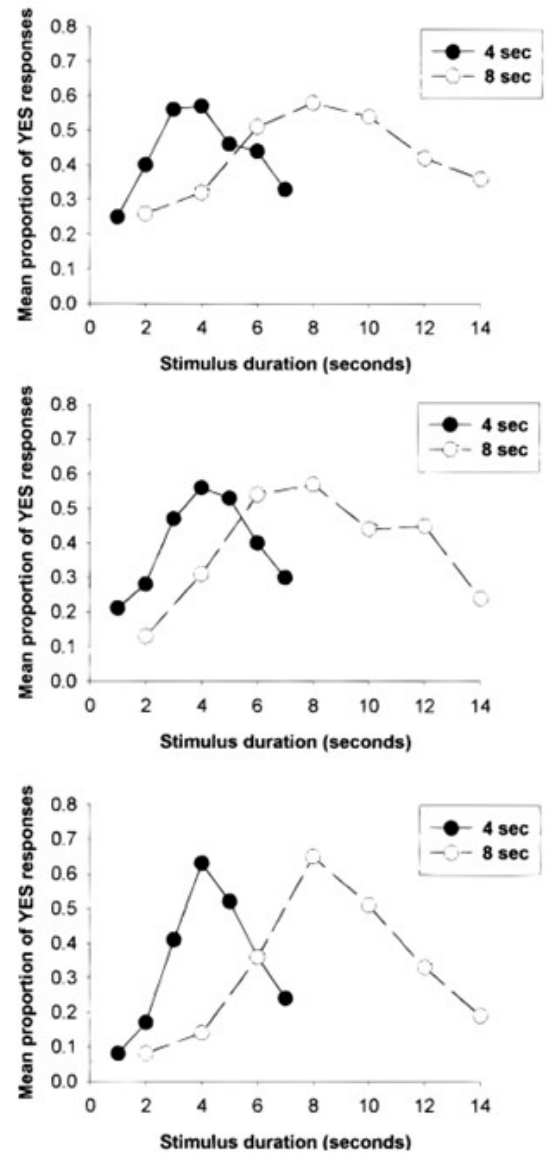


Figure 4. Courbes de Bissection (A) et de Généralisation Temporelle (B) chez des enfants âgés de 3 ans (en haut), 5 ans (au centre) et 8 ans (en bas), tirées de Droit-Volet & Wearden (2001), et Droit-Volet, Clément & Wearden (2001).

I – 2. Tâches de Production et Reproduction temporelle

I – 2.1. Présentation des diverses méthodes

Parmi les procédures pouvant être utilisées chez l'homme, on retrouve également la méthode de production et de reproduction temporelle. Ces méthodes se différencient des autres par le fait que le sujet indique la durée en appuyant sur un bouton par une action motrice.

Dans la production d'intervalle, on donne aux participants la valeur d'une durée (e.g., 500ms et 12s). Puis ils doivent produire une réponse motrice dès qu'ils pensent avoir atteint cette durée. Dans la tâche de production temporelle, on appuie une fois à la fin de la durée ou on maintient son appui pendant la durée demandée (Wearden, Wearden & Rabbitt, 1997), ou encore on appuie deux fois sur le bouton réponse, une première fois pour lancer le stimulus temporel et une seconde fois pour l'arrêter (Wearden & McShane, 1988). La réponse motrice joue donc un rôle prédominant, bien que son rôle soit plus ou moins important, selon la procédure de réponse choisie. Mioni et ses collaborateurs ont notamment montré que la méthode utilisée pour reproduire les durées a une influence sur l'exactitude temporelle et sa variabilité temporelle. La précision temporelle est notamment inférieure avec un appui à la fin de la durée qu'un maintien de la touche enfoncée pendant toute la durée de la reproduction (Mioni, Stablum, McClintock & Grondin, 2014). De ce fait, il est important de garder cette composante motrice en tête car elle peut venir altérer les estimations temporelles. Par exemple, à cause de cette composante motrice, il n'est pas envisageable d'utiliser la méthode de production pour des durées très courtes, inférieures à 1 seconde. En effet, le temps de réaction causerait un biais trop important dans la valeur des durées produites (Droit-Volet, 2010). Comme nous le verrons, ceci pose problème chez le jeune enfant qui a des difficultés d'inhibition motrice.

Dans la reproduction temporelle (Block, 1990), le sujet voit un stimulus présenté pendant une durée cible (6 secondes par exemple). Il doit alors reproduire la durée de ce stimulus en appuyant également sur un bouton réponse. Cet appui constitue une action motrice qui borne la durée, tout comme dans la tâche de production temporelle. Cependant, on peut aussi avoir différentes versions, avec un maintien continu de la touche de réponse ou deux appuis pour marquer le début et la fin de l'intervalle.

Comme dans les tâches de discrimination, dans ces tâches de production, on s'intéresse à la différence entre le temps objectif et l'estimation temporelle. On calcule alors la moyenne des durées (produites ou reproduites) ou la moyenne des erreurs ((temps estimé –

temps physique) / temps physique). Une moyenne d'erreur temporelle proche de zéro indique un jugement temporel précis. Une moyenne d'erreur temporelle supérieure à zéro représente une surestimation du temps, les participants reproduisant des durées plus longues que la durée cible. Enfin, une moyenne d'erreur temporelle inférieure à zéro représente une sous-estimation du temps et indique que les durées jugées sont trop courtes. Dans ces tâches, la variabilité des durées produites ou reproduites correspond à l'écart-type (σ) de l'ensemble des productions ($\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x-\mu)^2}{n}}$).

La Figure 5 illustre les résultats que l'on obtient généralement dans ce type de tâche. On s'aperçoit que les durées produites ou reproduites augmentent avec la durée. On remarque également la propriété du temps scalaire selon laquelle la variance augmente linéairement avec l'augmentation de la valeur de la durée reproduite. On observe aussi l'effet de Vierordt dont nous parlerons ultérieurement avec les durées courtes surestimées et les durées longues sous-estimées.

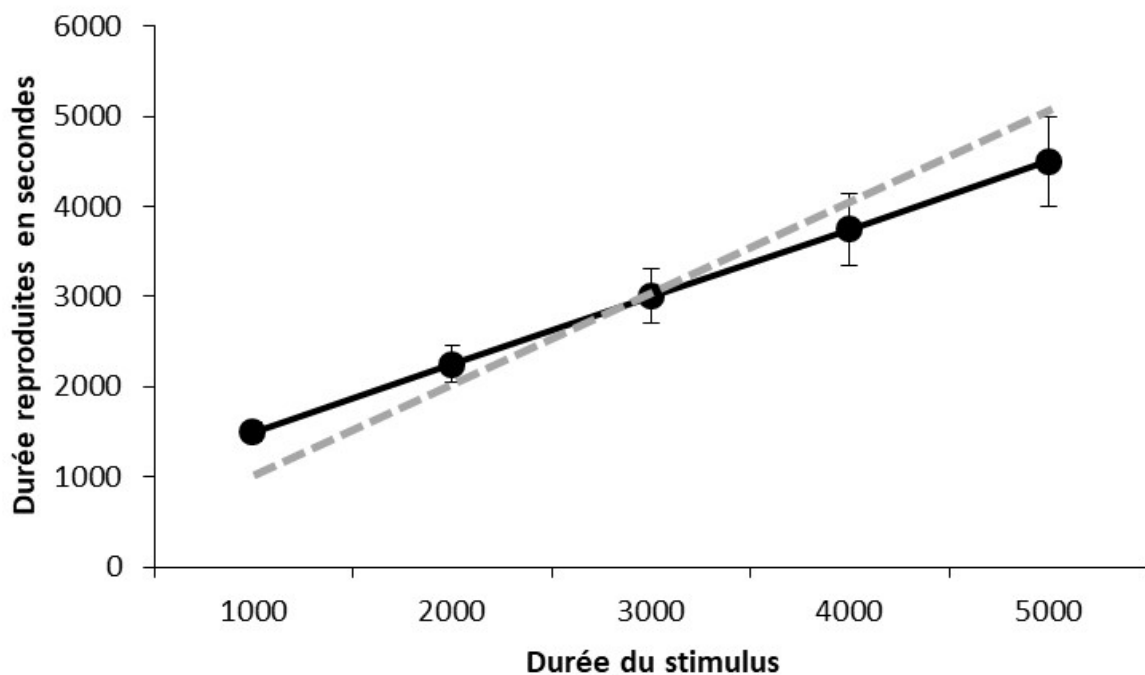


Figure 5. Reproduction temporelle et variabilité typique d'adultes, avec la durée physique représentée en ligne pointillée.

I – 2.2. Utilisation des méthodes de production et reproduction chez le jeune enfant

Il est difficile, voire impossible, de réaliser des études de production chez l'enfant pour la raison évidente que le jeune enfant n'a pas de représentation des unités conventionnelles de mesures du temps. Par exemple, l'enfant de 2/3 ans sait compter jusqu'à deux, mais il faudra un an supplémentaire pour qu'il se représente la numérosité (Fayol, Camos & Roussel, 2000). Selon ces auteurs, la difficulté majeure des enfants réside dans l'association de leurs connaissances préverbales des quantités (discrètes ou continues) avec les activités de comptage verbal.

La tâche de reproduction temporelle est donc plus facile à utiliser chez le jeune enfant. Plusieurs études ont ainsi été réalisées avec la tâche de reproduction temporelle et ont mis en évidence la plupart des modifications développementales dans les performances temporelles décrites précédemment (Chelonis, Flake, Baldwin, Blake, & Paule, 2004 ; Crowder & Hohle, 1970 ; Droit-Volet & Rattat, 1999 ; Espinosa-Fernandez, de la Torre Vacas, del Rosario Garcia-Viedma, Garcia-Gutierrez, & Torres Colmenero 2004 ; Gautier & Droit-Volet 2004 ; Espinosa-Fernandez, Miró, Cano, & Buela-Casal, 2003 ; Matsuda & Matsuda, 1983 ; Rattat, 2010 ; Rattat & Droit-Volet, 2007). On note notamment que la variabilité dans les reproductions temporelles diminue avec l'augmentation de l'âge du sujet, tout comme on l'observe dans les tâches de discrimination temporelle décrites précédemment. Cependant, au niveau de la représentation du temps, les jeunes enfants tendent à plus surestimer les durées courtes et à plus sous-estimer les durées longues que les adultes, bien que les résultats soient assez inconsistants d'une étude à l'autre (Figure 6) (Droit-Volet, 1999 ; Droit-Volet, Wearden & Zélanti, 2015 ; Szelag, Kowalska, Rymarczyk & Pöppel, 2002).

Comme le souligne Droit-Volet (2010), le problème de la reproduction est la composante motrice de la réponse qui vient biaiser les résultats quant à la précision temporelle chez l'enfant, et ceci, d'autant plus pour les durées courtes. En l'occurrence, Droit-Volet (2010) a montré que la reproduction de durées courtes (> 2,5 s) chez le jeune enfant est fortement corrélée au temps de réaction. Par exemple, les enfants de 5 et 8 ans surestiment davantage la durée de 2,5 secondes que les adultes, mais leur temps de réaction est également plus long. Il est donc fort probable que les reproductions des enfants soient effectivement affectées par leurs temps de réaction.

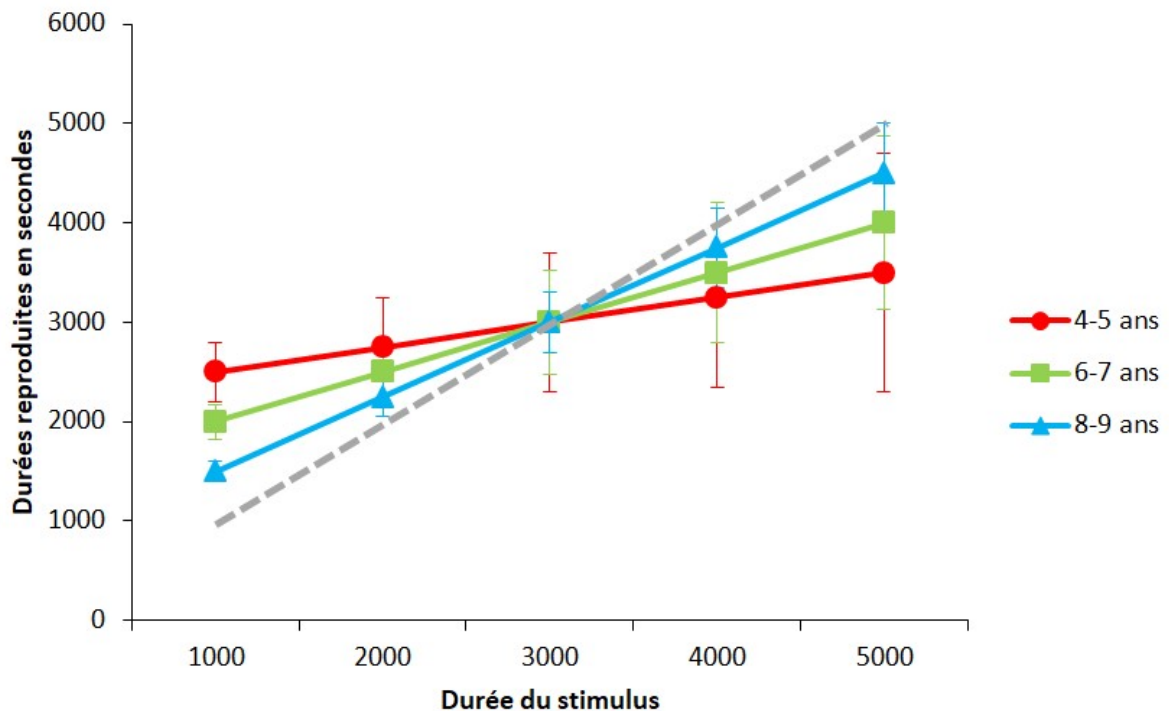


Figure 6. Reproduction temporelle et variabilité associées aux enfants de 4-5 ans (en rouge), 6-7 ans (en vert) et 8-9 ans (en bleu), avec la durée physique représentée en ligne pointillée.

De plus, les capacités d'inhibition motrice, moins importantes chez l'enfant, peuvent aussi affecter les durées produites. Les jeunes enfants ont en effet une capacité réduite de maîtrise de « soi », de leurs actes. Il leur est notamment difficile d'inhiber la réponse initiée, par exemple, de ne pas appuyer sur le bouton dès l'apparition du stimulus temporel (Fox, Henderson, Marshall, Nichols & Ghera, 2005 ; Klenberg, Korkman, & Lahti-Nuuttila, 2001). D'autres auteurs déconseillent aussi cette tâche puisqu'elle nécessite en plus des aptitudes de coordination, comme la coordination yeux - mains (Smith et al., 2002).

En résumé, bien que les résultats puissent varier d'une étude à l'autre, toutes les études sur le jugement des durées chez l'enfant montrent que le jeune enfant est plus variable dans ses estimations temporelles. Cette variation s'amoinde vers les âges de 8-10 ans pour se rapprocher de celle des adultes. La question qui se pose maintenant, et qui sera traitée dans le chapitre 3, est la raison de cette plus grande variabilité dans les estimations temporelles chez le jeune enfant, nonobstant le rôle qui peut être imputable à la production et à l'inhibition motrice.

II – Les grandes propriétés du jugement du temps

Comme nous l'avons entrevu, les conduites d'estimation du temps chez l'enfant présentent des caractéristiques similaires à celles de l'adulte. Celles-ci s'avèrent donc inhérentes à notre estimation du temps. Le but de ce chapitre est d'exposer rapidement ces propriétés de la perception du temps et de rapporter les études qui les ont mises en évidence chez l'enfant.

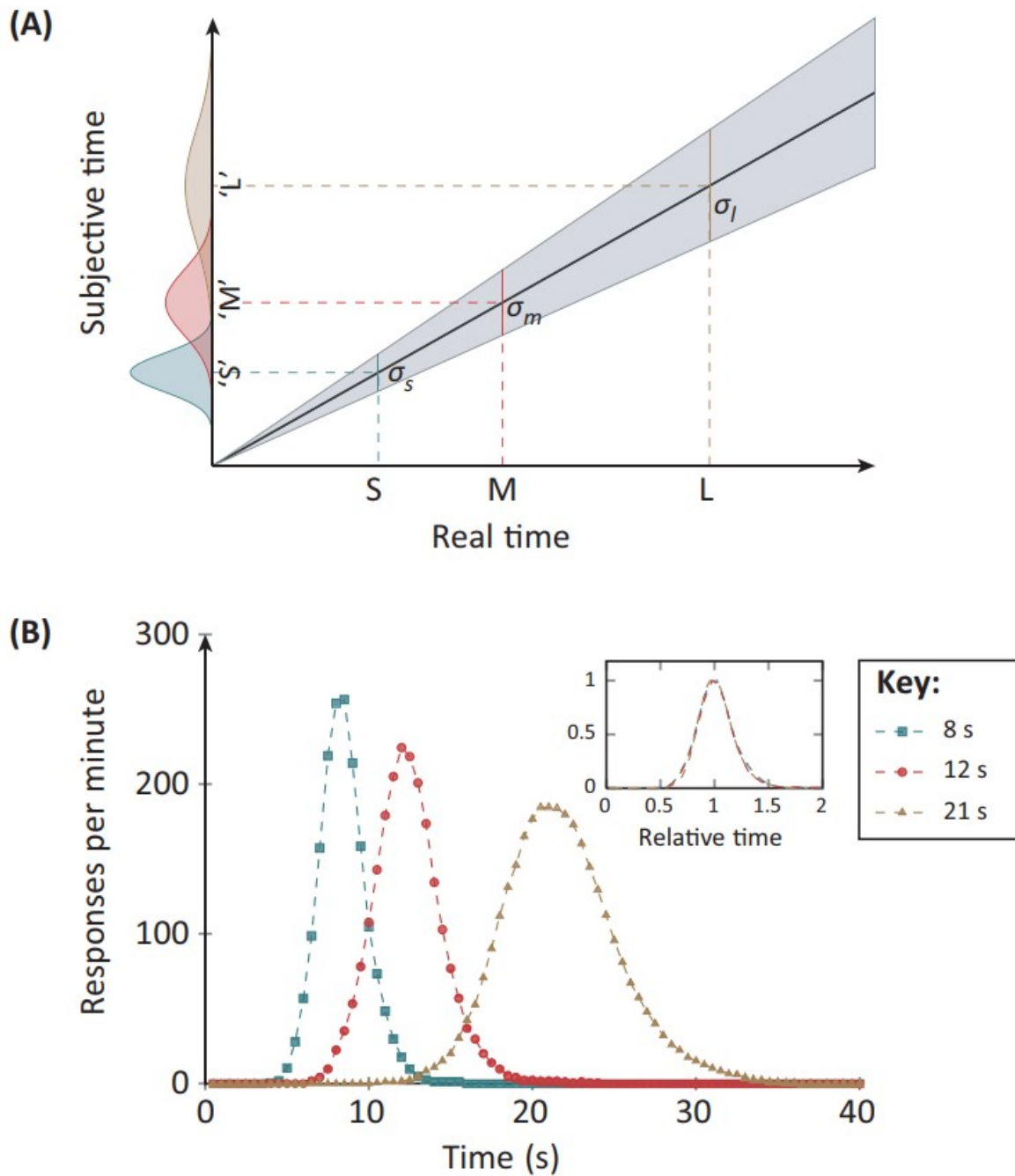
II – 1. Propriété scalaire du temps et loi de Weber

Comme nous l'avons déjà entrevu, le comportement d'estimation du temps se caractérise par deux propriétés fondant le temps scalaire (Lejeune & Wearden, 2006, 2009 ; Wearden, 2016 ; Wearden & Lejeune, 2008). La première propriété concerne la précision temporelle (« temporal accuracy »). Selon cette propriété, la moyenne des estimations temporelles augmente linéairement avec l'augmentation de la durée du stimulus (t). Ainsi, comme on peut le voir sur la Figure 7a, la moyenne des estimations temporelles correspond à la durée physique du stimulus.

La seconde propriété correspond au fait que la variance (écart-type) des estimations temporelles augmente de façon linéaire avec la durée du stimulus. La figure 7b montre effectivement que la largeur de la distribution des durées augmente au fur et à mesure de l'augmentation la longueur de la durée. Autrement dit, il y a plus de bruit dans les estimations des durées longues.

La propriété du temps scalaire rend donc compte de la covariance entre la déviation standard des estimations et leur moyenne (i.e., les courbes gaussiennes des productions s'aplatissent de façon constante avec l'augmentation des productions). Or, quand la proportion entre la variabilité et la moyenne est constante, on dit qu'elle est scalaire. Ceci est conforme à une loi de Weber-Fechner (1980) (Killeen & Weiss, 1987). Selon la loi Weber-Fechner, il y a une relation logarithmique entre les grandeurs physiques et la représentation dans le système perceptif. Ainsi, la JND ("Just Noticeable Difference") entre deux magnitudes physiques est proportionnelle à la magnitude physique absolue. Ce n'est donc pas la différence absolue entre deux durées qui importe dans la perception que l'on se fait du temps, mais le ratio entre deux durées. Dans la tâche de bissection, ceci se traduit par un Ratio de Weber constant avec

différentes gammes de durées et une superposition des courbes quand l'axe de X est rapporté à une échelle relative (Durée / PB).



TRENDS in Cognitive Sciences

Figure 7. (A) Augmentation proportionnelle de la variance avec la durée du stimulus (B) taux de réponse moyen par minute en fonction de la durée du signal pour des animaux testés avec des durées de 8, 12 et 21 s. Tiré de Shi, Church & Meck, 2013.

Ces propriétés du temps scalaire ont été observées dans de nombreuses études chez l'animal, mais aussi chez l'Homme (Lejeune & Wearden, 2006). Il s'agit donc d'une caractéristique fondamentale de la perception du temps. Dès lors que l'on ne retrouve pas cette propriété, il y a ce que l'on appelle une violation de la propriété du temps scalaire. Les chercheurs s'interrogent alors sur son origine. C'est notamment le cas pour l'effet Vierordt que nous décrirons après. A ce niveau, nous dirons simplement que la propriété du temps scalaire a été retrouvée chez le jeune enfant, dès l'âge de 3 ans. Droit-Volet et Wearden (2001) et Droit-Volet, Clément et Wearden (2001) sont les premiers à l'avoir mis en évidence chez l'enfant dans la tâche de bissection et de généralisation temporelle, respectivement. Depuis, cette propriété a été observée chez des enfants encore plus jeunes, notamment auprès de bébés âgés seulement de 6 mois (VanMarle & Wynn 2006 ; Brannon, Suanda & Libertus, 2007).

II – 2. La variation de la perception du temps

II – 2.1. L'effet de modalité sensorielle

Parmi les distorsions temporelles, il y a la différence entre les durées pleines et les durées vides que nous avons déjà évoquées, mais les plus fréquemment étudiées sont probablement celles dues à l'effet de la modalité sensorielle. En l'occurrence, Wearden, Tood et Jones (2006) suggèrent que le rythme de l'horloge interne serait plus rapide dans la modalité auditive que dans la modalité visuelle. En effet, les stimuli auditifs sont jugés chez l'adulte comme durant plus longtemps que les stimuli visuels, alors que leur durée est identique (Asaoka & Gyoba, 2015 ; Chen & Yeh, 2009 ; Goldstone & Goldfarb, 1964a,b ; Goldstone & Lhamon, 1972, 1974 ; Grondin, Meilleur-Wells, Ouellette, & Macar, 1998 ; Lustig & Meck, 1998 ; Ortega, Lopez & Church, 2009 ; Penney, 2003 ; Penney, Gibbon, & Meck, 2000 ; Rammsayer, Bortner & Troche, 2015 ; Stauffer, Haldemann, Troche, & Rammsayer, 2012 ; Walker & Scott, 1981 ; Wearden, Edwards, Fakhri, & Percival, 1998 ; Wearden et al., 2006). La Figure 8, extraite de Wearden, Todd et Jones (2006) illustre cet effet classique.

AUDITORY/VISUAL DURATION DIFFERENCES

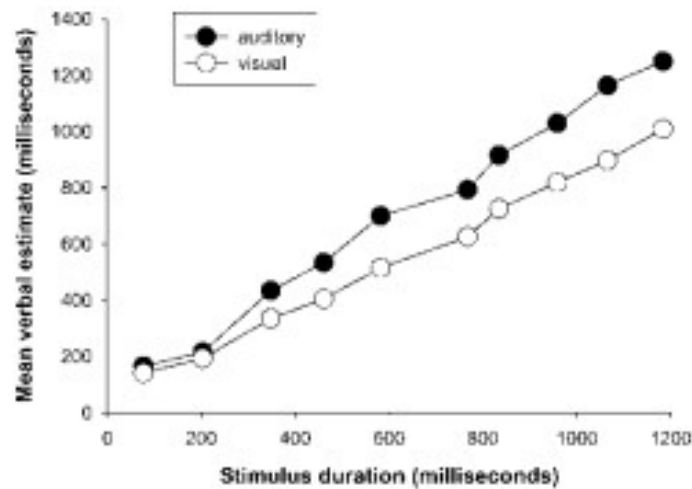


Figure 8. Intervalles moyens reproduits dans la modalité auditive (en noir) et visuelle (en blanc). Extrait de Wearden, Todd et Jones (2006).

Les chercheurs, comme John Wearden, expliquent donc cet allongement du temps subjectif dans la modalité auditive t par les processus physiologiques de traitement de l'information sensorielle, qui sont plus rapides dans le système auditif que dans le système visuel. La rapidité permettrait donc une meilleure sensibilité au temps pour les stimuli temporels auditifs (Wearden et al., 1998 ; Penney et al., 2000). Mais, les études chez l'enfant ont remis en cause cette interprétation (Ramsayer, Borter & Troche, 2015). La modélisation des données temporelles en modalité visuelle et auditive suggère que des processus attentionnels entreraient plutôt en cause dans ces effets temporels modaux. En l'occurrence, on assisterait à une plus grande variabilité dans la latence du traitement du système visuel (« switch closure ») que du système auditif, et à un temps de latence plus long dans le premier cas (Droit-Volet, Meck & Penney, 2007 ; Droit-Volet, Tournet & Wearden, 2004). Dans une des expériences de cette thèse, nous avons tenté de vérifier cette idée relative au rôle de l'attention dans les distorsions sensorielles du temps, en évaluant les capacités attentionnelles des enfants avec différents tests neuropsychologiques.

En somme, la façon dont les informations sont présentées est cruciale pour l'estimation que l'on se fait du temps. Comme nous venons de le voir, la dimension physique du stimulus, notamment sa modalité sensorielle, joue un rôle important, mais l'estimation du temps peut aussi être biaisée par l'ordre de présentation des stimuli temporels.

II – 2.2. L’erreur d’ordre temporel

La distorsion de nos jugements temporels causée par l’ordre de présentation des durées différentes s’appelle l’erreur d’ordre temporel (TOE pour « Time Order Error »). La TOE est un cas classique de la violation de la propriété du temps scalaire. Cette erreur a été observée pour la première fois par Fechner en 1860 dans les épreuves de seuil différentiel. Dans ses études, Fechner a remarqué que les sujets parviennent mieux à différencier deux poids lorsqu’ils sous-pèsent le plus petit des deux poids avant de sous-peser le plus gros. Dans le cas où l’estimation est facilitée, on parle d’erreur de discrimination positive. A l’inverse, s’ils commencent par sous-peser le poids le plus lourd, les sujets sont moins performants et on parle d’erreur de discrimination négative. Les mêmes effets ont été mis en évidence dans la perception du temps (Fraisse, 1948 ; Grondin & McAuley, 2009 ; Jamieson & Petrusic, 1975 ; Lapid, Ulrich, & Rammsayer, 2008 ; Stott, 1935 ; Ulrich, Nitschke, & Rammsayer, 2006 ; Vierordt, 1868 ; Woodrow, 1935) (pour une revue de la littérature, voir Eisler, Eisler & Hellström, 2008). L’erreur d’ordre temporel révèle l’influence du contexte dans notre jugement du temps. Le jugement dépend en effet du jugement précédent, celui que l’on vient de faire.

II – 2.3. L’effet Vierordt

Le jugement temporel change selon l’ordre des durées présentées, mais aussi selon l’ensemble des durées qui sont présentées au cours de la séance. Autrement dit, le contexte temporel général dans lequel un sujet se trouve a un impact sur ses jugements temporels à un moment *t*. L’effet du contexte temporel sur le jugement du temps a fait l’objet de nombreuses études pendant ces deux dernières décennies (Adams & Mamassian, 2004 ; Battaglia, Jacobs, & Aslin, 2003 ; Damsma, van der Mij, & van Rijn, 2018 ; Ernst & Banks, 2002 ; Jazayeri & Shadlen, 2010 ; Körding et al., 2007 ; Mamassian, Landy, & Maloney, 2002 ; McAuley & Jones, 2003 ; McAuley, Jones, Holub, Johnston, & Miller, 2006 ; Miyazaki, Nozaki, & Nakajima, 2005 ; Petzschner, Maier, & Glasauer, 2012 ; Shi & Burr, 2016 ; Stocker & Simoncelli, 2006 ; Verstynen & Sabes, 2011 ; Walsh, 2003). Ces études montrent que l’ensemble des durées tendent à être moyennées entre elles. On parle d’un effet de tendance centrale (Hollingworth, 1910). De ce fait, les petites durées sont surestimées et les grandes durées sous-estimées. La figure 9, réalisée à partir de données inventées, illustre cet effet dit l’effet Vierordt.

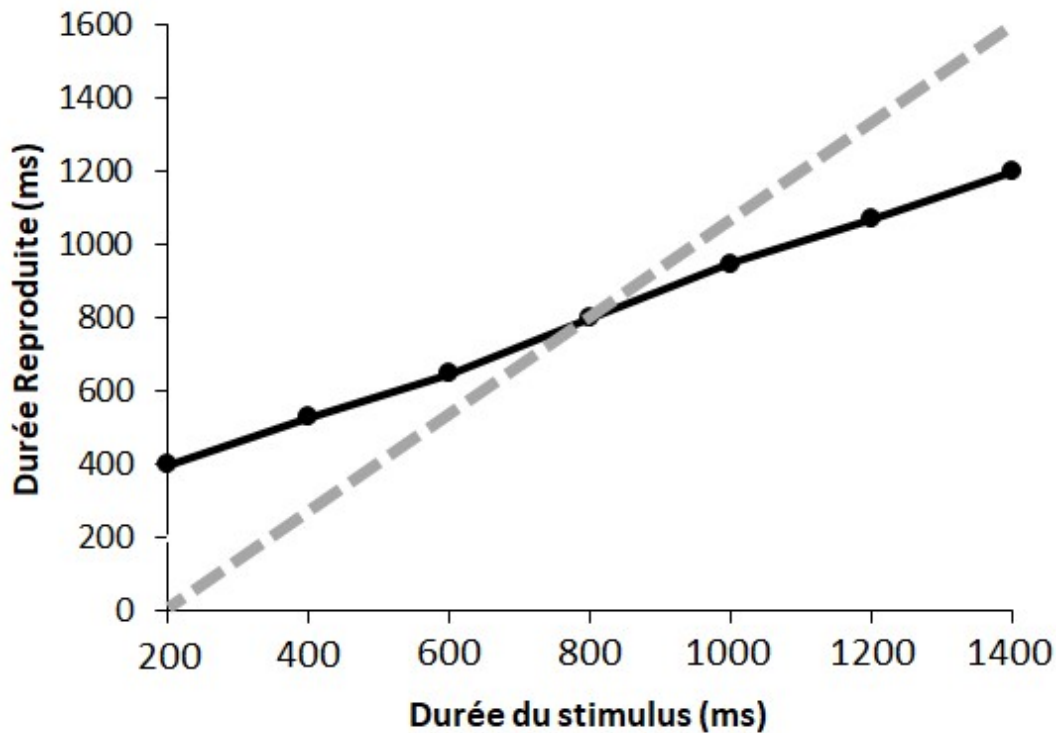


Figure 9. Illustration de l'effet Vierordt, avec en noir des productions typiques d'adultes et en gris, une reproduction parfaite de la durée.

Cet effet éponyme a ainsi été découvert par Vierordt en 1868, et remis au goût du jour par Jazayeri et Shadlen (2010). Récemment, ces auteurs ont montré que l'effet Vierordt augmente de façon croissante avec l'augmentation des valeurs de stimulus présentés au sein de la condition temporelle. Pour rendre compte de cet effet, ces auteurs ont mis au point une nouvelle méthode d'étude appelée la procédure « Ready-Set-Go » (Figure 10). Dans cette méthode, on présente au sujet deux ronds lumineux qui apparaissent en rythme. Le sujet doit alors poursuivre ce rythme en appuyant sur un bouton pour produire un troisième flash. Ainsi, le temps entre le premier et le second flash doit être équivalent au temps entre le deuxième flash et la production du participant (3ème flash). De plus, un feedback est délivré au sujet, avec une fenêtre temporelle de plus en plus étroite au fur et à mesure que celui-ci parvient à reproduire le rythme. Aujourd'hui, les chercheurs stipulent que les humains modifient continuellement leur système perceptif en fonction des changements opérés dans l'environnement physique (Di Luca et Rhodes, 2016 ; Rhodes, 2018). Nous reviendrons plus amplement sur cet effet lors du Chapitre III sur la partie mémoire, car cet effet a fait l'objet d'une étude expérimentale présentée dans ma thèse.

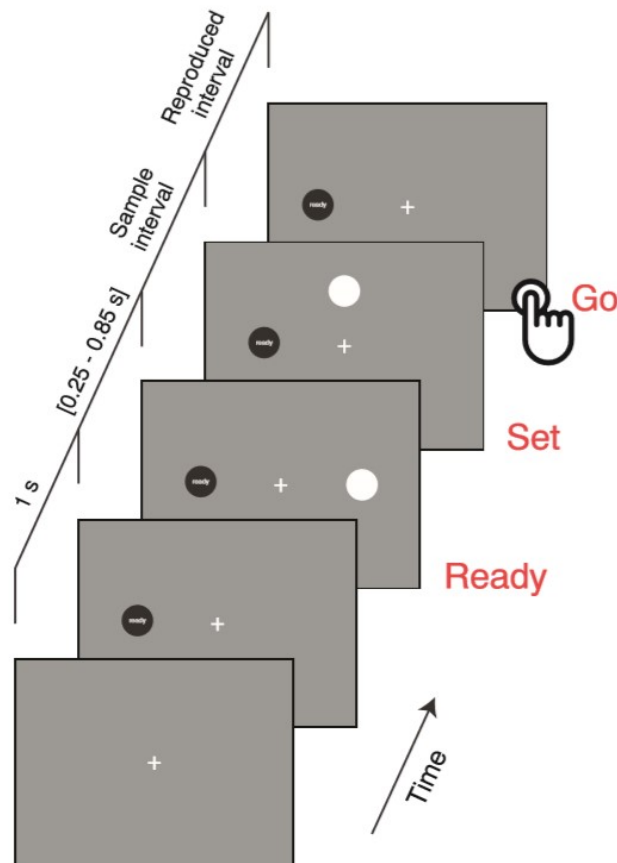


Figure 10. Représentation de la « Ready – Set – Go » task.

Quoi qu’il en soit, cet effet a été retrouvé chez l’enfant (Karaminis & al, 2016) et a été répliqué par nous même chez des enfants aussi jeunes que 5 ans. Les propriétés du temps scalaire se retrouvent aussi à tous les niveaux de l’échelle ontogénétique et phylogénétique, nous permettant d’affirmer que la perception du temps repose sur des mécanismes universels. Dans le but de rendre compte de ces mécanismes, les chercheurs ont proposé des modèles fonctionnels du traitement du temps, appelés les modèles d’horloge interne. Comme nous allons le voir, il existe plusieurs modèles d’horloge interne. Ces modèles diffèrent selon la nature de l’unité temporelle proposée, selon que celle-ci soit discrète (i.e., les modèles dits « pacemaker-accumulator »), continue (i.e., les modèles dits « oscillator/coincidence-detection) ou inexistante (les modèles dits « process-decay »). Toutefois, certains chercheurs rejettent ce type de modèle et évoquent d’autres processus basés sur les traces en mémoire ou la quantité d’activité (Staddon & Higa, 1999 ; Wackermann & Ehm, 2006). Quoi qu’il en soit, même si l’on peut discuter de l’existence d’une horloge interne, nous avons fait le choix de baser nos

conclusions sur l'existence d'une telle base temporelle. L'utilisation d'une horloge interne comme fondement d'un modèle pour étudier l'estimation du temps n'est pas une fin en soi, mais plutôt, pour nous un instrument, un moyen, une étape dans la recherche scientifique nous permettant de formuler des hypothèses et de les tester. Aussi, dans le prochain chapitre, nous ne détaillerons que les modèles avec présence d'unité temporelle (pour une revue des différents modèles existants, voir Meck et N'Diaye, 2005). Dans ma thèse, j'ai l'ambition de proposer un nouveau modèle développemental d'horloge interne. Je resterai donc attaché à ce type de modèle.

CHAPITRE II : LES MODELES DE LA PERCEPTION DU TEMPS

I – Les modèles dits « pacemaker-accumulator »

I – 1. Le modèle de Treisman (1963)

Le premier modèle de pacemaker-accumulateur a été proposé par Michel Treisman en 1963. Dans un récent article publié en 2013, Treisman raconte son origine et ses multiples développements. Ce modèle, présenté Figure 11, est composé d'une base de temps, d'un compteur, d'une composante de stockage et d'un comparateur. Selon ce modèle, la base temps produirait un flux continu d'impulsions émises de façon régulière, aussi appelées unités temporelles. Celles-ci seraient directement incrémentées dans un compteur. En d'autres termes, c'est le nombre d'impulsions stockées dans ce mécanisme de stockage qui constitue la base de la représentation du temps : plus il y a d'unités, plus la mesure subjective du temps est importante, et inversement. Ce système de stockage serait lié à un mécanisme verbal sélectif permettant au sujet d'associer une valeur symbolique à la durée mesurée (ex. ½ seconde, 6 secondes, 1 minute...). Son rôle serait notamment une meilleure rétention et récupération des informations encodées. Les unités comptabilisées seraient ensuite transférées à un comparateur qui, comme son nom l'indique, comparerait la sommation d'impulsions générées pendant la durée du stimulus temporel à d'autres présentes en mémoire.

Il reste dans ce modèle une composante d'entrée que nous n'avons pas présentée, celle que Treisman appelle le « centre d'éveil spécifique ». Celle-ci modifierait la fréquence d'émission d'impulsions générées. Un haut niveau d'éveil augmenterait la fréquence d'émission d'impulsions en diminuant l'espace temporel entre chaque impulsion (augmentation de la fréquence en Hertz). Le nombre d'unités temporelles serait alors augmenté pour un temps

donné et la durée jugée plus longue. A l'inverse, un faible niveau d'éveil ralentirait la fréquence d'émission de ces impulsions, ce qui réduirait le nombre d'impulsions incrémentées et provoquerait une sous-estimation du temps. Cette composante permet d'expliquer certaines distorsions temporelles. Il rend notamment compte des distorsions du temps avec l'élévation de la température du corps (François, 1927 ; Hoagland, 1933 ; Wearden & Penton-Voak, 1995).

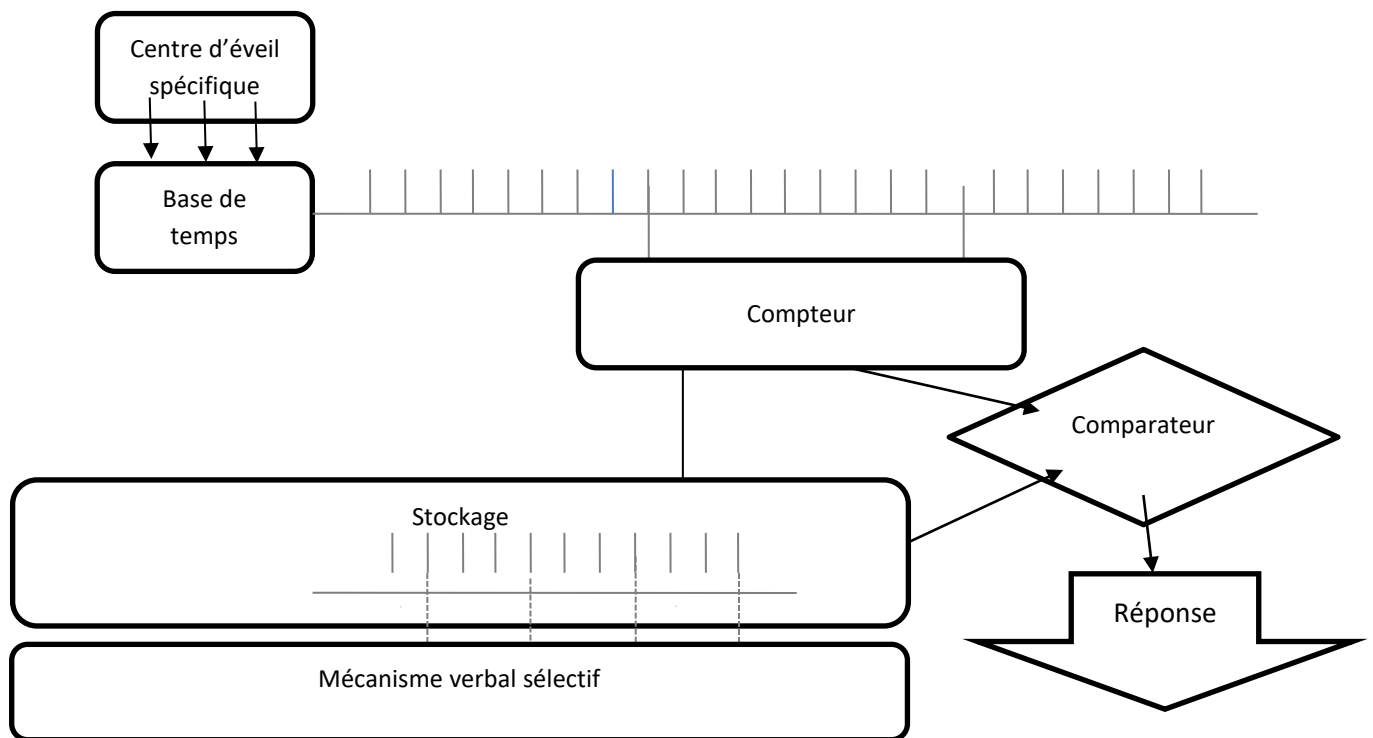


Figure 11. Représentation schématique du modèle d'horloge interne de Treisman (1963).

Il permet aussi d'expliquer les surestimations du temps sous l'effet des émotions, notamment celles associées à la colère et la peur qui sont fortement activatrices. D'ailleurs, plusieurs auteurs considèrent que les modifications du niveau d'éveil (Arousal) sous l'effet des émotions constituent le facteur majeur des distorsions temporelles (Droit-Volet, Fayolle & Gil, 2011 ; Droit-Volet & Gil, 2009 ; Droit-Volet & Meck, 2007 ; Noulhiane, Mella, Samson, Ragot & Pouthas, 2007).

Afin de mieux rendre compte des effets du niveau d'éveil sur les durées subjectives, Treisman a modifié son modèle avec son collègue Brogan (1992) en ajoutant un système « oscillateur-calibreur ». Son rôle est d'apporter une modulation au niveau de la base temps. Ils

ont décidé aussi de remplacer la base temps par un oscillateur temporel et une unité de calibration (Figure 12). L'oscillateur temporel a le même rôle que la base temps proposée initialement. Il va émettre les impulsions selon une fréquence stable (F_0). L'unité de calibration va multiplier la fréquence reçue (F_0) par un facteur de calibration (F_c), transformant ainsi l'information en fréquence produite (F_p) : $F_p = C_f \times F_0$. C'est à partir de cette fréquence finale (F_p), potentiellement biaisée, que les autres composantes du modèle vont réaliser le traitement temporel. Ainsi, dans une condition neutre, $C_f \approx 1$, ce qui se traduit par l'absence d'erreur temporelle dans les estimations. Cependant, C_f peut s'avérer inférieur ou supérieur à 1, décélérant ou accélérant ainsi l'émission d'impulsions.

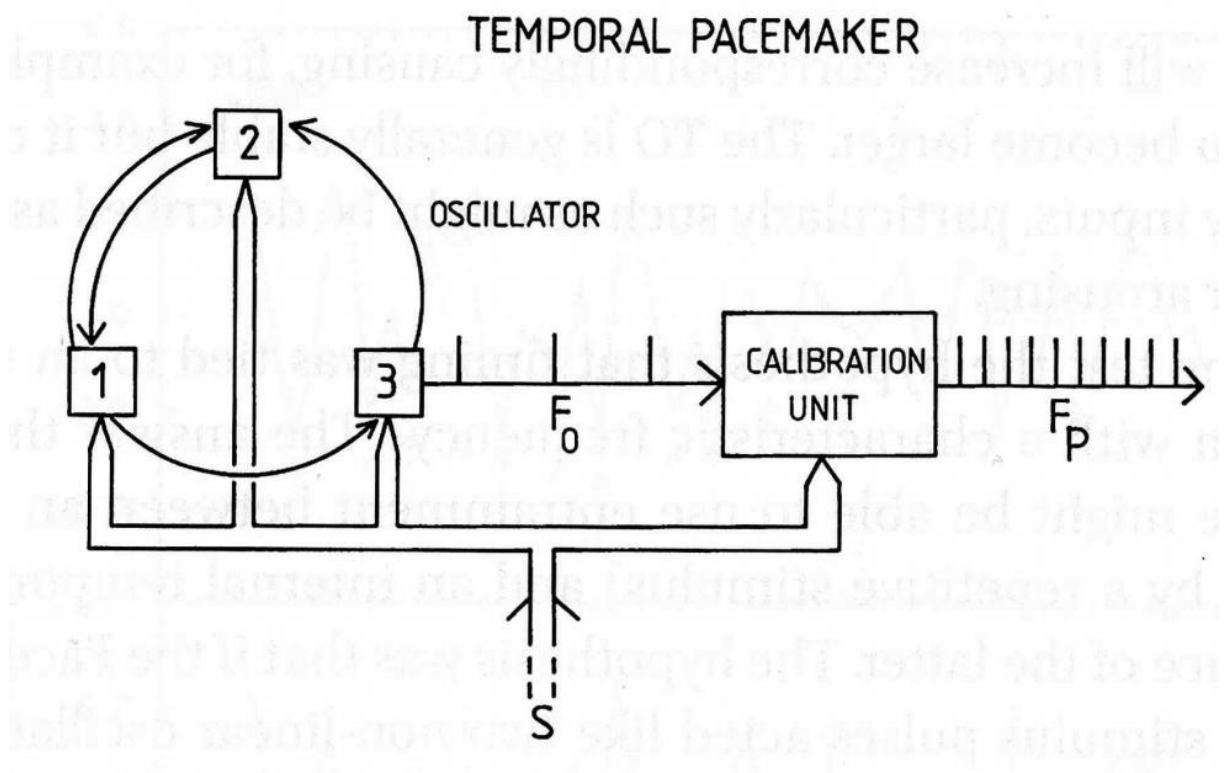


Figure 12. Le pacemaker calibré selon Treisman (2013).

Bien que fondamental et intéressant, le modèle de Treisman et sa variante ne proposent qu'un et un seul mécanisme à la base des variations de jugement temporel. Il s'avère donc insuffisant pour expliquer les nombreuses causes affectant le jugement du temps. Treisman est d'ailleurs l'un des premiers à prendre conscience des limites de son modèle pacemaker-accumulateur. Récemment, il a réalisé une revue de ses propres travaux dans un article publié

dans Timing and Time perception en 2013 (Treisman, 2013). Dans cet article, il émet alors l'idée que nous pouvons être équipés de multiples horloges internes fonctionnant en parallèle et à différentes allures. Cette idée a été reprise dans des modèles récents d'horloge interne. Toutefois, avant de présenter ces modèles, nous allons présenter le modèle de traitement de l'information temporelle de Gibbon et ses collaborateurs, qui ont affiné le modèle de Treisman en l'intégrant au sein d'un système de traitement de l'information.

I – 2. Le modèle de traitement de l'information temporelle de Gibbon, Church et Meck (1984)

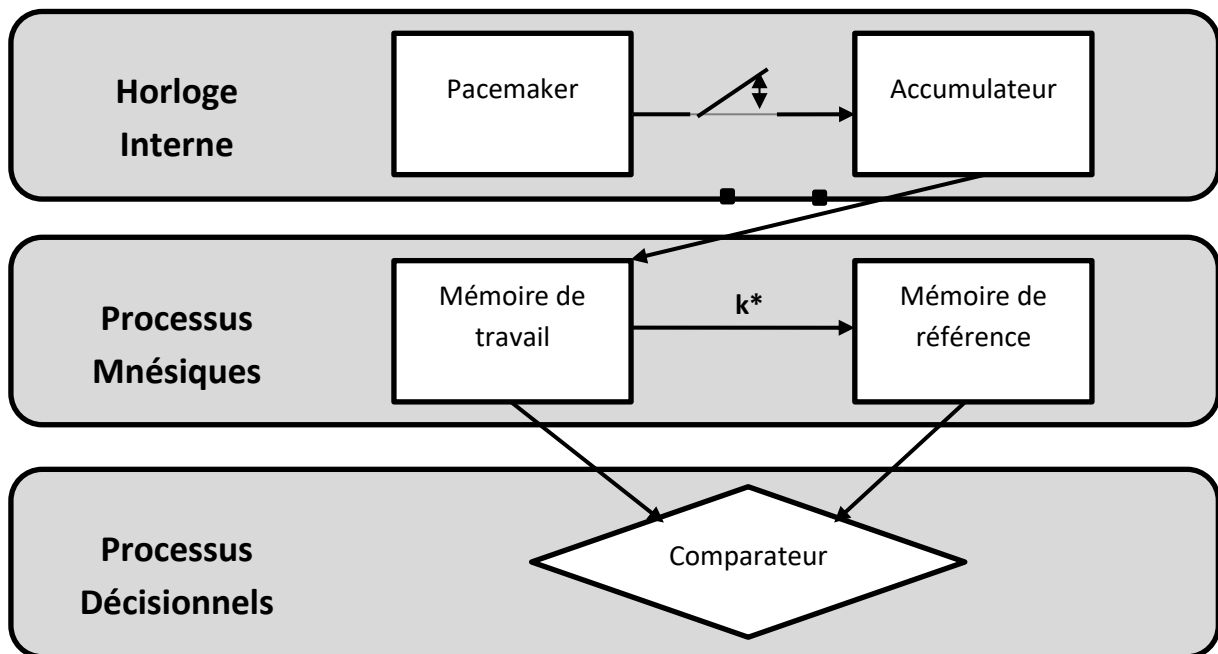


Figure 13. Modèle d'horloge interne de traitement de l'information temporelle de Gibbon, Church et Meck (1984).

Sur la base du modèle de Treisman, Gibbon, Church et Meck (1984) proposent un modèle permettant d'intégrer le système d'horloge au sein de tout un processus de traitement de l'information. Cependant, le mécanisme verbal sélectif n'a pas été inclus dans ce modèle. Ceci s'explique par le fait que les auteurs étudient l'estimation du temps chez l'animal. Cependant, ils déclarent qu'ils veulent créer un modèle général, c'est-à-dire qui rend compte à

la fois de l'estimation du temps non seulement chez l'animal, mais aussi chez l'Homme. Dans ce modèle, le jugement temporel résulte d'un traitement hiérarchique de l'information temporelle à trois niveaux. Tous ces niveaux sont susceptibles de générer de la variance dans le jugement temporel. La Figure 13 présente ce modèle.

Le premier niveau de traitement correspond à l'horloge interne. A ce premier niveau, un pacemaker envoie un flux d'impulsions à un accumulateur par l'intermédiaire d'un interrupteur. Ce système peut a priori paraître comparable à celui proposé par Treisman (1963). Cependant il existe quelques différences. Le pacemaker, nommé initialement base temps, ne génère plus les impulsions temporelles de façon totalement régulière, mais conformément à une loi de Poisson. Toutefois, sa fréquence reste modulable, dépendamment de facteurs biologiques liés au contexte (niveau d'éveil). L'interrupteur est quant à lui un nouveau mécanisme que Gibbon a ajouté. Nous reviendrons à plusieurs reprises sur ce nouvel élément dans le cadre de mes travaux de thèse sur les conduites d'estimation du temps chez l'enfant. Cet interrupteur s'ouvre et se ferme au début et à la fin de la durée à estimer. Quand le circuit est ouvert, les impulsions ne peuvent pas transiter jusqu'à l'accumulateur. Les unités ne pouvant pas incrémenter l'accumulateur, les unités sont perdues et le temps n'est pas compté. A l'inverse, quand le circuit est fermé, les unités temporelles peuvent atteindre l'accumulateur. Comme nous le verrons, selon les conditions expérimentales, la fermeture de l'interrupteur peut s'effectuer de façon automatique, mais aussi de façon contrôlée, quand le sujet décide de façon volontaire de porter attention au temps. Sa latence de fermeture et d'ouverture affecte notamment la durée selon l'équation : $Durée\ estimée = Durée\ Objective\ (D) - temps\ de\ fermeture\ de\ l'interrupteur\ (t_F) + temps\ d'ouverture\ de\ l'interrupteur\ (T_O)$. On trouve donc une autre source de variance au niveau de la fluctuation de la fermeture et l'ouverture de l'interrupteur au cours du traitement de la durée (Meck, 1984 ; Wearden, Edwards, Fakhri & Percival, 1998). Pour terminer sur l'horloge interne, l'accumulateur envisagé par Gibbon et ses collaborateurs est similaire au compteur proposé par Treisman, dans la mesure où celui-ci comptabilise les impulsions permettant d'évaluer la durée. Il existe toutefois une imprécision dans la littérature vis-à-vis de la nature de cette composante de stockage puisqu'elle est considérée comme une « mémoire sensorielle », qui précède la mémoire de travail (Church, 1984), alors que d'autres chercheurs l'envisagent comme un mécanisme de mémoire de travail (Wing, 2002).

D'autres auteurs encore pensent qu'il existe plusieurs accumulateurs (Figure 14). Cette supposition repose sur deux résultats principaux. Premièrement, et comme exposé lors du 1er

chapitre, les durées estimées changent selon la modalité sensorielle du stimulus (auditive ou visuelle). On peut donc envisager des horloges pour les différentes modalités sensorielles. En effet, comment une seule base temps pourrait-elle générer des prédictions différentes selon la modalité sensorielle de l'information temporelle ? Penney (2003) envisage alors l'existence de plusieurs horloges avec un mélange en mémoire (memory mixture) des différentes représentations de temps. Deuxièmement, les individus sont capables de traiter plusieurs durées en simultanément. Comment un individu qui est soumis à deux durées présentées simultanément peut-il aussi parvenir à estimer ces deux durées sur la base d'un seul système ? Bien que l'étude du traitement simultané des différentes durées reste rare et sporadique, certaines recherches ont montré que les humains sont capables d'estimer des durées de valeurs différentes présentées de façon simultanée (Ayhan, Revina, Bruno et Johnston, 2012 ; Brown & West, 1990 ; Burr, Tozzi et Morrone, 2007 ; Cheng, Yang, Han, Ding & Fan, 2014 ; Johnston, Arnold & Nishida 2006 ; Klapproth, 2011 ; Rousseau & Rousseau, 1996 ; van Rijn & Taagten, 2008). Ceci a aussi été montré les autres animaux (rats ou pigeons) (Church, Guilhardi, Keen, Macinnis & Kirkpatrick, 2003 ; Meck et Church, 1984 ; Meck et Williams, 1997 ; Roberts, 1995 ; Spetch et Rusak, 1992).

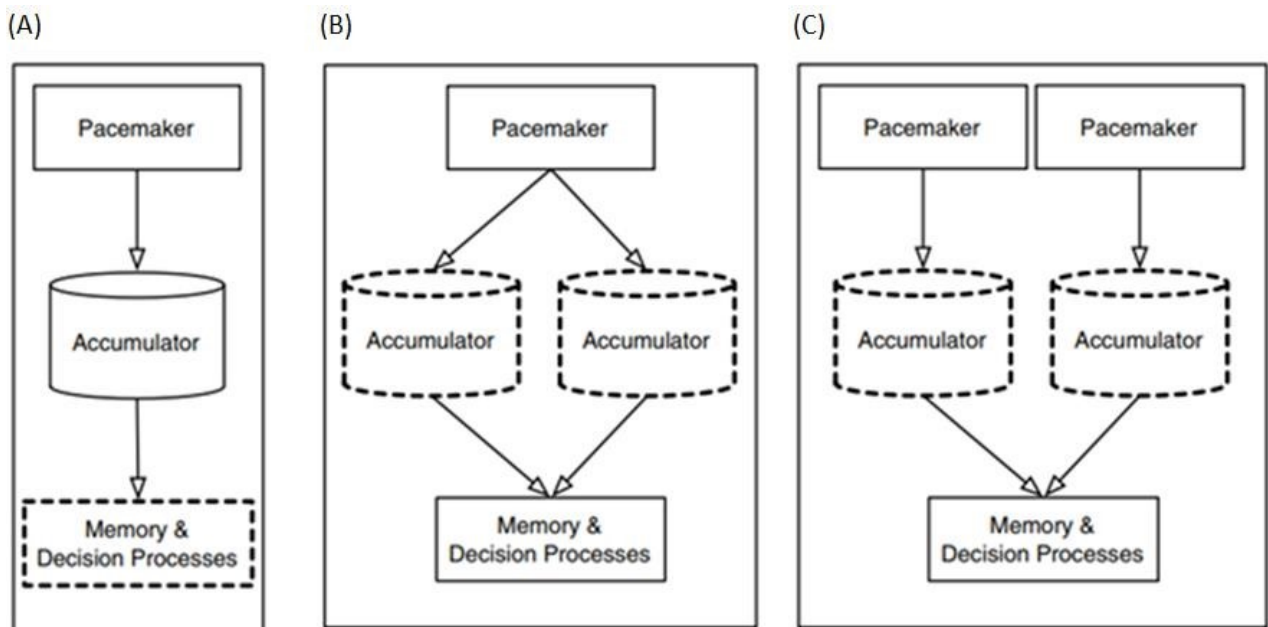


Figure 14. Systèmes existants permettant de rendre compte du traitement du temps de plusieurs durées en parallèle. Le panneau (A) décrit un système à un seul pacemaker et un seul accumulateur. Le panneau (B) décrit plusieurs accumulateurs dépendants d'un même pacemaker. Enfin, le panneau (C) est un système à plusieurs accumulateurs indépendants

(MIA). Les entités avec les lignes pointillées désignent les éléments du système qui permettent le temps parallèle. Extrait de van Rijn & Taagten, 2008.

Il existe donc aujourd'hui un débat sur la nature de cette horloge interne. Certains proposent que notre capacité à traiter plusieurs durées à la fois repose sur l'utilisation de plusieurs horloges, mais d'autres affirment qu'une seule horloge détenant plusieurs compteurs suffit pour un tel traitement. Dans ce cas, une seule et même horloge maîtresse (master clock), constituée d'un seul pacemaker pourrait traiter différentes durées de manière séquentielle. Plus exactement, les auteurs parlent de chronométrage séquentiel (Bryce & Bratzke, 2016 ; Church, 1984 ; van Rijn et Taagten, 2008). L'idée du chronométrage séquentiel est que le pacemaker va incrémenter les impulsions dans un nouveau compteur à chaque fois qu'il y a un changement dans l'environnement. Il devient ensuite possible, si l'on veut récupérer l'ensemble temporel de l'événement ou juste des bribes de celui-ci, d'additionner les éléments entre eux. Ces simples calculs mentaux seraient automatiques. Cependant, d'autres chercheurs (Cheng, Yang, Ding et Fan, 2014 ; Johnston, Bruno et Ayhan, 2011 ; Johnston, Arnold et Nishida, 2006) supposent que les individus n'utilisent pas une seule horloge interne, mais plusieurs horloges, dont une horloge pour chaque stimulus et que ces différentes horloges fonctionnent en parallèle (Eisler, 1981; Meck et Church, 1984, p.2). En d'autres termes, on posséderait de multiples pacemakers chacun étant capable de générer des impulsions dans un accumulateur adapté. La question d'une ou de plusieurs horloges internes n'est donc actuellement pas tranchée, par manque de preuves expérimentales, bien que de plus en plus de chercheurs optent théoriquement pour l'existence de plusieurs horloges internes, comme nous le verrons.

Dans tous les cas, selon le modèle d'horloge interne de Gibbon et ses collègues, le traitement des impulsions comptabilisées peut suivre deux voies non exclusives. Si la durée est considérée comme importante pour des jugements ultérieurs comme la durée standard, alors elle sera stockée en mémoire à long terme (dite mémoire de référence). Si elle est considérée peu importante, alors elle est directement envoyée dans un système de mémoire à court-terme (dit mémoire de travail). Lorsque l'information temporelle passe en mémoire de référence, elle subit une transformation par une constante k^* . Cette transformation a longtemps été considérée comme la principale cause de variance dans le jugement temporel (Allan & Gibbon, 1991 ; Gibbon, 1992). En effet, le modèle d'horloge interne proposé par Gibbon suppose un encodage « parfait » de la durée en mémoire de travail. En fait, en mémoire de référence, les sujets ne

stockent pas une durée standard, mais une distribution de durées associées (échantillons) à la durée standard. Quoiqu'il en soit, les chercheurs envisagent plusieurs sources de variances et ceci à tous les niveaux du modèle (Droit-Volet, Delgado & Rattat, 2006 ; McCormack, Wearden, Smith & Brown, 2005 ; Wearden & Bray, 2001). Delgado et Droit-Volet (2007) ont même montré que le bruit en mémoire de référence peut résulter de difficultés lors de l'encodage de la durée.

Enfin, au dernier niveau de traitement se situent les processus décisionnels. A ce niveau, l'individu compare la durée en mémoire de travail avec la durée de référence présente en mémoire à long terme. Dans le cas de la généralisation temporelle, il s'agit de la durée standard. Le jugement temporel final résulte donc de la comparaison entre la durée objective présente en mémoire de travail et la durée en mémoire de référence. A ce niveau, pour pouvoir porter un jugement temporel, comme par exemple dire que la durée présentée est similaire ou non à la durée standard, le sujet est obligé d'adopter une règle de décision (Church, 1984; Gibbon & al., 1984). La décision résulte de la comparaison entre le contenu en mémoire de travail (t) avec celui de la mémoire de référence (T), mais le sujet a un certain seuil de (β) de tolérance (Church, 1984). Or, les sujets n'ont pas tous le même seuil de tolérance (Allan, 1998). Si le sujet est conservateur, le seuil (β) sera plus petit que s'il est peu conservateur, auquel cas le seuil β sera plus grand. Nous avons donc ici la dernière source de variance de l'estimation du temps qui peut s'ajouter à celle de la mémoire de référence (T).

II – Les modèles dits « oscillators / coïncidence-detection »

Les modèles de type pacemaker-accumulateur sont actuellement remis en cause, bien qu'ils soient toujours utilisés grâce à leur pouvoir prédictif du comportement. Le dernier modèle de ce type date des années 90. Il s'agit de la théorie comportementale du temps de Killen et Fetterman (1988). Dans ce modèle, la mesure du temps dépend de la séquence d'action opérée pendant un intervalle temporel donné. Les actions réalisées sont pour la plus grande majorité stéréotypées. Il suffit alors de séquencer ces actions afin de pouvoir estimer le temps. Ce modèle est un modèle de type pacemaker car c'est l'émission d'impulsions selon une loi de Poisson qui permettrait la transition d'un comportement à un autre. Ainsi, chaque action est temporellement mesurée. L'émission des impulsions serait en revanche irrégulière car totalement dépendante du ratio des renforcements (Killen & Fetterman, 1988). Ce modèle est peu cité et beaucoup

critiqué, même si l'idée de poser l'estimation du temps sur l'action est une idée très intéressante (Coull & Droit-Volet, 2018). De plus, il est difficile de faire la part entre les comportements stéréotypés et ceux qui ne le sont pas (Lejeune et al., 2006).

Les modèles d'oscillateurs sont alors apparus dans le but de pallier aux problèmes des modèles classiques d'horloge interne. Ces modèles d'oscillateurs reposent sur l'idée que l'on ne peut se contenter d'un système de pacemaker pour rendre compte de la mesure du temps par notre cerveau. D'ailleurs, plus aucun chercheur ne défend un tel système. Ils sont tous conscients de son manque de plausibilité sur le plan neurologique. Nous sommes donc en droit de nous demander pourquoi la communauté scientifique continue d'utiliser un modèle de type pacemaker-accumulateur qui leur semble pourtant obsolète. La réponse est simple. Il s'agit avant tout d'une métaphore traduisant l'existence d'un système de traitement du temps, quelle que soit la complexité de ce système. De plus, comme nous venons de le dire, ce modèle permet de faire des prédictions simples, faciles à valider sur le plan expérimental. En somme, bien que ce modèle ne soit pas viable sur le plan neuro-anatomique, celui-ci parvient à prédire, via des mécanismes simples, les estimations du temps chez l'homme et l'animal. Ceci représente l'essence même d'un modèle...

II – 1. Les modèles de détection de coïncidence

II - 1.1. Le modèle de fréquence de battement de Miall (1989)

En 1989, Miall est l'un des premiers à proposer un modèle d'encodage de la durée fondé sur des oscillations corticales. Ce modèle affirme que l'estimation du temps ne repose pas sur une simple oscillation, mais sur de multiples oscillations co-occurentes. Au début d'un intervalle temporel à estimer, ces oscillateurs sont réinitialisés et commencent de façon synchronisée leurs activités rythmiques. Les fréquences des oscillations sont diverses et peuvent aller de 5 à 15Hz. Les oscillateurs génèrent alors des cycles allant de la désynchronisation à la synchronisation. A la fin de l'intervalle à estimer, l'estimation temporelle va reposer sur les oscillateurs synchrones, c'est-à-dire les oscillateurs ayant terminé leurs cycles (Figure 15).

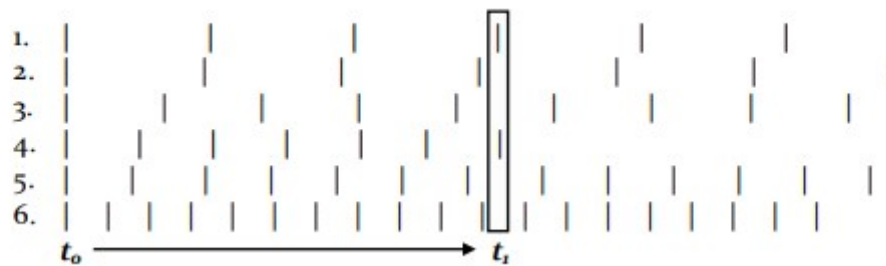


Figure 15. Représentation de l'activité rythmique d'un groupe de 6 oscillateurs à fréquences diverses, avec le codage temporel correspondant à la durée t_1 .

L'encodage de l'intervalle résulte donc de la détection du plus petit multiple commun de la phase des oscillateurs impliqués. Ainsi, si l'on doit reproduire une même durée, alors il suffira de retrouver la même synchronisation du même groupe d'oscillateurs, sur un ou plusieurs cycles, pour retrouver le même intervalle d'origine. Bien que novatrices, les modélisations réalisées à partir de ce modèle n'ont pas permis de rendre compte des productions humaines ou animales. Effectivement, ce modèle ne génère pas la propriété du temps scalaire. De plus, il n'intègre pas les possibles modulations d'oscillations provoquées par les différences du niveau d'éveil (arousal). Aussi, en 2000, Mattel et Meck ont essayé d'améliorer ce modèle.

II - 1.2. Le modèle de fréquence de battement striatal de Mattel et Meck (2000)

Le modèle SBF (Striatal Beat Frequency) de Mattel et Meck publié en 2000 dans *BioEssays* reprend l'idée du système d'oscillateurs pluriactifs proposée par Miall (1989).

Cependant, le système a considérablement été amélioré car, en plus d'être valide sur le plan neuro-anatomique, un système de modulation a été implémenté. Il s'agit donc d'un système plus flexible, qui rend mieux compte des distorsions temporelles. Selon ce modèle, l'information temporelle suit une boucle cortico-striato-thalamo-corticale (Figure 16). Au commencement d'un intervalle temporel à estimer, les neurones du cortex déchargent simultanément, permettant la réinitialisation du système. Une fois synchrones, les neurones du cortex reprennent leurs activités rythmiques. Un intervalle temporel donné serait encodé par quelques un de ces oscillateurs qui se trouvent actifs à la fois au début et à la fin de l'intervalle cible. Ce sont les neurones striataux, situés dans le striatum (structure subcorticale) qui joueraient le rôle de détecteur de coïncidence entre l'état des différents oscillateurs, puisque

celui-ci réceptionne l'intégralité de l'influx nerveux généré par ces derniers, c'est-à-dire l'ensemble des informations dopaminergiques excitatrices, générées simultanément par le cortex et le thalamus. Plus précisément, c'est l'axone collatéral des neurones épineux qui permet de jouer ce rôle de détecteur (e.g., axone de la cellule neuronale localisée dans le striatum), celui-ci étant pourvu de 10 000 à 30 000 récepteurs capables de réceptionner les informations provenant des autres neurones. Ledit neurone serait ainsi apte à détecter l'entrée en phase d'un sous-groupe de neurone. Autrement dit, la durée serait perçue par mécanisme d'intégration neuronale, lorsque le neurone striatal épineux détecte la synchronicité d'une projection corticale, émergeant à la fin de l'intervalle temporel. Cependant, pour que le neurone striatal retienne le pattern d'oscillations, il doit au préalable avoir reçu un afflux soudain de dopamine. C'est ce transfert de dopamine qui lui permettrait de passer d'une Dépression à Long Terme (LTD pour « Long Term Depression») ou le neurone est inactif, à la Potentialisation à Long terme (LTP pour « Long Term Potentiation »), où celui-ci peut entrer en potentiel d'action. Autrement dit, l'afflux de dopamine généré par la substance noire à la fin d'une durée (t_l) permettrait aux neurones striataux de retenir la signature du temps grâce à la reconnaissance du pattern d'oscillations reçu à l'instant précis de t_l . Ainsi, les cellules neurales du striatum ne pourraient émettre un potentiel d'action que si la combinaison corticale appariée a déjà été renforcée auparavant. En d'autres termes, la dopamine permet l'intégration mnésique (Malapani et al., 1998 ; Meck & Benson, 2002). Quand un neurone du striatum reconnaît la signature oscillatoire associée à la durée d'un événement particulier, la décharge de dopamine aura lieu au début et non plus à la fin du potentiel évoqué, permettant à celui-ci de rentrer dans une phase LTP et indiquant ainsi aux neurones du striatum de commencer à analyser les patterns oscillatoires qui leur parviennent jusqu'à ce qu'il reconnaisse la bonne combinaison, correspondant à la fin de la durée de l'événement.

Par la suite, l'information du neurone striatal épineux est intégrée par les noyaux des ganglions de la base (e.g., globus pallidus, noyau ento-pédonculaire), puis transférée vers le thalamus pour générer l'expression comportementale. Il est important de spécifier que l'activité thalamique peut, par un effet de feedback, moduler l'activité corticale et striatale via le passage par la voie directe ou indirecte. Ceci concourt à augmenter d'autant plus la flexibilité du modèle.

Le modèle de Matell et Meck (2000, 2004) est aujourd'hui toujours considéré comme le modèle d'horloge interne le plus abouti et plausible sur un plan neurobiologique (Coull, Cheng & Meck, 2011). Cependant, dans sa forme actuelle, celui-ci ne permet toujours pas une bonne modélisation des courbes psychophysiques normalement obtenues chez l'homme et/ou

l'animal (Mattel & Meck, 2000). En effet, celui-ci ne fait notamment pas émerger la propriété du temps scalaire. Celle-ci est intégrée de façon arbitraire dans le système.

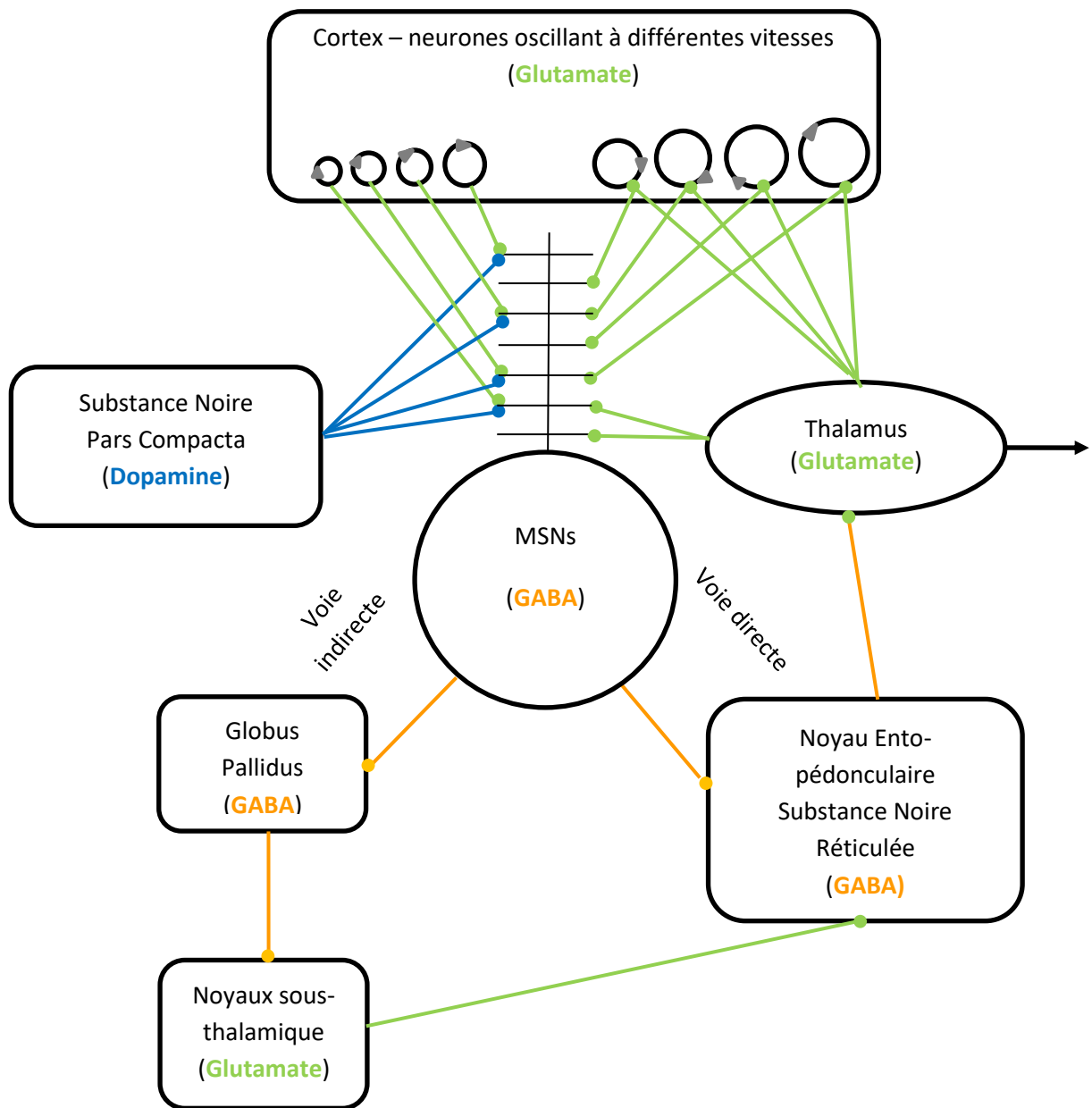


Figure 16. Modèle de fréquence de battement striatal, selon Mattel et Meck (2000).

II - 1.3. Le modèle connexionniste de Church et Broadbent.

En 1990, Church et Broadbent proposent un autre modèle peu cité bien qu'il soit fort intéressant. Son intérêt principal est qu'il permet l'unification des modèles neurologiques (Miall, 1989) avec les modèles préexistants de traitement de l'information (Gibon et al., 1984).

On peut donc s'interroger sur le fait que ce modèle ait fait l'objet de peu de citations. Ceci peut toutefois s'expliquer par les auteurs qui n'ont pas assez défendu leur modèle ou essayé de le remettre à jour suite aux premières critiques. L'opiniâtreté et la volonté de défendre son travail sont des qualités de nos jours essentielles à l'air de la communication numérique scientifique. La science devient ainsi un problème de communication. A l'arrivée du modèle de Warren Meck et ses collaborateurs, Church et Broadbent ne sont donc pas parvenus ou plutôt ne se sont pas battus pour défendre leur modèle connexionniste. Les chercheurs ne citent donc que rarement ce modèle et citent celui de Warren Meck, même si ce dernier ne fait pas non plus l'unanimité (Ivry & Schlerf, 2008). Néanmoins, comprendre le modèle de chacun demande d'être formé aux modèles et nécessite de faire l'effort d'essayer de comprendre ce modèle, voire d'en comprendre l'utilité pour les activités de recherche.

Une autre raison du manque d'intérêt de ce modèle peut découler de l'activité des différents oscillateurs constituant la base temps. Dans leur modèle, Church et Broadbent intègrent arbitrairement 11 oscillateurs dont les valeurs rythmiques sont doublées l'une à l'autre (e.g., 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8, 25.6, 51.2, 102.4 et 204.8 secondes). Selon ce modèle, l'estimation du temps ne repose pas sur un seul timer, mais onze timers différents. Cela semble suffisant pour analyser l'aptitude des individus à estimer les différents types de durées, de quelques secondes à quelques minutes. Or, le problème de ce modèle réside dans le fait que la variance est injectée directement dans chacune des entrées (e.g., oscillateur) selon un coefficient de variation c . De cette manière, le jugement temporel répond nécessairement à la loi de Weber avec un écart-type qui augmente en même temps que la moyenne. Cette variance n'est donc pas une propriété émergente du modèle. Puisque le bruit est artificiellement généré en entrée, de façon inéluctable, il se retrouve en sortie. Or, la propriété scalaire du temps doit pouvoir être expliquée mécaniquement par le modèle lui-même. C'est pourquoi j'ai testé la mise en place d'un nouveau modèle connexionniste pour essayer de pallier à ce second problème (voir Chapitre VIII de la partie expérimentale). Bien entendu, ce modèle intégrera d'autres variables afin d'être un modèle avant tout développemental. Dans le modèle de Church et Broadbent les oscillateurs sont ensuite décodés par un indicateur de statut qui lui serait apparié, et qui enregistrerait l'information de façon binaire : avec une valeur négative -1, et positive +1 selon la phase de l'oscillateur. Ces 11 indicateurs vont donc chacun donner une valeur discrète. Pris ensemble, ils constituent alors le vecteur de stockage (V_s) permettant d'indiquer une certaine combinaison correspondant à un temps donné (Figure 17). Ces informations seront ensuite évaluées par la mémoire de travail qui analyse les forces de connexion entre les indicateurs de

statut deux à deux. La connexion s'avère être positive si les signes des indicateurs de statut sont identiques et négative s'ils diffèrent. L'indicateur de statut de la mémoire de travail est relatif à l'information temporelle en cours. Cependant, comme illustré dans le tableau 1, l'indicateur de statut de la mémoire de référence résulte quant à lui de la récupération de l'information temporelle transformée via le vecteur de référence (Vr). Enfin, Vr va lui-même être transformé à travers un vecteur de sortie (Vst). Le jugement final résulte alors de la comparaison selon un critère de décision entre le vecteur de référence et le vecteur de sortie.

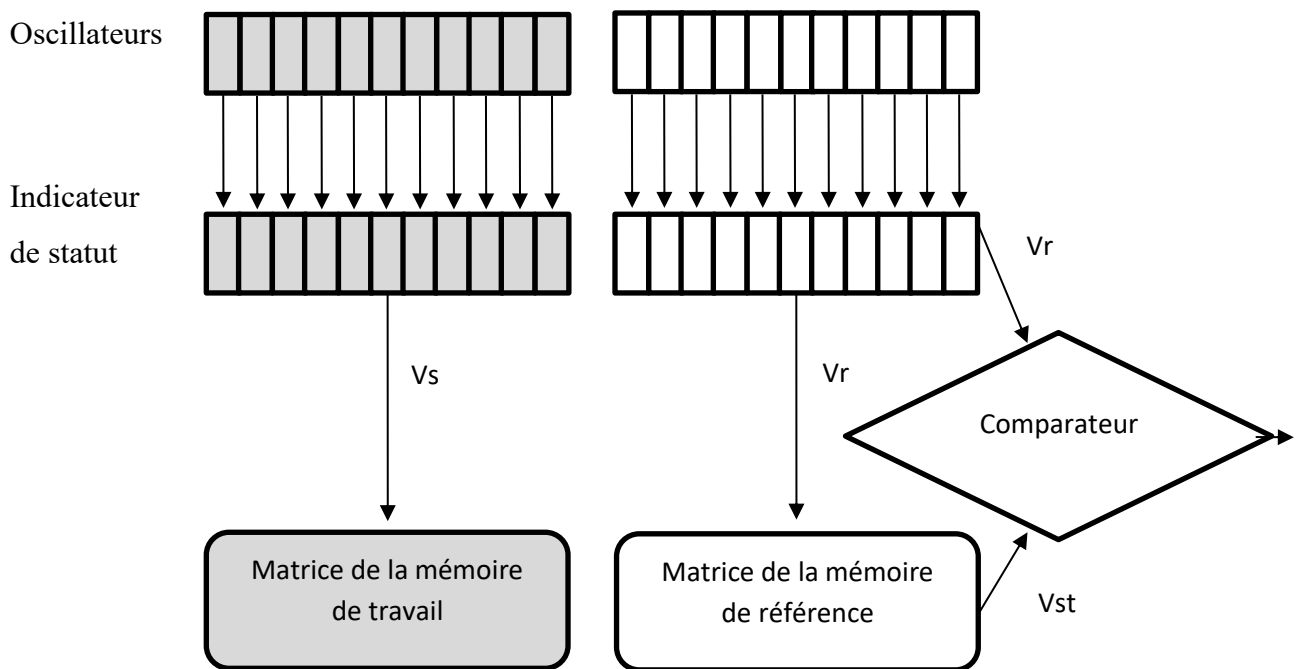


Figure 17. Modèle connexionniste de l'horloge interne selon Church et Broadbent (1990). Vs = Vecteur de stockage ; Vr = Vecteur de référence ; Vst = Vecteur de stockage transformé.

Table 1. Tableau d'un vecteur de stockage représentant une durée de 17secondes : $(0.2 + 0.8 + 3.2 + 12.8 = 17s)$.

0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4	12.8	25.6	51.2	102.4	204.8
+	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-

Une dernière limite du modèle est qu'il est basé uniquement sur la similarité du vecteur. De ce fait, les chercheurs ont décelé que lorsque le seuil est bas, 15 secondes sont plus aussi

similaires à 40 secondes qu'à 30 secondes (Wearden & Doherty, 1995 ; Droit-Volet & Wearden, 2003).

Les modèles d'oscillations évoquent différentes structures impliquées dans le traitement du temps. Quelles sont exactement ces structures ? Nous allons consacrer une partie de ce chapitre aux résultats des études sur ce sujet dans le domaine des neurosciences.

III - Structures corticales impliquées dans les modèles

Ces 15 dernières années ont été fondamentales pour la recherche en neurosciences sur la perception du temps. Les activations cérébrales durant une tâche temporelle dépendent du type de tâche ainsi que de sa complexité (Livesey, Wall & Smith, 2007). Cependant, l'ensemble des recherches semble pointer 3 aires corticales qui constitueraient le substrat neurologique de nos aptitudes de perception du temps. Le temps psychologique serait ainsi tributaire du fonctionnement du cortex frontal, du cervelet et des ganglions de la base (Coull, Cheng & Meck, 2011; Coull, Vidal, Nazarian & Macar, 2004 ; pour une revue de la littérature sur les aires impliquées selon la tâche et la durée voir aussi Grondin, 2010 ; Meck, Penney & Pouthas, 2008). L'amygdale viendrait potentiellement s'ajouter comme composante connexe, celle-ci ayant la capacité de ralentir ou d'accélérer les oscillations dans le cas notamment de la peur (Meck & MacDonald, 2007). Cette composante peut également s'avérer importante pour les modèles dits « pacemaker-accumulators », notamment le modèle de traitement de l'information temporelle de Gibbon et ses collaborateurs. En effet, la réponse automatique de l'amygdale face à des stimuli menaçants est un des principaux facteurs permettant de moduler l'attention et ainsi de répondre rapidement face à un danger potentiel (Davis & Whalen, 2001).

Au niveau du cortex frontal, les aires motrices supérieures (AMS) se sont montrées fondamentales dans le traitement temporel, que celui-ci soit un traitement du temps perceptif (comme avec les tâches de discrimination), ou moteur (par exemple, une tâche de production, une tâche de synchronisation) (Hinton, Harrington, Binder, Durgerian, & Rao, 2004 ; Macar, Coull & Vidal, 2006 ; Macar, Lejeune, Bonnet, Ferrara, Pouthas, Vidal & Maquet, 2002). Elles ont été décelées tant dans l'estimation de durées brèves (< 1s) (Ferrandez, Hugueville, Lehericy, Poline, Marsault & Pouthas, 2003 ; Grondin, 2010 ; Tregellas, Davalos & Rojas, 2006) que dans celles de durées plus longues, supérieures à 1 seconde (Jahanshahi, Jones, Dirnberger, & Frith, 2006 ; Penney & Vaitilingam, 2008 ; Rao, Mayer, & Harrington, 2001 ;

Smith, Taylor, Lidzba, & Rubia, 2003). Il est maintenant admis que la SMA fait partie de la voie striato-corticale proposée dans le modèle de striatal beat frequency (Macar, Anton, Bonnet & Vidal, 2004 ; Macar, Coull & Vidal, 2006). Son rôle, bien qu'il soit encore mal défini, serait lié à des processus mnésiques ou attentionnels (Coull, 2004). L'AMS se situe dans le cortex préfrontal. Or, comme nous le verrons lors du chapitre, la maturation du cortex préfrontal est lente et non terminée chez le jeune enfant (Casey, Tottenham, Liston & Durston, 2005 ; Sowell, Thompson, Holmes, Batth, Jernigan & Toga, 1999 ; Tsujimoto, 2008). Son manque de maturité et son impact sur les capacités attentionnelles peuvent donc être à l'origine des moins bonnes performances temporelles du jeune enfant.

L'AMS dans le cortex préfrontal joue donc un rôle, mais on retrouve aussi le cortex préfrontal droit médian (mPFC pour « medial prefrontal cortex »). Récemment, Buhusi et ses collaborateurs ont montré que l'inactivation chez le rat de cette structure provoque une augmentation de la variabilité temporelle (Buhusi, Reyes, Gathers, Oprisan & Buhusi, 2018). Cette structure et sa lente maturation peut donc expliquer la plus grande variance des jugements temporels chez l'enfant. Toutefois, comme le reconnaissent les auteurs, on ne connaît pas le rôle exact de cette structure sur le jugement du temps. Cette structure pourrait ainsi être impliquée dans les fonctions d'attention qui indirectement impacteraient le jugement du temps, notamment sur le WR. Cependant, puisqu'elle joue sur la variabilité et non la précision, elle ne semble pas être impliquée dans une fonction purement temporelle, si tant est qu'une telle fonction existe. Quoi qu'il en soit, il est possible de conclure que le cortex préfrontal et ses différentes structures sont impliqués dans le jugement du temps.

Le cervelet a également été identifié comme assurant un rôle important (Dennis et al., 2004 ; Ivry & Spencer, 2004 ; Jahanshahi, Jones, Dirnberger & Frith, 2006 ; pour une revue, voir Ivry, Spencer, Zelaznik & Diedrichsen, 2002). Cependant, la question qui reste à déterminer, et qui fait débat dans la littérature, est de savoir si le cervelet est impliqué uniquement dans le traitement des durées courtes ou s'il est impliqué dans le traitement des durées courtes et longues. Les résultats ne sont pas totalement clairs à ce sujet. Certains auteurs enregistrent des activations du cervelet pour des traitements de durées pouvant aller jusqu'à 24 secondes (Tracy, Faro, Mohamed, Pinsk & Pinus, 2000). D'autres mettent en évidence une influence du cervelet dans le traitement des durées courtes (Koch et al., 2007 ; Lewis & Miall, 2003) et évoquent son activation pour la régulation temporelle de l'action. En effet, des études sur les lésions du cervelet dénotent que la contusion affecte essentiellement le « timing » dans la régulation de l'action (Droit-Volet, Zélanti, Dellatolas, Kieffer, Massioui, Brown, Doyere,

Provasi & Grill, 2013). Dans une série d'études, Spencer, Zelaznik, Diedrichsen et Ivry (2003) montrent qu'une lésion du cervelet altère uniquement la production de mouvements discontinus (dessin de cercle intermittent), alors même qu'aucune interférence n'a lieu lors d'une production de mouvements rythmiques (dessin de cercle continu). Cette distinction a été attribuée à l'inaptitude des patients à former une représentation explicite du temps absolu entre événements successifs. Cependant, les études de lésions sont souvent imprévisibles quant à la localisation des lésions et leur ampleur. Or, il semblerait que le rôle du cervelet dépende des sous-structures impliquées. La partie centrale du cervelet inclut le vermis, zone impliquée dans l'initiation et l'exécution du mouvement, alors que les parties latérales du cervelet seraient plus impliquées dans le traitement des durées courtes. De plus le cervelet serait aussi lié à des processus décisionnels (Gibbon, Malapani, Dale & Gallistel, 1997), le cervelet étant un autre « petit cerveau ».

Récemment, Jantzen (2005) met à jour l'activation d'un circuit fonctionnel comprenant le thalamus, le striatum, la substance noire et le cortex (Jantzen et al., 2005). Ce circuit correspond à la boucle cortico-striato-thalamo-corticale évoquée par Mattel et Meck (2000) dans le striatal beat frequency model. D'une part, le striatum réceptionne les projections du cortex. Comme nous l'avons déjà vu, le striatum permet l'encodage de l'information temporelle (Chiba, Oshio & Inase, 2008 ; Matell, Meck & Nicolelis, 2003). D'autre part, des projections sont émises des ganglions de la base vers le thalamus qui lui-même projette sur le cortex. Les ganglions de la base ont donc également un rôle important dans l'estimation du temps. Les résultats des études chez les patients Parkinsoniens présentant des dysfonctionnements du système dopaminergique confortent cette idée. En effet, ces sujets obtiennent souvent de mauvaises performances dans les tâches de discrimination de durées. De plus, ils peuvent améliorer leurs performances temporelles avec l'administration d'un antagoniste à la dopamine agissant sur le fonctionnement des ganglions de la base. Comme nous l'avons déjà évoqué, il s'agirait de la substance noire qui permettrait aux neurones striatales l'intégration de la signature temporelle des projections corticales (Mattel & Meck, 2000).

En conclusion, la création d'un modèle d'horloge interne avec des oscillateurs qui peuvent générer la propriété scalaire du temps est nécessaire. C'est pour cela que je me suis attelé à ce travail. On ne peut pas omettre l'existence d'oscillations à la base de l'estimation du temps. Cependant, il reste des questions vis-à-vis du positionnement de l'enregistrement du temps dans le cerveau et du nombre de compteurs nécessaires (un ou plusieurs ?). Enfin, le

modèle d'oscillateur doit être fonctionnel chez l'adulte, mais aussi chez l'enfant qui, malgré ses erreurs de jugement temporel, parvient à se construire une représentation des durées, dans la mesure où il en fait suffisamment l'expérience.

CHAPITRE III : DEVELOPPEMENT DE LA PERCEPTION ET DE L'ESTIMATION DU TEMPS

I – D'un temps automatique à un temps contrôlé

Si les premières questions quant au développement de la perception du temps au cours de l'enfance ont été proposées il y a plus d'un siècle par les travaux de Jean-Marie Guyau (Michon, Pouthas & Jackson, 1988), ce n'est que depuis ces 20 dernières années que cette question a fait l'objet d'études expérimentales systématiques. Influencés par les travaux de Piaget, certains chercheurs pensaient que l'estimation du temps demandait des capacités sophistiquées de raisonnement. Cependant, plus influencés par les travaux chez l'animal, certains chercheurs se sont mis à suggérer que nos capacités de perception du temps doivent être fonctionnelles dès le plus jeune âge. Fallait-il encore le démontrer. Pour des raisons méthodologiques évidentes, les études d'estimations chez le jeune enfant restent rares et assez sporadiques. Dans ce chapitre, nous allons donc décrire plusieurs études suivant une logique développementale, commençant par décrire les activités primaires et automatiques du temps chez le nourrisson, notamment via ses activités rythmiques et ses conduites temporelles conditionnées. Nous analyserons par la suite comment l'enfant passe de ce temps vécu à un temps représenté. Enfin, nous analyserons le possible impact de la maturation des capacités cognitives dans ce développement de la sensibilité au temps.

I – 1. Le traitement temporel primitif et automatique

I – 1.1. Régulation des activités rythmiques

A sa naissance, le bébé vient au monde avec une série de comportements rythmiques. Leur fréquence et leur diversité sont importantes. On peut néanmoins citer deux comportements qui ont fait l'objet de nombreuses études : le pédalage et la succion non nutritive. Le pédalage, aussi appelé marche néonatale, résulte de l'alternance de la flexion et de l'extension des jambes (Thelen, 1981, Thelen & Fisher, 1982). La succion non nutritive, aussi appelée succion de haute

amplitude, est quant à elle l'acte de succion qui n'a pas pour fonction l'absorption de fluide, mais que l'enfant produit lorsqu'on lui met une tétine dans la bouche. Ce comportement résulte de l'enchaînement rythmique de rafales de succions (succession de pressions positives et négatives exercées sur la tétine) et de pauses (Siqueland & De Lucia, 1969).

Ces deux comportements, le pédalage et la succion non nutritive, sont stéréotypés, c'est-à-dire qu'ils sont temporellement constants, basés sur une horloge endogène. Pour certains auteurs, la stabilité de l'organisation temporelle des activités rythmiques chez le très jeune enfant fait preuve du contrôle endogène par des micro-rythmes du système nerveux central (Crook, 1979, Wolff, 1991), pouvant être détectés dès 10 semaines de gestation grâce aux mouvements des membres inférieurs du fœtus (De Vries, Visser & Prechtl, 1984). Après l'épiphénomène qu'est la naissance, des études ont montré que le nourrisson est capable de détecter des violations de quelques centaines de millisecondes dans la structure temporelle d'une séquence rythmique (Demany, McKenzie & Vurpillot, 1977). Plus récemment, de Hevia et ses collaborateurs sont même parvenus à montrer que le bébé de quelques heures réagit à des différences temporelles entre deux stimuli visuels (3,8 vs 1s) (de Hevia, Izard, Coubart, Spelke & Streri, 2014). Des horloges primitives semblent donc déjà fonctionnelles à la naissance, même si ces horloges peuvent différer des horloges à la base du jugement des durées.

Concernant les activités rythmiques, les chercheurs se sont en outre demandés si l'enfant est capable de s'adapter à des rythmes purement arbitraires au point de rompre avec ses propres activités internes (Droit, Provasi & Pouthas, 1993 ; Pouthas, 1993, 1995). Rovee-Collier (1993) a montré que le nourrisson est effectivement capable de moduler ses activités rythmiques automatiques afin de provoquer un changement dans son environnement. Dans ses expériences, on voit que le nouveau-né âgé de 2-3 mois augmente sa fréquence de pédalage afin de voir bouger un mobile. Ceci grâce à un fil préalablement équipé sur le nourrisson, reliant son pied au mobile. Le nouveau-né est également capable de moduler la fréquence de la succion non nutritive dès l'âge de 3 jours dans l'objectif d'entendre la voix de sa mère (De Casper & Fifer, 1980) ou dans celui d'entendre des battements cardiaques (De Casper & Sigafos, 1983). Provasi, Pouthas et Jacquet (1993) ont toutefois montré les limites de cette modulation temporelle, car si les enfants de 4 jours et ceux de 2 mois parviennent à réduire la durée de leur pause inter-succion, seuls ceux de 2 mois parviennent également à rallonger la durée de leur pause. Comme le suggère Viviane Pouthas, l'acquisition du contrôle des activités rythmiques constitue le tremplin de l'apprentissage du contrôle moteur, mais aussi du temps (Pouthas, 1993, 1995). Effectivement, ces activités disparaissent peu à peu au cours de la première année de vie

pour laisser place à des activités plus contrôlées par l'enfant. En effet, c'est dans la régulation de l'action et de son contrôle que l'enfant fait l'expérience du temps (Coull & Droit-Volet, 2018).

I – 1.2. Procédure d'apprentissage comportemental basé sur le conditionnement temporel : Régulation des activités non-rythmiques

Bien que peu employées chez l'Homme, les techniques de conditionnement temporel se sont montrées assez efficaces pour mettre en évidence les capacités d'adaptation temporelle des jeunes enfants, notamment leurs capacités à s'adapter à des durées purement arbitraires, sans rapport avec leurs activités rythmiques. Cependant il n'y a encore que trop peu d'études sur le conditionnement au temps chez l'enfant. On peut citer celle de Brackbill et Fitzgerald (1972). Ces auteurs ont conditionné des enfants âgés de 1 mois à un changement toutes les 20 secondes de luminosité (lumière éteinte vs allumée) d'une durée de 4 secondes, entraînant un réflexe pupillaire de constriction. Après plusieurs essais, une fois que le conditionnement est établi, le réflexe pupillaire apparaît aux alentours de 20 secondes même en l'absence de changement de luminosité. Ceci démontre que le nourrisson est capable de prédire l'occurrence temporelle d'un stimulus, autrement dit, qu'il traite le temps. Plus récemment, Colombo et Richman (2002) ont habitué des nourrissons âgés de 4 mois à un stimulus lumineux de 2 secondes émis toutes les 3 ou 5 secondes tout en enregistrant leur fréquence cardiaque. Une fois habitué, lorsque le stimulus est retardé de 500ms, la fréquence cardiaque des nourrissons décélère. Pour ces auteurs, ce ralentissement cardiaque témoigne de l'attente temporelle de l'enfant et, donc, de la précocité des comportements de jugement du temps chez les nouveaux nés.

Une des techniques de conditionnement employée par la communauté scientifique est le programme de conditionnement à intervalle fixe (FI pour « fixed interval »). Le FI a d'abord été utilisé chez l'animal (Richelle & Lejeune, 1979) avant d'être réalisé chez l'Homme (Baron, Kaufman & Stauber, 1969 ; Wiener, 1964, 1969) et plus récemment chez l'enfant (Bentall & Lowe, 1981, 1982 ; Darcheville, Rivière & Wearden, 1992). Dans ce programme, la réponse du participant, l'animal en l'occurrence, est renforcée lorsqu'elle est émise après un intervalle temporel fixé depuis sa réponse renforcée précédente. Si des réponses sont émises au cours de cet intervalle fixe, elles n'ont aucune conséquence, elles ne sont pas renforcées. Après quelques séances d'entraînement, l'animal génère un comportement de réponse typique suggérant qu'il

en a compris l'objectif temporel de la situation. En effet, il opère une transition entre une première phase lors de laquelle il ne donne pas de réponse (juste après le renforcement) et une phase avec un taux de réponse élevé (proche de la fin de l'intervalle fixé). Pendant cette phase, il accélère progressivement la fréquence de ses réponses du début à la fin de chaque intervalle, dessinant un patron de réponse « festonné » (« scalloped pattern of response »). Il s'installe donc une régulation temporelle spontanée.

Comme susmentionnée, cette méthode a également été employée chez l'enfant. Les agents renforçateurs sélectionnés sur ce type de population sont typiquement des confiseries (Weisberg, 1970 ; Weisberg & Tragakis, 1967), ou des séquences de dessins animés / diapositives (Long et al., 1958 ; Pouthas, 1981a ; Pouthas et Jacquet, 1983) ou encore des peluches, notamment des marionnettes qui sont éclairées au moment de l'action que l'on veut renforcer (Bentall & Lowe, 1982). Avec cette méthode, Darcheville, Rivière et Wearden (1993) ont montré que les nourrissons sont aptes à modifier leurs actions dans le temps, ces derniers n'appuyant qu'une ou deux fois à la fin de l'intervalle. Toutefois, il est important de se montrer parcimonieux car ces résultats n'ont pas été répliqués, et d'autres études montrent que le nourrisson ne parvient pas réellement à inhiber temporellement ses réponses produisant un comportement comme l'animal avec une pause et de nombreuses réponses à l'approche de la fin de l'intervalle (Bentall, Lowe & Beasty, 1985 ; Lowe, Beasty & Bentall, 1983). Quel que soit le type de patron de réponse établi, celui-ci témoigne d'un apprentissage temporel ; La pause produite par le jeune enfant est fonction de la longueur de l'intervalle de FI.

L'ensemble des études chez le nourrisson montre bien la capacité précoce des jeunes enfants à traiter du temps qui passe, et qu'un système d'horloge interne, bien que bruité, est fonctionnel dès le plus jeune âge. Cependant, ces études ne déterminent pas la spécificité du traitement temporel chez le jeune enfant et ses changements avec l'âge. Ils ne permettent donc pas d'envisager l'augmentation de la sensibilité au temps au cours du développement.

I – 2. D'un jugement implicite à un jugement explicite du temps : le temps représenté et contrôlé

I – 2.1. Un temps procédural chez le jeune enfant de 3 ans

Dans les études développementales que nous venons d'exposer, l'estimation du temps se fait de façon automatique, sans conscience du temps, sans raisonnement temporel. Dès le plus jeune âge, nous sommes donc dotés de mécanismes nous permettant de percevoir les

durées, sans pour autant être capables d'en avoir une représentation abstraite. Cette représentation explicite du temps dépend du développement verbal et cognitif de l'enfant, fruit d'un construit qui se met progressivement en place jusqu'à l'âge d'environ 8 – 10 ans (Droit-Volet, 2000). Avant l'âge de 4 ans, le temps n'est pas représenté, il est éprouvé en dedans, ressenti dans la dynamique de la perception et de l'action. Pour le très jeune enfant, le temps est donc uniquement vécu. En ce sens, le temps est indissociable de ses aspects perceptifs et spatiaux (Droit-Volet & Rattat, 1999). C'est du reste pour cette raison que les très jeunes enfants sont plus sujets aux distorsions temporelles, leurs perceptions temporelles étant pour eux tributaires des caractéristiques de l'action constituant la durée. Ils apprennent donc un temps pour chaque action dont ils font l'expérience. Il existe alors autant de temps qu'il existe d'actions ou d'événements. A ce propos, Sylvie Droit-Volet parle de temps hétérogène, de temps multiples (Droit-Volet, 2001). Cela suggère que le monde perçu par les enfants avant 4 ans n'est pas régi par une seule dimension temporelle s'écoulant de façon uniforme (une notion de temps absolue), mais par une pluralité de temps éparées. Ce temps étant éclaté et relatif au vécu, les enfants ne parviennent pas à extraire la temporalité d'un événement et la transposer à un autre événement. Par exemple, les enfants n'arrivent pas à associer la durée d'une action à une autre action. L'étude réalisée par Rattat et Droit-Volet (1999) montre clairement cet effet. Dans cette expérience, des enfants de 3 ans et 5 ans $\frac{1}{2}$ sont entraînés à presser un buzzer pendant 5 secondes. Vingt-quatre heures plus tard, la moitié des enfants reprennent la même tâche, alors que l'autre moitié doit appuyer sur un bouton de réponse pendant la même durée. Les résultats montrent alors que si les enfants de 5 ans $\frac{1}{2}$ parviennent à reproduire la durée dans les deux conditions, les enfants de 3 ans ne parviennent pas systématiquement à transférer la durée d'une action à une autre. Néanmoins, même si le jeune enfant n'est pas capable de se représenter et de comprendre le temps, celui-ci a déjà un certain « savoir-faire » temporel. Il est notamment capable d'ordonner dans le temps une suite d'événements (Nelson, 1986), de comparer (Droit-Volet, 1998 ; Droit-Volet & Gautier, 2000 ; Friedman, 1990) et de catégoriser la durée d'événements quotidiens (Rattat & Tartas, 2017). Récemment, Droit-Volet et Coull (2018) fait la distinction entre deux savoirs temporels chez l'enfant. Le premier est un savoir implicite, non conscient, et l'autre est un savoir explicite, conscient. Les auteures ont alors comparé les performances temporelles des jeunes enfants entre une tâche de jugement implicite et explicite. Dans la tâche de jugement implicite, aucune référence n'est faite au temps. L'enfant voit simplement deux stimuli séparés par un intervalle temporel et doit appuyer le plus vite possible après le second stimulus. Dans le jugement explicite, la tâche est similaire, sauf que l'on fait

référence à l'intervalle temporel entre les deux stimuli, en donnant comme consigne à l'enfant d'apprendre la durée de cet intervalle temporel. Il apparaît alors qu'il n'y a aucune différence dans la performance temporelle en jugement implicite selon l'âge des enfants. En revanche, les performances temporelles s'améliorent avec l'âge en jugement explicite. Avec l'âge émerge donc un traitement explicite, conscient, contrôlé du temps, qui dans certaines situations vient perturber les 1^{er} savoir-faire.

Dans le cas de la situation de conditionnement à intervalle fixe, on observe clairement l'émergence d'un jugement explicite, ce qui a un impact sur les conditionnements temporels précoces. Alors que les nourrissons et les enfants âgés de plus de 5 ans parviennent à produire des comportements temporels en FI, une rupture dans les conduites temporelles apparaît chez les enfants âgés de 2-3 à 4-5 ans (selon les études) (Bentall, Lowe & Beasty, 1985 ; Droit, Pouthas & Jacquet, 1990 ; Zeiler & Kelley, 1969). En FI, les enfants de plus de 5 ans mettent en œuvre deux types de comportements adoptés par l'adulte, soit un débit de réponse soutenue, où le sujet appuie tout au long de l'intervalle, soit un débit de réponse lente avec 1 ou 2 réponses à la fin de l'intervalle. Ces comportements sont fondés en fait sur des règles verbales, des hypothèses expérimentales formulées par le sujet (Droit, Pouthas & Jacquet, 1990). Le débit de réponse soutenue correspond à la règle selon laquelle le renforcement est délivré après un certain nombre de réponses, et le débit de réponse lente à la règle selon laquelle l'agent renforçateur est délivré après un certain temps. Or, à 3-4 ans, l'enfant produit un comportement inconsistant. On dit qu'il a un pattern de réponse instable, parce qu'il fait n'importe quoi, appuyant de façon erratique. Bentall et ses collaborateurs expliquent ces résultats par l'acquisition du langage qui viendrait altérer les performances temporelles précoces, les performances conditionnées au temps. Pour rendre compte de cela, les auteurs réalisent une seconde étude (Bentall & Lowe, 1987) dans laquelle les sujets reçoivent soit une consigne à débit de réponse soutenue (e.g., appuyer tout au long de l'intervalle), soit une consigne à débit de réponse lente (e.g., attendre et appuyer), soit la consigne de se donner soi-même des règles d'actions et de les dire à haute voix. Les résultats montrent que l'enfant âgé de 2 à 4 ans ne parvient pas à formuler une règle d'action en FI. Il ne parvient qu'à appliquer la consigne de débit de réponse élevé. Ce serait donc le développement de fonctions et de stratégies explicites qui vient entraver les premiers comportements temporels précoces. Cependant, à l'âge de 2-4 ans, l'enfant n'a pas encore acquis une représentation explicite du temps, une notion du temps lui permettant de se fixer des règles d'attente (début de réponse lente) comme le fait l'adulte ou

les enfants plus âgés. Ainsi, l'acquisition d'une notion de temps chez l'enfant influence l'évolution des conduites temporelles.

1 – 2.2. Conceptualisation et homogénéisation du temps chez l'enfant de 5 à 8 ans

Le langage peut être un des facteurs déterminant pour la mise en place d'une représentation temporelle et du séquençage d'évènements. L'apprentissage de marques temporelles verbales entre 2 et 4 ans (ensuite, avant, après, hier, demain, plus tard...) (Montangero, 1988, 2001), et du calendrier entre 5 et 10 ans (saisons, mois, semaines) aident l'enfant à se repérer dans le temps. Une récente étude Canadienne montre que cette acquisition est de plus en plus précoce (aux âges de 5-6 ans), lié au rôle éducatif des parents (Labrell, Mikaeloff, Perdry & Dellatolas, 2016). L'acquisition de ces repères temporels peuvent effectivement favoriser la représentation abstraite du temps, le rendant indépendant de(s) action(s) / évènement(s) qui le compose(nt). Toutefois, au début, l'enfant va apprendre les cycles temporels du calendrier comme des listes verbales. Ce n'est que vers l'âge de 7-8 ans qu'il pourra l'utiliser avec flexibilité, c'est-à-dire à en extraire les éléments sans avoir recours à la liste entière, comme le dit Puyjarinet (2011). Par ailleurs, L'enfant va également acquérir les termes temporels relatifs notamment au futur (après, demain, dans longtemps...) et au passé (avant, hier, il y a longtemps...). Ces termes sont progressivement intégrés au vocabulaire de l'enfant, relativement à la distance temporelle qu'elles impliquent, les termes de courtes durées étant acquis avant ceux de plus longues durées, ce qui correspond au développement des capacités de projection de l'enfant.

Comme nous l'avons déjà évoqué, à partir de 6 ans, l'enfant va également apprendre une autre liste verbale importante pour la mesure du temps appelée comptine numérique. Cependant, utiliser le nombre pour mesurer le temps qui passe est une aptitude qui nécessite de concevoir le temps comme une dimension homogène, continue et quantifiable, ce qui n'est que rarement concevable avant l'âge de 6 ans (Wilkening, Levin & Druyan, 1987). En effet, dans des situations d'attente ou d'estimation temporelle, les plus jeunes enfants utilisent plus de comportements moteurs rythmiques comme stratégie de comptage du temps (Pouthas, Droit-Volet & Jacquet, 1993). Ceci souligne l'importance du mouvement pour l'estimation du temps chez les plus jeunes enfants et le développement des conduites d'attente. Cependant, ce stratagème indique qu'ils sont en bonne voie pour l'apprentissage d'une notion de temps (Pouthas, Droit-Volet & Jacquet, 1993).

En somme, le jugement implicite du temps, le temps perçu, est précoce et repose sur des

processus innés. Néanmoins, on assiste avec le développement à une amélioration des conduites temporelles et de la sensibilité temporelle. En effet, comme nous l'avons vu lors du premier chapitre, quel que soit le type de tâche employée, les jugements et productions temporels s'améliorent avec l'âge, étant plus précis et moins variables. Cette amélioration peut provenir de l'acquisition du langage, de l'acquisition de stratégies de comptage de temps, et de la conceptualisation du temps. A ce niveau et de notre point de vue, il est important de réaliser une distinction entre les effets spécifiques qui proviennent du développement de certaines aptitudes particulières, comme celles que nous venons de citer, et les effets qui résultent d'un accroissement de capacités cognitives générales, que ce soit en terme quantitatif ou qualitatif. La validation du rôle des fonctions cognitives générales dans le développement du jugement temporel est importante. En effet, dans le cas où la variabilité dans le jugement temporel ne serait pas d'origine cognitive, alors l'horloge interne du jeune enfant serait faillible. L'enfant serait, nous serions dotés, d'une horloge interne défectueuse, nous trompant en permanence sur le cours du temps. Mais alors, comment expliquer les conduites précises d'estimation du temps chez le bébé, chez l'animal ? Comment peut-on vivre dans un environnement par essence temporel, sans mécanisme nous permettant de prédire de façon précise la venue des événements ? Dans le cas inverse, l'horloge interne est un construit « infallible », et les distorsions temporelles ne seraient que le fruit de nos capacités cognitives. Ce serait donc les capacités cognitives plus ou moins limitées selon l'âge et/ou le contexte qui expliqueraient la plupart des biais temporels. Pour ce qui nous concerne, nous pensons que les deux hypothèses ne sont pas exclusives, le bruit dans le jugement temporel pouvant être généré simultanément par le mécanisme d'horloge interne et les ressources cognitives disponibles. Dans le dernier chapitre de cette thèse, nous testerons un modèle « réunificateur » basé sur l'existence de ces systèmes « faillibles ». Comme nous allons le voir dans la prochaine partie, les chercheurs ont étudié deux dimensions cognitives fondamentales pouvant altérer notre jugement du temps : la mémoire et l'attention.

II – Un problème de capacités cognitives

II – 1. La Mémoire

Dans des études sur les adultes, il est maintenant bien documenté que, par l'effet de processus mnésique, le contexte temporel influe sur l'estimation du temps que ce soit du rythme ou de la durée (Adams & Mamassian, 2004 ; Battaglia, Jacobs & Aslin, 2003 ; Damsma,

vanderMijn & vanRijn, 2018 ; Ernst & Banks, 1999 ; Jazayeri & Shadlen, 2010 ; Körding et al., 2007 ; Mamassian, Landy & Maloney, 2002 ; McAuley & Jones, 2003 ; McAuley, Jones, Holub, Johnston & Miller, 2006 ; Miyazaki, Nozaki, & Nakajima, 2005 ; Petzschner, Maier & Glasauer, 2012 ; Shi & Burr, 2016 ; Stocker & Simoncelli, 2006 ; Verstynen & Sabes, 2011 ; Walsh, 2003). Ceci se voit clairement dans le cas de la loi de Vierordt (1868) avec cet effet typique de tendance centrale où les durées les plus courtes sont surestimées et les durées les plus longues sous-estimées (Lejeune & Wearden, 2009). Ce biais dans les estimations temporelles montre en effet que le jugement des durées n'est pas absolu, mais relatif à la distribution des durées enregistrées en mémoire.

Selon la théorie bayésienne de l'inférence perceptuelle du temps illustrée Figure 18, l'intervalle actuellement perçu (Likelihood) est pondéré par l'expérience antérieure (Prior) pour arriver à une estimation subjective de la durée (Posterior). Ainsi, il y aurait un « online prior », où la durée précédente stockée en mémoire est mise à jour essai par essai, avec une influence plus grande sur l'estimation actuelle des essais les plus récents (Di Luca & Rhodes, 2016 ; Dyjas, Bausenhardt, & Ulrich, 2012 ; Lapid, Ulrich, & Rammsayer, 2008 ; Taatgen & van Rijn, 2011 ; van Rijn, 2016).

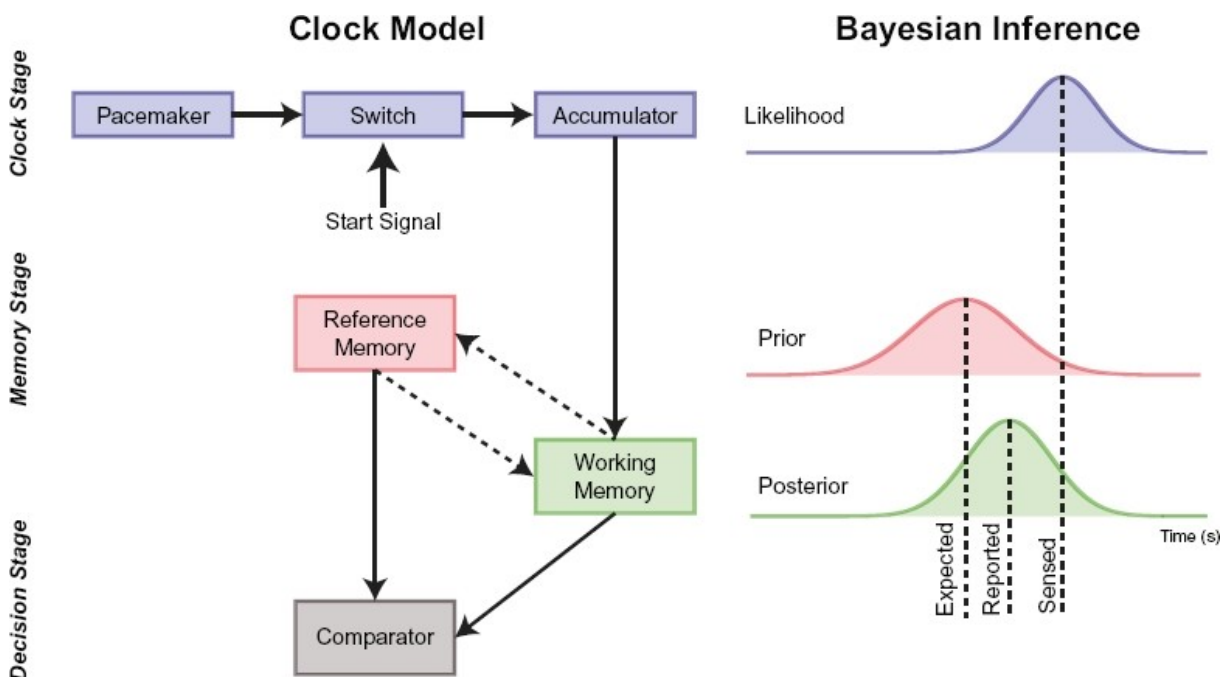


Figure 18. Théorie Bayésienne de l'inférence perceptuelle du temps, en lien avec un modèle d'horloge interne. Extraite de Rhodes, 2018.

La fonction de l'intervalle actuellement perçu est $P^{\text{likelihood}}(C | D)$, où C est la probabilité d'acquérir le nombre de « ticks » de l'horloge compte tenu de la stimulation externe D . Cependant, selon ce même modèle, il est difficile de savoir comment les distributions de probabilité, qui sont continues, sont formées à partir de mesures discrètes (nombre de « ticks »).

Le stade mnésique serait quant à lui relatif à la distribution de ou des intervalles précédemment exposés $P^{\text{prior}}(D)$. Sa distribution serait centrée sur la moyenne objective des intervalles présentés aux sujets, et la largeur de sa distribution, tout comme pour $P^{\text{likelihood}}$, résulterait de la certitude du sujet quant à sa perception. Des incertitudes plus plates résultent en des distributions plus plates. Ainsi, la durée perçue et la durée antérieure sont pondérées par leurs incertitudes relatives (Colas, Diard & Bessière, 2010 ; Fernandes, Stevenson, Vilares & Körding, 2014 ; Griffiths & Tenenbaum, 2011 ; Lucas & Griffiths, 2009 ; Vilares & Körding, 2011).

Enfin et conjointement aux lois Bayésiennes, $P^{\text{likelihood}}$ fusionne avec P^{prior} pour créer la fonction analogue au stage décisionnel $P^{\text{posterior}}$. On a alors :

$$P^{\text{posterior}}(D|C) \propto P^{\text{likelihood}}(C | D) \cdot P^{\text{prior}}(D)_{(\text{likelihood})}.$$

En somme, le modèle prédit que les estimations sensorielles bruitées sont biaisées vers la moyenne de la distribution de probabilité des essais précédemment exposés (P^{prior}) (Acerbi, Vijayakumar, & Wolpert, 2014 ; Acerbi, Wolpert, & Vijayakumar, 2012 ; Körding & Wolpert, 2004 ; Wolpert, 2007). Ce modèle parvient également à modéliser la propriété du temps scalaire (Shi et al., 2013) étant donné que l'écart type du jugement temporel augmente avec la longueur des durées à estimer (pour une analyse, voir Wearden, 2016). Par conséquent, comme on peut le voir sur la Figure 19, la tendance centrale est plus forte pour des durées de stimulus plus longues (Cicchini, Arrighi, Cecchetti, Giusti & Burr, 2012 ; Jazayeri & Shadlen, 2010).

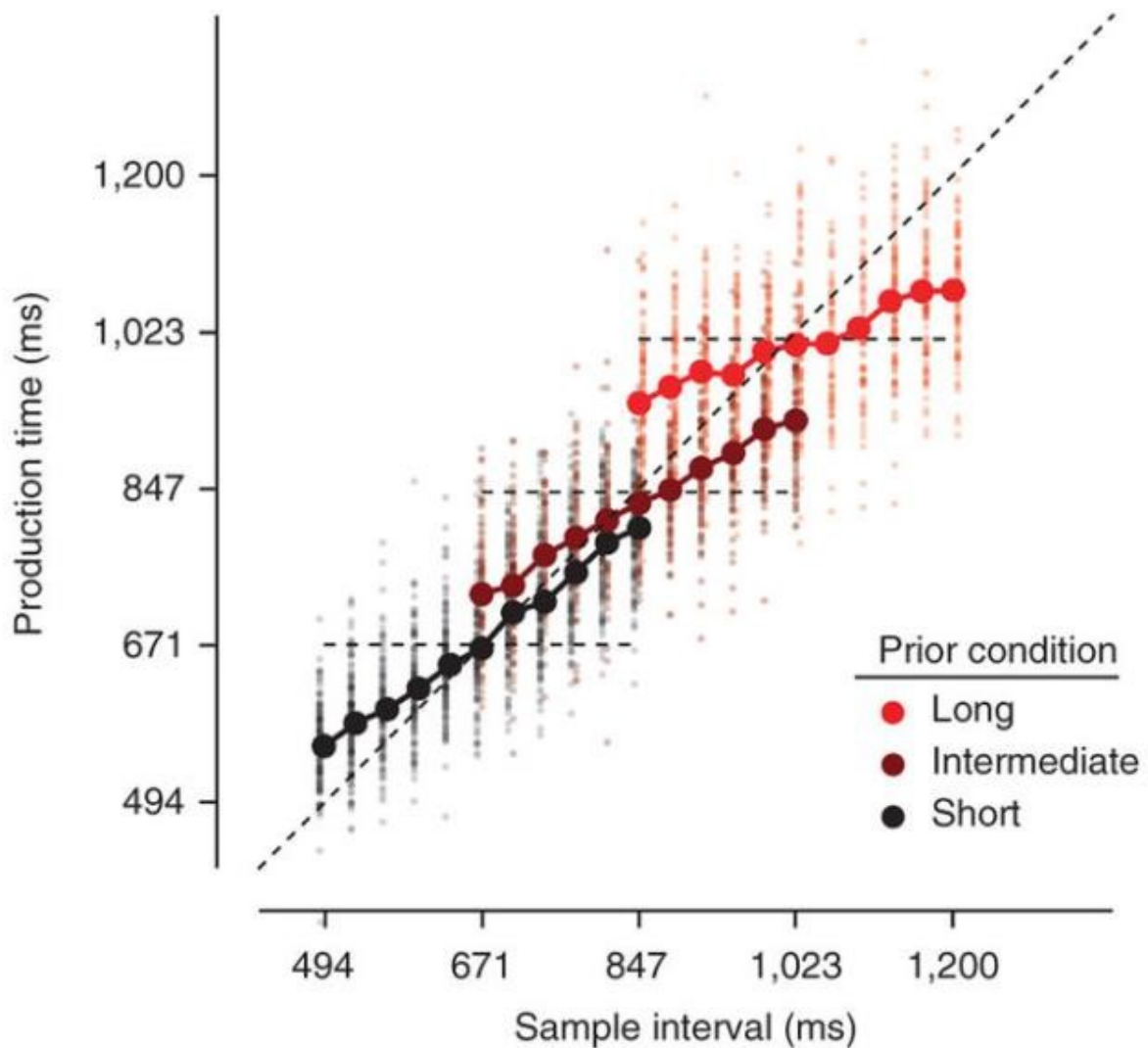


Figure 19. Reproductions du temps dans différents contextes temporels, la condition de distribution longue en rouge, intermédiaire en marron et courte en noir. Extrait de Jazayeri & Shadlen (2010).

Une étude récente utilisant la tâche de reproduction temporelle a été réalisée chez des enfants autistes ainsi que des enfants « sains » âgés de 6 à 14 ans (Karaminis et al., 2016). Les résultats ont reproduit la tendance centrale dans tous les groupes d'âge, avec un effet plus fort chez les participants plus jeunes. Ceci suggère donc que les enfants les plus jeunes ont un système plus bruité. De ce fait, ils ont une plus grande confiance dans les essais précédemment exposés, résultant en des effets de centralisation plus importants. Cet effet est très adaptatif puisqu'il permet aux enfants de compenser leurs erreurs temporelles. Les enfants autistes quant à eux étaient moins sensibles au temps, mais ne reposaient pas leurs estimations sur leurs connaissances antérieures. On voit donc que la mémoire des durées joue un rôle important en

influençant le jugement du temps. Ceci explique pourquoi certains auteurs ont considéré et considéré que la mémoire est une source de variance important dans le jugement des durées.

Certaines études ont plus particulièrement manipulé la mémoire à court terme des durées, et ont montré que celles-ci influencent effectivement le jugement du temps. Des chercheurs ont notamment fait varier l'intervalle de rétention à court terme d'une durée. La plupart des recherches sur ce sujet ont été réalisées chez l'animal par Spetch et ses collègues (Grant & Spetch, 1993 ; Spetch & Wilkie, 1983). Dans ces études, les pigeons apprennent une durée standard courte et longue dans une tâche de bissection. Ensuite, dans une phase test, un intervalle de rétention de 5 à 20 secondes est introduit entre le début du stimulus temporel et le moment de réponse. Le pigeon doit donc retenir en mémoire la durée avant de pouvoir faire son jugement. Les résultats montrent alors « a choose short effect », où la proportion de réponse « court » augmente avec l'intervalle de rétention. La durée en mémoire à court terme semble donc se raccourcir. Ce raccourcissement révélerait une dégradation de la trace en mémoire à court terme de la durée, résultant en une perte d'impulsions stockées en mémoire. Ceci confirme que la mémoire constitue une source de variance importante du jugement des durées (McCormack et al., 1999).

La première étude réalisée chez l'enfant avec ce type de paradigme a été conduite par Droit-Volet, Wearden et Delgado-Yonger (2007). Toutefois, dans leurs études, ces auteurs n'ont pas retrouvé ce « choose short effect », mais une variabilité plus importante du jugement temporel avec l'augmentation de l'intervalle de rétention, et cette variabilité causée par la rétention de la durée en mémoire à court terme est plus marquée chez le jeune enfant. Les capacités limitées des jeunes enfants en mémoire à court terme peuvent donc être à l'origine d'une plus grande variation dans le jugement temporel chez l'enfant (McCormack et al., 1999). Les modélisations mathématiques des données de bissection et de généralisation temporelle chez l'enfant (Droit-Volet & Wearden, 2001) confirment que la mémoire de référence temporelle est effectivement plus variable chez l'enfant.

Cependant, Delgado et Droit-Volet ont montré que cette variabilité en mémoire résulte pour l'essentiel des bruits au niveau de l'encodage de la durée. Plus précisément, Delgado et Droit-Volet (2007) ont testé la mémoire de référence des durées standard en bissection en introduisant une variance dans les échantillons de durées standard présentées dans la phase d'apprentissage des durées standard. Elles ont alors montré que la valeur du paramètre (c) de mémoire, utilisée dans le modèle de bissection dépend directement du bruit initial introduit lors de l'encodage des échantillons temporels. Aussi, bien que les problèmes de

rétenion des durées en mémoire puissent concourir aux différences entre les jugements temporels des enfants d'âges différents, les chercheurs évoquent davantage la difficulté qu'éprouvent les jeunes enfants à concentrer leur attention sur le flux continu du temps. Les capacités d'attention limitées des enfants seraient donc l'une des principales causes de la variabilité de jugement du temps chez le jeune enfant.

II – 2. L'Attention

Récemment, Zélanti et Droit-Volet (2011) ont utilisé une série de tests neuropsychologiques afin d'évaluer les capacités cognitives des enfants et d'examiner leur rôle dans le développement des estimations temporelles. Il s'avère que la sensibilité temporelle (WR) en tâche de bissection corrèle significativement avec l'index d'attention / concentration du Children's memory Scale (CMS) (Cohen, 1997). Plus les enfants ont un indice de concentration élevé, plus la sensibilité temporelle est élevée. Ceci expliquerait pourquoi les enfants ayant des troubles du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDA – TDAH) réussissent aussi mal dans les tâches d'estimation du temps (Gooch, Snowling & Hulme, 2011 ; Meaux & Chelonis, 2003 ; Smith, Taylor, Warner Rogers, Newman & Rubia, 2002 ; Toplak, Dockstader & Tannock, 2006). Les modèles de perception du temps, que nous avons présentés chapitre III, demeurent très imprécis quant au rôle de l'interférence attentionnelle dans leurs systèmes de traitement du temps. Dans l'objectif de pouvoir mieux décrire les effets de l'attention sur le jugement, il est avant tout nécessaire de définir ce que recouvre la notion d'attention. Les deux prochains chapitres visent à définir l'attention et exposer en quoi cette dimension qui varie avec l'âge de l'enfant est une dimension essentielle pour l'estimation que l'on se fait du temps.

CHAPITRE IV : ATTENTION ET DEVELOPPEMENT

I – Les processus attentionnels

Les processus attentionnels sont à la base du contrôle et de la régulation des activités relatives à la perception, à la motricité ou encore à la conceptualisation (Camus, 1996). Cette capacité n'est toutefois pas envisagée comme l'action d'un seul mécanisme, mais plutôt comme la coaction de différents mécanismes dépendants (Posner & Rafal, 1987). Ainsi, les chercheurs

ont proposé un modèle à composante de l'attention, fondé sur un ensemble de 3 dimensions : une dimension d'intensité, une dimension de sélectivité et une dimension de contrôle attentionnel (Cohen, 1993 ; Norman & Shallice, 1986 ; Posner & Rafal, 1987 ; van Zomeren & Brouwer, 1994). Notre aptitude à porter attention à des informations serait ainsi le fruit du niveau d'éveil, de la capacité à sélectionner les informations parmi des éléments du milieu, et de la quantité de ressources mentales allouées à ces informations. La Figure 20 illustre ces différents mécanismes, ainsi que leurs liens.

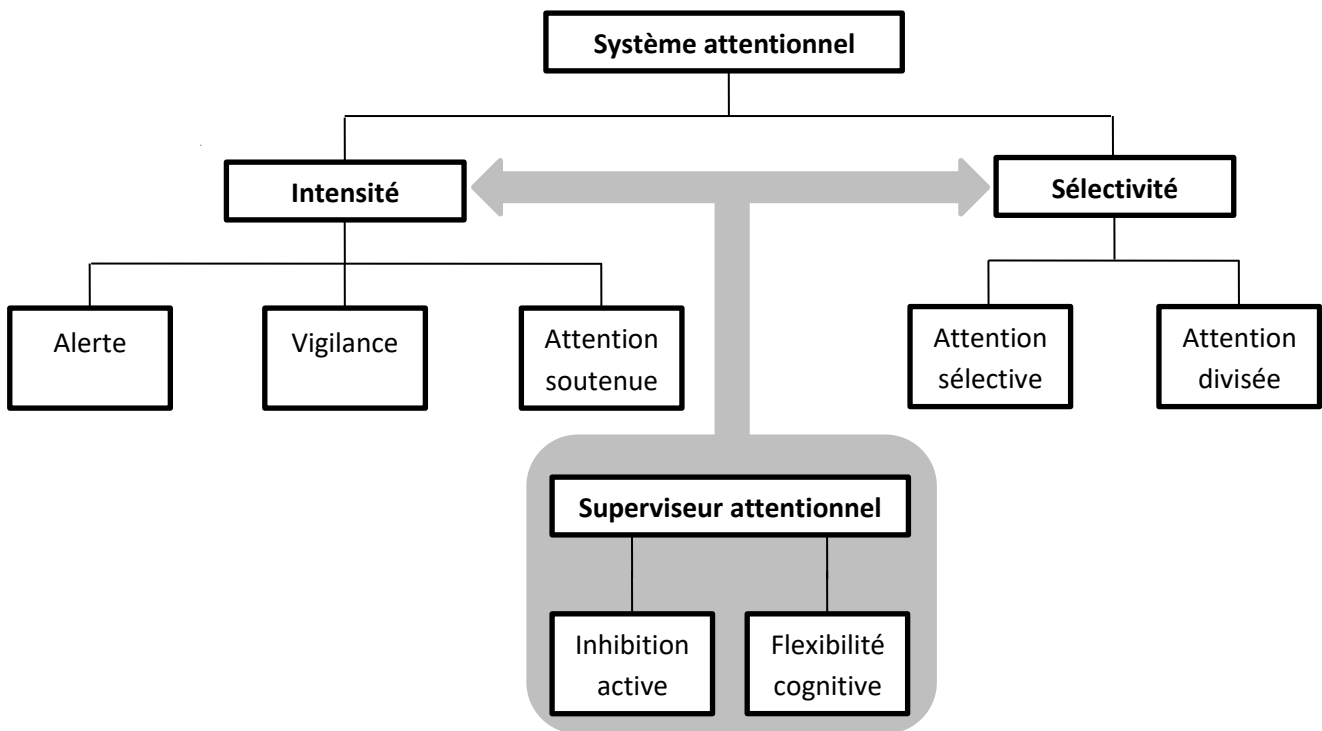


Figure 20. Les composantes de l'attention, selon Cohen, 1993 ; Norman & Shallice, 1986 ; Posner & Rafal, 1987 ; van Zomeren & Brouwer, 1994.

I – 1. Fonction d'intensité.

I – 1.1. Définition

La dimension d'intensité dépend de l'état d'alerte de l'individu (arousal) et constitue l'aspect quantitatif de l'information. Lorsqu'un individu est en état d'alerte, il s'est préalablement préparé cognitivement à réaliser une tâche spécifique. Son niveau de concentration se voit ainsi accru, ce qui facilite l'efficacité du système et, du même coup, la quantité d'informations qui peut être traitée. Ceci explique pourquoi la présentation d'un signal

avertisseur avant la présentation d'un stimulus augmente l'état d'alerte d'un individu, ainsi que son temps de réaction (Posner & Peterson, 1990).

La littérature sur l'attention distingue 3 grands niveaux d'intensité correspondant chacun à un état de préparation :

1. L'alerte, qui correspond à une préparation en vue d'une réactivité attentionnelle sur un laps de temps très bref.
2. La vigilance, qui correspond à une préparation en vue de la détection d'un évènement occasionnel sur un laps de temps long.
3. L'attention soutenue, qui correspond à une préparation en vue d'une détection d'évènements multiples sur un laps de temps long.

I – 1.2. Fonction d'intensité et jugement du temps

Les fonctions d'intensité ont donc des répercussions en terme d'attention, ce qui influe nécessairement sur le traitement de l'information temporelle. En effet, un haut niveau d'éveil permet un meilleur traitement du temps. C'est ce qu'ont montré les chercheurs en avertissant les sujets de l'apparition d'un stimulus. Les avertir de l'apparition du stimulus augmente effectivement leurs performances temporelles (Coull & Nobre, 1998 ; Nobre, 2001). Etre en capacité de prédire les évènements permet en fait de mieux se préparer à son traitement (Clark, 2013). Cette préparation mentale a un intérêt double : permettre une meilleure performance et permettre l'économie des ressources. En effet, après l'apprentissage de l'intervalle constant entre deux stimuli (intervalle inter-stimulus, ISI) l'individu déploie son attention à l'approche de la fin de l'ISI. Quand, le sujet est habitué à voir un stimulus après un délai fixe de 3 secondes, il se prépare donc cognitivement à traiter ce stimulus au bout de 3 secondes. Toutefois, ce déploiement attentionnel croissant tout au long de l'attente a pour inconvénient d'appauvrir le montant d'attention pouvant être disponible avant la fin de l'ISI.

Cette préparation attentionnelle, plus connue sous le nom d'attente ou d'anticipation, a plusieurs effets sur le jugement temporel (Henry & Herrmann, 2014 ; Lakatos et al., 2008 ; Rohenkohl & Nobre, 2011). Nous avons entrevu que le déploiement de l'attention est fonction de la probabilité d'apparition du stimulus. Aussi, si l'on présente un stimulus avant la fin de l'ISI habituel, le sujet n'a pas une quantité d'attention suffisamment importante pour fermer rapidement l'interrupteur attentionnel. Ceci l'empêche de coder correctement la durée au début de la présentation du stimulus temporel, ou du moins, son traitement est différé. Il y a alors une

perte d'impulsions au début de la présentation du stimulus temporel provoquant un raccourcissement du temps perçu. A l'inverse, si le stimulus temporel apparaît après le délai, celui-ci est jugé plus long qu'il ne l'est réellement, car l'interrupteur s'est fermé précocement et, ceci avant même le début de la présentation du stimulus. Dans cette perspective théorique, Droit-Volet (2003) a testé chez l'enfant l'effet d'un signal avertisseur sur le jugement du temps chez des enfants âgés de 3, 5 et 8 ans en tâche de bissection. Les résultats de cette étude montrent qu'un avertissement provoque un allongement subjectif du temps, les sujets répondant plus souvent « long ». De plus, cet allongement subjectif du temps est similaire quel que soit l'âge des enfants. Cependant, les résultats montrent que le signal avertissant de l'arrivée d'un stimulus temporel à traiter réduit la variabilité du jugement temporel (WR). Bien que la sensibilité augmente avec l'âge, la présence d'un signal avertisseur améliore davantage la sensibilité des enfants les plus jeunes. Ceci révèle qu'il y a une plus grande variabilité dans le temps de latence de fermeture du switch chez les plus jeunes. Cette plus grande variation dans la latence de fermeture du switch serait liée à des fonctions d'intensité limitée chez l'enfant, ce qui peut donc concourir aux moins bonnes estimations temporelles chez les jeunes enfants.

Concernant les autres dimensions de la fonction d'intensité (vigilance, attention soutenue), à notre connaissance, ces dimensions n'ont pas été étudiées chez l'enfant dans le cadre du jugement des durées. On ne trouve que des études sur l'estimation de durées de longueurs différentes. Or, il est maintenant admis que le traitement de longues durées demande une attention plus soutenue que le traitement de durées courtes. A ce propos, les études en reproduction temporelle ont montré que les jeunes enfants sous-estiment davantage les durées longues que les adultes. Zélandi et Droit-Volet (2011) ont aussi testé les enfants âgés de 5 et 8 ans en tâche de bissection temporelle avec différentes gammes de durées (0.5 vs 1 seconde ; 1.25 vs 2.5 secondes ; 4 vs 8 secondes ; 15 vs 30 secondes). Il apparaît que la sensibilité au temps chez les jeunes enfants est meilleure avec les durées courtes que les durées longues. L'amélioration avec l'âge de la sensibilité au temps est donc plus rapide dans le cas des durées courtes que dans celui des durées longues. De plus, l'analyse des corrélations entre les performances temporelles et les scores aux tests neuropsychologiques révèle que l'amélioration des performances temporelles avec l'âge est significativement liée au développement des capacités de mémoire de travail, dans le cas des durées courtes, et au développement des capacités attentionnelles dans le cas des durées longues. Le développement des capacités d'attention soutenue affecte donc aussi le jugement des durées, du moins pour des durées

longues, supérieures à 1-2 secondes. C'est d'ailleurs pour cette raison que nous avons choisi d'axer nos travaux sur des durées longues, du moins supérieures à 2 secondes.

I – 2. Fonction de sélection et impact du contexte

I – 2.1. Définition

La capacité que nous avons de percevoir les caractéristiques d'une situation dépend de processus de sélection et d'intégration des éléments du milieu. Cette aptitude est extrêmement adaptative puisque nous sommes continuellement bombardés d'une quantité colossale d'informations. Cette quantité est trop importante pour que nous puissions en traiter la totalité. Comme nous venons de le voir, notre état d'éveil nous permet de traiter plus ou moins d'informations. Cependant, il reste important de sélectionner l'information pertinente parmi l'immensité d'informations inutiles. Toutes les informations auxquelles nous n'allouons pas d'attention demeurent des « subceptions », dans le sens où il s'agit d'informations sensorielles qui ne franchissent pas le seuil de la conscience, de la perception. Cependant, ces subceptions peuvent à tout moment devenir une perception si l'on porte notre attention sur ces informations. Par exemple, la température au moment où vous lisez cette phrase constitue une subception dans la mesure que vous ne perceviez pas cette information avant que j'en parle. Mais elle a été portée à votre attention et maintenant, vous l'estimez. Bien entendu, ce que je viens de dire vaut si la température n'était pas trop élevée ou trop basse au moment où vous avez lu ces quelques lignes. Dans ce cas précis, la température ne s'est pas imposée à votre perception. Le système attentionnel étant, comme mentionné, adaptatif, notre attention est davantage focalisée sur les informations de l'environnement essentielles à notre survie. Pour cette raison, Berkeley propose en 1709 que l'attention est le filtre transformant la subception en perception. En ce sens, nous ne sommes pas de simples réceptacles de l'information, mais nos propres acteurs de la perception que nous nous faisons du monde.

Cette fonction de sélection fait appel à « l'attention sélective ». Assurément, l'attention sélective ne résulte pas uniquement en la sélection d'information(s) pertinente(s). C'est aussi le pouvoir de focaliser son attention dans le temps sur ce qui nous importe et d'inhiber les informations non pertinentes, pouvant potentiellement perturber la qualité du traitement. Nous venons donc de surligner les trois mécanismes constituant l'attention sélective : la sélectivité, la focalisation et l'inhibition active. Les deux dernières aptitudes (focalisation et inhibition) résultent également de l'activité du superviseur attentionnel. Historiquement, l'attention sélective a en premier lieu été étudiée par Cherry en 1953 via l'effet dénommé « cocktail

party ». L'effet cocktail party résulte de notre faculté à focaliser notre attention sur ce qui est dit par une seule personne au sein d'un capharnaüm phonique de multiples conversations. Dans ce contexte, nous devons donc diriger notre attention sur ce que dit l'interlocuteur (sélection), pendant toute la durée de la conversation (focalisation) tout en inhibant les conversations alentours et focalisant cette même attention jusqu'à la fin de la discussion (inhibition).

Cependant, imaginez maintenant que, dans cette même situation de « cocktail party », votre enfant arrive et vous tire la manche à diverses reprises en répétant « Ecoute, Ecoute, Ecoute... ». Toute votre attention sera attirée par son comportement. Vous serez alors dans l'obligation, soit de lui demander d'attendre, soit de stopper votre conversation, et cela car nous ne sommes pas dotés d'un système attentionnel nous permettant de traiter simultanément de multiples conversations. Face à cette limite de la sélectivité, Kahneman (1973) instaure la notion de partage des ressources attentionnelles. Selon cet auteur, dès lors que nous devons accomplir deux ou plusieurs tâches de façon simultanée, nous partageons nos ressources de façon à pouvoir effectuer plusieurs choses, comme à la fois poursuivre la discussion et terminer son verre. Ces deux tâches peuvent être effectuées correctement en parallèle. Cependant cela peut être opéré si la somme d'attention requise pour leurs réalisations ne dépasse pas la capacité totale de ressources cognitives disponibles. C'est notamment le cas lorsque l'une des deux tâches, boire un verre dans notre exemple, est traitée automatiquement ou que sa demande attentionnelle reste faible (Shiffrin & Schneider, 1977). Dans le cas où le montant de ressources requises pour chacune des tâches dépasse la quantité totale de ressources disponibles, la performance va diminuer sur l'une des deux des tâches. Dans le cas où les performances sont altérées sur les deux tâches, on parle d'interférence bidirectionnelle. Cette interférence bidirectionnelle révèle que les deux tâches puisent dans les mêmes réservoirs de ressources. Selon les chercheurs, réaliser deux tâches simultanément puiserait donc dans un même réservoir, un même bassin de ressources attentionnelles, alors que la quantité y étant présente est limitée (Kahneman, 1973). Tout dépend néanmoins de la nature des tâches. En effet, selon Navon et Gopher (1979), les tâches interfèrent mutuellement si et seulement si elles reposent sur des corrélats neurologiques communs, la co-action de deux tâches de nature différente n'altérant pas les performances (Navon & Gopher, 1979). L'attention divisée fait alors référence à la faculté de traiter de façon simultanée deux ou plusieurs informations à la fois, autrement dit, à partager nos ressources entre le traitement de ces informations.

Afin de rendre compte de la quantité de ressources administrées et nécessaires pour la réalisation d'une tâche, les chercheurs ont mis au point le paradigme de double tâche. Suivant ce paradigme, le sujet doit réaliser une tâche principale, et réaliser en même temps une tâche secondaire. Depuis Navon et Gopher (1979), cette méthode est couramment employée pour étudier l'impact de la limitation des ressources sur les performances. Le résultat typique est une dégradation des performances en double tâche comparativement à une tâche simple, qui se traduit par une augmentation du taux d'erreur, un allongement du temps de réaction ou encore une dégradation de la capacité d'accès en mémoire (Hazeltine, Teague & Ivry, 2002 ; Pashler, 1984 ; Jacoby, 1991; Schumacher et al. 2001; Tombu & Jolicoeur, 2002). En 1980, Wickens introduit toutefois l'idée qu'il pourrait y avoir plusieurs réservoirs de ressources, rejoignant ainsi le postulat de Navon et Gopher (1979). Deux tâches effectuées en parallèle interfèrent donc si et seulement si elles utilisent des mécanismes fonctionnels ou structurels similaires, autrement dit, si elles partagent un même réseau (Navon & Miller, 1987).

Ici encore partager l'attention nécessite l'action du superviseur attentionnel, permettant de répondre à la demande attentionnelle des deux tâches et d'agir en conséquence (fonction de surveillance). En d'autres termes, le monitoring est une fonction d'adaptation en continu où le sujet choisit la tâche à traiter en priorité et la quantité de ressources à y allouer (Posner & Snyder, 1975 ; Schiffrrin & Schneider, 1977). Comme nous le verrons plus tard (chapitre V), des chercheurs travaillant sur le temps ont repris ces notions d'attention et l'ont intégrée aux modèles d'horloge interne. De plus, ils ont testé expérimentalement les prédictions de ces nouveaux modèles attentionnels de temps. Mais nous reviendrons en détails sur cette question. Cependant, regardons maintenant de façon rapide les travaux sur l'émotion et le temps, qui mettent bien en évidence l'impact des différentes formes d'attention, sa fonction d'intensité et de sélection sur le jugement temporel.

I - 2.2. Répercussion des émotions

Il est facile de percevoir les effets de sélectivité lorsque l'on demande à des participants d'estimer le temps en présence d'expressions faciales. Des études ont montré un allongement subjectif du temps lorsque les participants doivent juger des durées en présence d'expressions faciales de colère (Droit-Volet, Brunot & Niedenthal, 2004 ; Droit-Volet & Meck, 2007 ; Gil, Niedenthal & Droit-Volet, 2007). Ce résultat est expliqué par des hypothèses attentionnelles, par le niveau d'alerte physique qui augmente sous l'effet de la peur et par la sélection d'information par la priorisation des stimuli aversifs et menaçants (Bishop, 2007 ; Droit-Volet,

Fayolle, Lamotte & Gil, 2013 ; Droit-Volet & Meck, 2007). Cependant, il est difficile de dissocier ces deux aspects de l'émotion (Droit-Volet et al., 2013 ; Droit-Volet, in press). Au niveau du jugement temporel, les effets liés à la sélectivité de l'attention peuvent être masqués par ceux liés au niveau d'éveil. Quoiqu'il en soit, il a été montré que sous l'effet d'émotions fortement activatrices, le système d'horloge interne s'accélère et module le nombre d'unités temporelles associées à la durée. Dans des situations menaçantes, Fayolle, Gil et Droit-Volet (2015) ont observé un effet multiplicateur entre la durée et les émotions, qui est caractéristique d'une accélération de l'horloge interne. En effet, quand l'horloge interne s'accélère avec la fluctuation de l'éveil, plus d'unités sont accumulées pour des durées longues que pour des durées courtes. En revanche, un simple effet d'interrupteur, avec fermeture plus rapide de ce dernier, produit un effet additif et non multiplicatif entre la durée et les émotions. La part d'unité temporelle ajoutée par la fermeture plus rapide de l'interrupteur est en effet constante pour des valeurs de durées différentes. Or, Fayolle et ses collaborateurs ne retrouvent pas cet effet additif. Cependant, comme nous l'avons dit, il peut être masqué par l'effet d'horloge interne. Comme nous le verrons, ces deux dimensions de l'attention peuvent aussi expliquer les changements avec l'âge des capacités de jugement temporel.

I – 3. Le contrôle attentionnel

I – 3.1. Définition

Les deux systèmes précédemment exposés (système d'éveil, système de sélection) sont soumis au contrôle exercé par le superviseur attentionnel, chargé de la gestion des ressources attentionnelles (Norman & Shallice, 1986). Ce système serait particulièrement actif pour la planification, la prise de décision, lors notamment de nouvelles actions ou lorsque le taux de ressources nécessaires dépasse les capacités du sujet (Norman & Shallice, 1986). Comme déjà évoqué, le superviseur attentionnel permettrait l'inhibition active, c'est-à-dire l'inhibition de l'information distractive, ainsi que la flexibilité cognitive. La flexibilité cognitive résulte de l'aptitude à changer la focalisation de son attention sur l'une ou l'autre des informations. Prenons le simple exemple où il est demandé à un enfant de cocher des étoiles en jaune sur une première feuille, puis de cocher les carrés verts sur une seconde feuille. Les enfants qui continueront à cocher les étoiles, ou les carrés jaunes sur la seconde feuille ne feront pas preuve de bonne capacité de flexibilité cognitive. Au demeurant, la flexibilité cognitive permet d'assurer une certaine malléabilité mentale garantissant la réalisation efficace d'une tâche au fur et à mesure des changements d'objectifs.

Une fois le plan d'action lancé par le superviseur attentionnel, grâce à son sous-système de flexibilité mentale, il existe deux chemins de contrôle pour mener à bien une tâche : un contrôle proactif et rétroactif. Dans le contrôle proactif, le montant d'attention nécessaire est établi au préalable et l'action fonctionne en boucle ouverte, sans signal de retour. C'est notamment le cas dans une tâche d'attention sélective où seulement une information est pertinente. A l'inverse, dans des situations plus complexes où il faut traiter plusieurs informations simultanément, on aura un mode de contrôle rétroactif en boucle fermée. Dans ce cas, on peut continuellement ajuster le niveau d'attention. Selon Baddeley (1986), ce mécanisme de superviseur attentionnel semble en lien étroit avec la mémoire de travail. En effet, la mémoire de travail correspond à un espace de travail optionnel qui permettrait la mise à jour de ce qui reste à faire en fonction de ce qui vient d'être fait (Morris & Jones, 1990) et qui permettrait au système exécutif d'appliquer un plan d'action. Aussi, afin d'être exhaustif, nous allons rapidement présenter le modèle de Baddeley et Hitch évoquant l'impact des capacités attentionnelles sur le système de mémoire de travail.

1 – 3.2. Le modèle de Baddeley et Hitch (1974)

Baddeley et Hitch (1974) ont proposé un modèle de mémoire de travail constitué de plusieurs composantes : un système exécutif central et des systèmes esclaves auxiliaires (Figure 21).

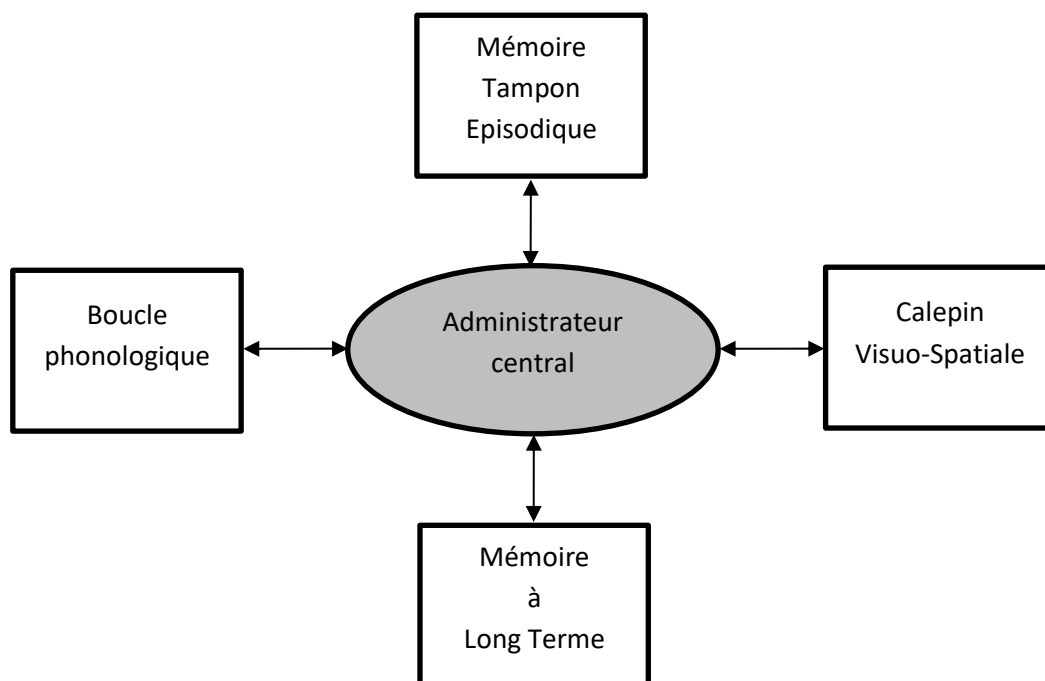


Figure 21. Modèle de mémoire de travail (selon Baddeley & Hich 1974 ; Baddeley, 2000).

Au centre de la figure 21, on retrouve le système exécutif central. Celui-ci est chargé de superviser et de coordonner les sous-systèmes esclaves en y allouant l'attention nécessaire. Cela implique donc des planifications et des stratégies attentionnelles diverses selon la tâche cognitive à réaliser (Baddeley, 1990). Ce serait cette composante qui permettrait également l'incrémentement des informations en mémoire à long terme. Ce système pourrait donc reprendre la même base – voire être une même composante – que le superviseur attentionnel.

Les sous-systèmes, quant à eux, auraient pour fonction de maintenir et de rafraîchir l'information lors du traitement. La boucle phonologique par exemple (appelée aussi boucle articulatoire) serait responsable du maintien de l'information verbalisable. Elle serait constituée d'une unité de stockage phonologique et d'un système d'autorépétition mentale. Le calepin visuo-spatial serait quant à lui impliqué dans le maintien des informations visuo-spatiales grâce aussi à un processus de stockage et un processus de rafraîchissement.

Il faut néanmoins noter qu'en 2000, Baddeley a ajouté une composante mémoire-tampon épisodique « episodic buffer ». Ce sous-système possède les mêmes compétences que la mémoire de travail, à savoir qu'il peut maintenir l'information, la recoder, voire la combiner à d'autres informations. Ce sous-système a une durée de stockage supérieure à la mémoire de travail puisque l'information peut y être maintenue pendant toute la durée de l'activité cognitive avant d'y être écrasée. Comme nous le verrons, il est difficile de dissocier les processus de mémoire de travail des fonctions de l'attention. Aussi, bien que nous ayons choisi de centrer nos recherches sur les différentes capacités de l'attention, nous avons évalué de façon systématique les capacités de mémoire à court terme et de mémoire de travail chez les enfants afin de voir comment elles contribuent à expliquer les différences interindividuelles dans les capacités de jugement temporel en comparaison aux capacités attentionnelles. Cependant, avant de parler plus en détails de cette question au centre de ma thèse, nous allons résumer les travaux en psychologie cognitive sur le développement des performances attentionnelles.

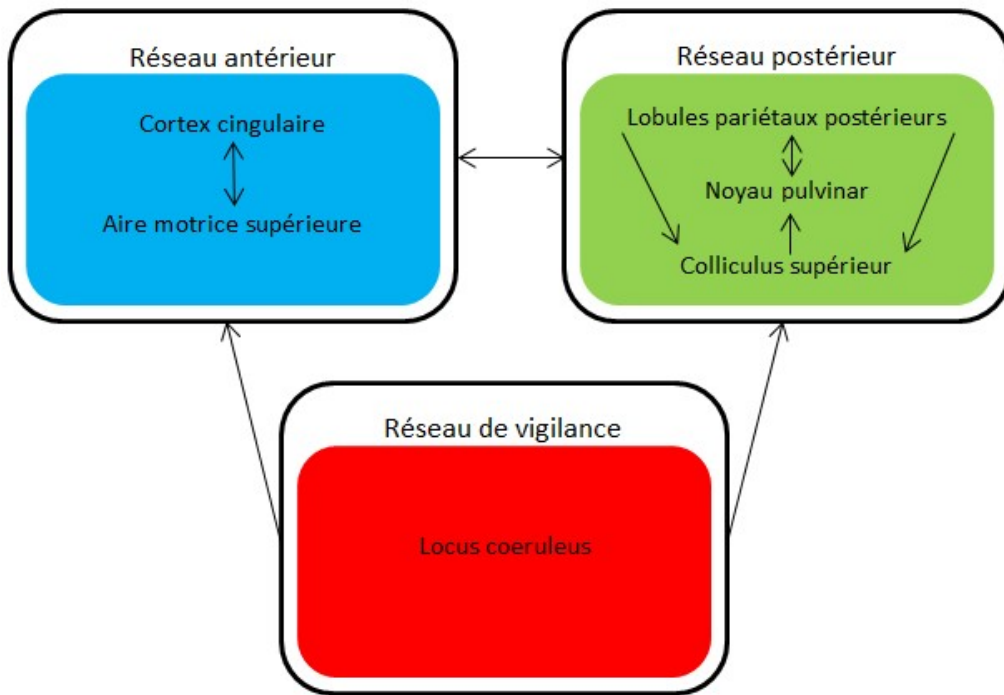
II – Perspective développementale des processus attentionnels

II – 1. Substrat neurologique de l'attention

Avec l'essor de la neuro-imagerie, la science parvient aujourd'hui à déceler la plupart des substrats et corrélats neurobiologiques impliqués dans les processus mentaux de haut niveau, tels que la mémoire, le langage, ou dans notre cas, l'attention. C'est notamment grâce à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle cérébrale (IRMf) et à la tomographie par

émissions de positrons (TEP) que les chercheurs sont parvenus à déceler 3 réseaux qui seraient actifs quand une action nécessite de l'attention. En 1991, Posner et Rothbart déclarait déjà l'existence de ces 3 réseaux : le réseau antérieur, le réseau postérieur et le réseau de vigilance (Figure 22). Ces réseaux seraient anatomiquement et fonctionnellement distincts, même si, comme nous le verrons, certains échanges inter-réseaux peuvent avoir lieu.

(A)



(B)

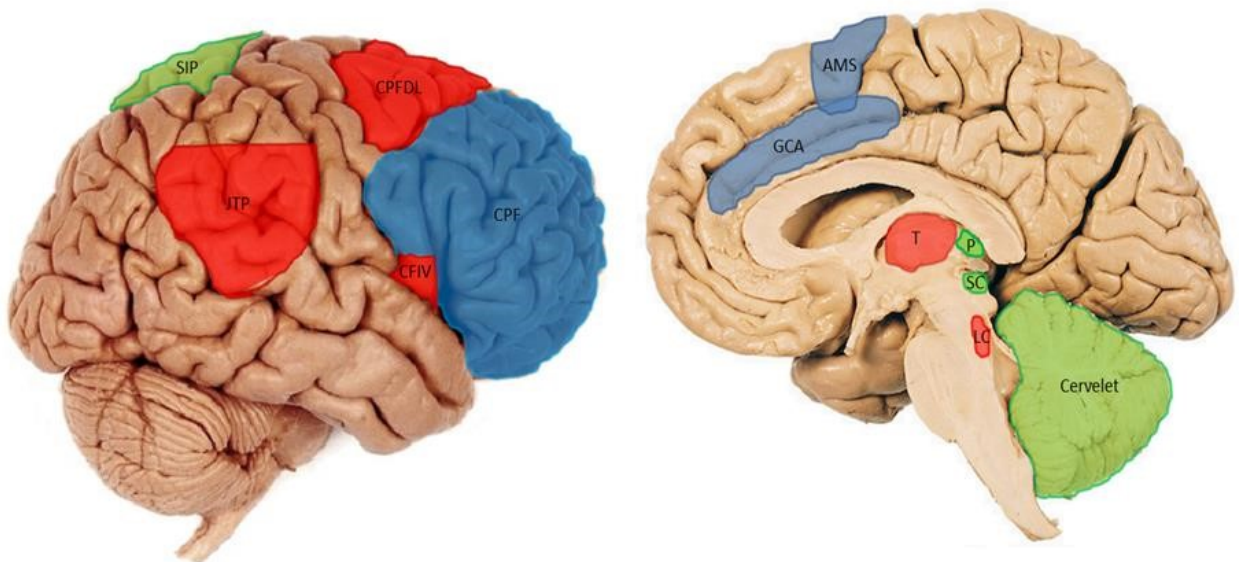


Figure 22. (A) Représentation schématique du modèle d'attention du réseau de neurones initialement décrit par Posner et ses collaborateurs (Posner, 1995, Posner & Rothbart, 1991). (B) Représentation schématique des régions corticales et sous-corticales impliquées dans l'attention. Le réseau antérieur (en bleu) comprend le Cortex Préfrontal (CPF), l'Aire Motrice Supplémentaire (AMS) et le Gyrus Cingulaire Antérieur (GCA). Le réseau postérieur (en rouge) comprend le Sillon Intrapariétal (SIP), les colliculi supérieurs (CS), le noyau pulvinar (P) et le

cervelet. Enfin, le réseau de vigilance (en rouge) comprend la jonction temporo-pariétale (JTP), le cortex préfrontal dorsolatéral (CPFDL) et le cortex frontal insulaire ventral (CFIV)

L'un de ces réseaux, le réseau antérieur, permettrait la préparation et le maintien de l'attention (Coull & Nobre, 1989), la détection de cibles (Corbetta, Miezin, Shulman & Petersen, 1993), la résolution de conflit et l'inhibition lors de conflits entre deux tâches (Corbetta et Shulman, 2002 ; Tzourio, El Massioui, Crivello, Joliot, Renault & Mazoyer, 1997). Ce réseau impliquerait les régions préfrontales de l'encéphale. Plusieurs études ont d'ailleurs montré que les performances aux tâches nécessitant un contrôle de supervision sont gravement affectées par les lésions des lobes préfrontaux (Duncan, Burgess & Emslie, 1995 ; Shallice, 1988 ; Shallice & Burgess, 1991a, 1991b). De même, les enfants présentant un déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDA / TDAH) montrent une diminution du débit sanguin dans le lobe préfrontal (Lou Henriksen & Bruhn, 1984 ; Hart, Radua, Mataix-Cols & Rubia, 2012). Plus spécifiquement, ce réseau impliquerait les régions préfrontales cingulaires antérieures (CCA) et l'aire motrice supérieure (AMS). Le cortex cingulaire antérieur (CCA) est particulièrement actif dans les paradigmes d'interférence, comme celui de Stroop dans lequel des sujets doivent nommer la couleur de l'encre d'un mot désignant elle-même une couleur (Mayer, Wilcox, Teshiba, Ling & Yang, 2013 ; Pardo, Pardo, Janer & Raichle, 1990 ; Posner & Peterson, 1990). Dans ce paradigme, il existe des situations dites « congruentes » dans lesquelles le mot concorde avec la couleur de l'encre (par exemple, **bleu**). Si ce n'est pas le cas, c'est-à-dire, si le mot n'est plus apparié à la bonne couleur d'encre, alors la situation est dite « incongruente » (par exemple, **bleu**). Le résultat typique obtenu avec ce paradigme est une réponse plus élevée pour les conditions « incongruentes » que congruentes. Ce laps de temps supplémentaire est attribué à la présence d'un conflit entre la couleur de l'encre et la lecture automatique du nom de couleur écrit. Pardo et ses collègues (1990) ont donc montré que l'activité du CCA est davantage impliquée dans la situation d'incongruence qu'elle ne l'est dans la situation de congruence. Les mêmes effets ont été observés lors d'une étude en TEP portant sur des stimuli auditifs (Tzourio, Massioui, Crivello, Joliot, Renault & Mazoyer, 1997). Plus intéressant encore, contrairement à Pardo et al., (1990) Bench et ses collègues (1993) ont utilisé et comparé trois conditions. En premier lieu, le sujet devait nommer la couleur de l'encre de croix colorées. Ensuite, il devait simplement nommer la couleur d'encre de mots neutres (exemple : « **front** », « **back** », « **top** », « **down** »). Enfin, il devait nommer la couleur de l'encre des noms de mot de couleur incongruante (exemple : « **bleu** », « **rouge** », « **jaune** », « **vert** »).

Comparativement à l'expérience de Pardo et ses collaborateurs, en situation de mots neutres, il n'y a *aucune activation* du cingulaire antérieur, alors que cette zone est belle et bien active en situation de mot de couleurs. Mais alors, dans l'expérience de Pardo et ses collaborateurs (1990), pourquoi le CCA se montre également actif (même si dans une moindre mesure) dans la situation congruente ? Les chercheurs expliquent cet effet par le fait que les participants ne savent pas au moment de l'apparition du mot s'ils vont être en situation de congruence ou d'incongruence. De ce fait, le CCA est activé puisque le sujet se tient potentiellement prêt à inhiber sa réponse. Les auteurs concluent alors à l'implication du cortex cingulaire antérieur dans la sélection de la réponse (Posner & Peterson, 1990). La figure 23 ci-dessous présente les résultats de la méta-analyse de 5 études d'Acchina (2006) portant sur l'activation du CCA lors d'un paradigme de Stroop.

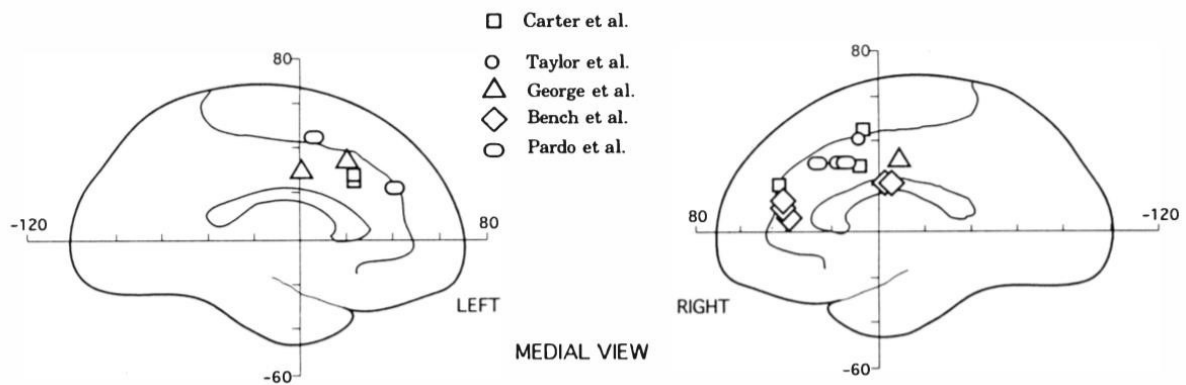


Figure 23. Méta-analyse de 5 études utilisant un paradigme de Stroop exposant une activation cingulaire antérieure. Extrait de Parasuraman (2000).

Le CAA et les aires motrices supérieures (AMS) semblent être actifs de façon simultanée sur une grande variété de contextes impliquant la détection d'événements et la préparation de la réponse appariée (Coull & Nobre, 1998 ; Vallesi, McIntosh, Shallice & Stuss, 2009). En fait, les aires cingulaires antérieures réguleraient le trafic entre la région frontale latérale et les régions visuelles postérieures, et contrôleraient l'accès des cibles pertinentes aux systèmes pré-moteurs. En somme, ce réseau serait la base du contrôle exécutif et de l'attention sélective. De ce fait, c'est également la zone de jonction des informations laissant place aux possibles interférences de traitement.

Un autre réseau serait, quant à lui, situé à l'arrière de l'encéphale, d'où son appellation de réseau postérieur. Ce réseau serait actif lors de processus d'orientation de l'attention et

représenterait donc le rôle de la flexibilité cognitive. Ce réseau comprend un ensemble de structures bilatérales qui sont les lobules pariétaux postérieurs, les colliculi supérieurs, les noyaux pulvinar, les sillons intra-pariétaux et certaines zones du cervelet. Selon Posner et Petersen (1990), le cortex pariétal permettrait le dégage­ment de l'attention de la focalisation attentionnelle d'une cible, le colliculus supérieur déplacerait l'attention vers l'information pertinente et le pulvinar participerait à la focalisation de l'attention sur l'information jugée pertinente (Posner & Petersen, 1990).

Enfin, le dernier réseau, « réseau de vigilance » serait spécifique au maintien de l'état d'alerte. Ce réseau a été mis à jour grâce aux projections noradrénergiques générées par le locus coeruleus et l'activation des lobes temporaux et du cortex préfrontal dorsolatéral. Initialement, ce réseau a été jugé comme impliqué dans les tâches de temps de réaction ou des tâches de vigilance (Posner & Petersen, 1990). Il a effectivement été prouvé que des sujets ayant une lésion au cortex préfrontal dorsolatéral montrent un déficit de la capacité à maintenir un état d'alerte. De même, dans une tâche de Stroop, cette aire CPDL est active pendant la totalité de la réalisation de la tâche, attestant du rôle spécifique de cette aire dans la vigilance.

Comme mentionné, malgré leurs actions distinctes, il existe des relations entre ces réseaux. Si Posner et Rothbart (1991) différencient les fonctions d'orientation du réseau postérieur qui relèvent de traitements inconscients, des fonctions d'orientation associées au réseau antérieur, qui elles, fournissent le contenu permettant la prise de conscience. Ils stipulent néanmoins que c'est le réseau de vigilance qui favorise l'utilisation d'un réseau en particulier. En l'occurrence, lorsqu'une nouvelle information est sur le point d'être présentée, le réseau de vigilance influencerait les réseaux postérieur et antérieur en augmentant l'efficacité de l'orientation du système postérieur, et en supprimant l'activité en cours dans le système antérieur. Ce procédé aurait pour but d'être en état de préparation à la fois alerte et exempt de contenu conscient, un état que Posner et Rothbart (1991) appellent le «dégagement de conscience».

Plus récemment, Jennifer Coull décèle la co-action de ces 3 réseaux lors de l'attente temporelle d'un stimulus (phénomène présenté page 76) et de l'accroissement attentionnel apparié (Coull, 2009) (Figure 24). Selon ce modèle, la probabilité d'apparition du stimulus visuel serait initialement déterminé par l'activité des aires pré-motrices et pariétales (Coull & Nobre, 1998 ; Sakai, Hikosaka, Takino, Miyauchi, Nielsen & Tamada, 2000). Néanmoins, si l'attente temporelle est violée, si le stimulus n'apparaît pas après le délai fixé initialement, le cortex préfrontal s'active, permettant d'estimer le nouveau temps d'attente avant l'émission du

stimulus temporel (Coull, Frith, Büchel & Nobre, 2000 ; Vallesi et al., 2009). Une fois que le stimulus est survenu de façon temporellement anormale, qu'il est produit et mesuré, la probabilité que l'évènement se produise après un temps donné est recalculée et est représentée par la magnitude de l'activité dans le SMA et le STG droit (Cui, Stetson, Montague & Eagleman, 2009). En somme, ce nouveau système, de par l'implication des 3 réseaux attentionnels permet non seulement d'anticiper l'apparition des stimuli temporels, mais aussi de mettre à jour le système lors d'évènements irréguliers.

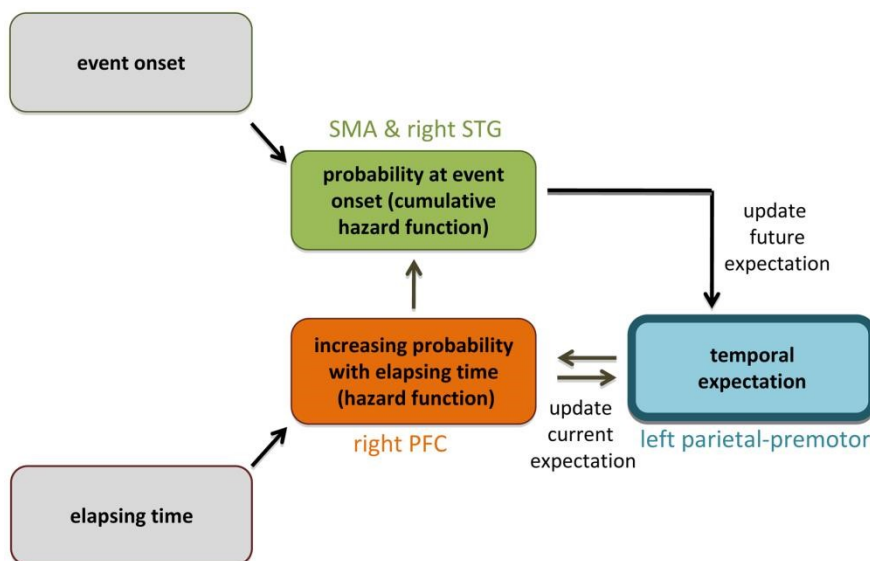


Figure 24. Représentation des substrats neuronaux de l'attente temporelle. Extrait de Coull (2009).

II – 2. Développement du substrat attentionnel

Jusqu'à maintenant, nous avons résumé les processus attentionnels étudiés chez l'adulte. Néanmoins, ces aptitudes ne sont pas innées mais résultent d'une longue maturation. En effet, le développement ontogénétique du cerveau est un processus très long chez l'espèce humaine. Cette longue maturation serait en quelque sorte la récapitulation de l'évolution phylogénétique, les parties du cerveau les plus tardives sur le plan de l'évolution se développant en dernier. Ainsi, les aires les plus internes, les aires sous-corticales, deviennent matures avant les aires corticales, situées vers l'extérieur.

Bronson (1974) a été le premier chercheur à s'intéresser au rôle du développement cortical sur l'attention, notamment sur l'orientation visuelle spatiale. Selon cet auteur, avant l'âge de 2-3 mois, les voies corticales ne sont pas suffisamment matures pour traiter

l'information visuelle. Ces informations circulent donc uniquement dans la voie rétino-colliculaire sous-corticale. Ce n'est que vers l'âge de 2-3 mois que les voies corticales deviennent suffisamment matures pour traiter l'information, rendant ainsi le nourrisson apte à poursuivre une cible visuellement (Aslin, 1981), voire même à réaliser des anticipations visuelles (Haith, Hazan & Goodman, 1988). L'orientation visuo-spatiale constitue ainsi la première aptitude attentionnelle « contrôlée » de l'enfant (Ruff & Rothbart, 2001).

Avant l'âge de 1 mois, les nourrissons ont donc beaucoup de difficultés à dégager leur regard d'un stimulus afin de traiter une nouvelle information (Johnson, Dziurawiec, Ellis & Morton, 1991). La capacité d'inhibition émerge en effet de façon très tardive chez l'enfant. Le cortex préfrontal est considéré comme le siège de l'inhibition cognitive (Dempster & Brainerd, 1995). Or, le cortex préfrontal est la dernière zone du cerveau à maturer (Diamond, 2002 ; Fuster, 2015). Celle-ci subit une forte croissance de la naissance à 2 ans, puis de 4 à 7 ans, pour ne cesser de maturer jusqu'à l'âge adulte. Même si le cortex préfrontal n'est pas totalement mature, la période de 3 à 5 ans marque un véritable tournant dans les capacités d'inhibition. C'est ce que l'on voit dans les résultats des enfants à la tâche jour-nuit (Montgomery & Koeltzow, 2010). Dans cette tâche, l'enfant doit inhiber la réponse correspondant à l'image et dire l'opposé. Il doit par exemple dire « nuit » lorsqu'on lui présente une carte blanche avec un grand soleil et « jour » lorsqu'on lui présente l'image noire avec la lune et des étoiles. Les enfants de 3 à 4 ans trouvent donc la tâche très complexe, mais sa difficulté disparaît lorsque l'enfant atteint l'âge de 6-7 ans.

Pour résumer, au niveau du développement des aires cérébrales, le cortex préfrontal se développe lentement comparé aux autres aires. Cependant, ce ne sont pas là les seules modifications qui vont avoir lieu. On assiste à une multiplication des connexions provoquant une modulation de la substance blanche au détriment de la substance grise (Figure 25).

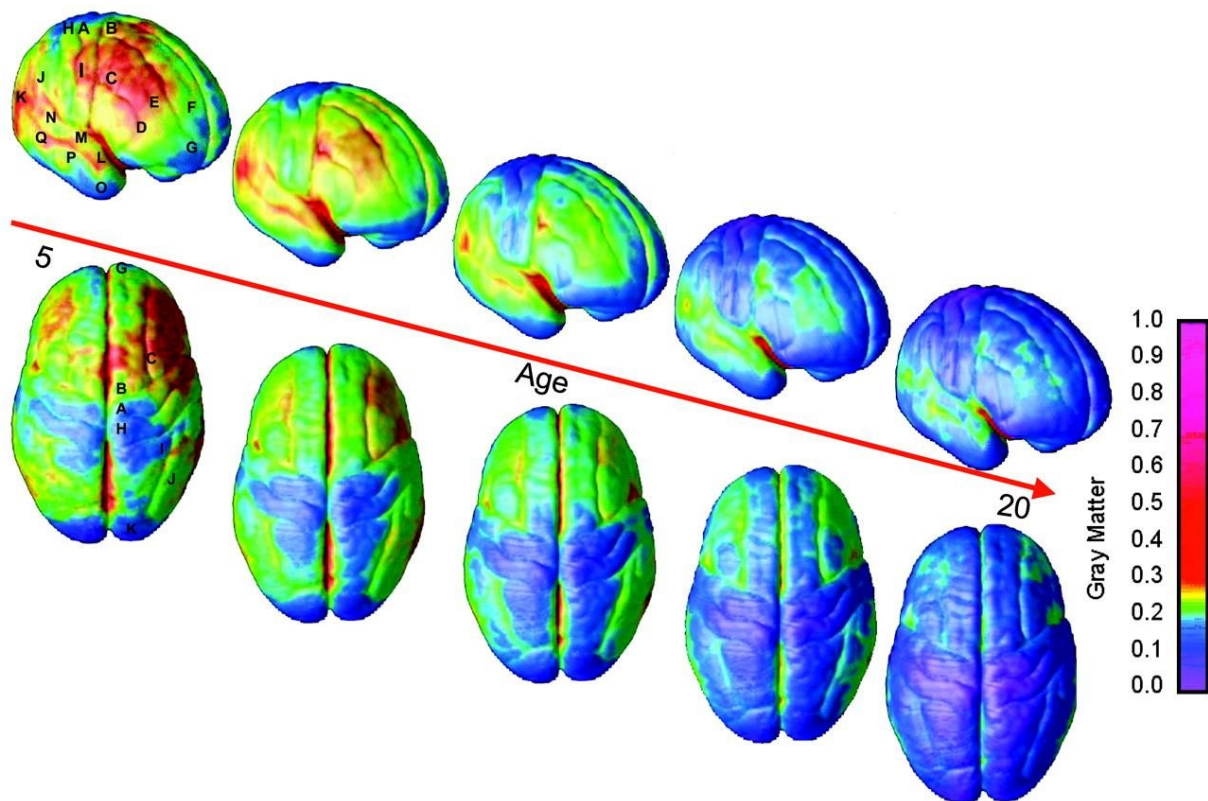


Figure 25. Maturation de la matière grise au cours du développement. Vue latérale droite du cerveau montrant la séquence dynamique des changements temporels du volume de la matière grise sur la surface corticale. Les images représentent des données modélisées issues de 52 examens IRM anatomiques effectués chez 13 personnes âgées de 4 à 21 ans, chacune balayée quatre fois à intervalles d'environ deux ans. L'échelle de couleur représente les unités de volume de matière grise. (Graphique extrait de Lenroot & Giedd, 2006).

Le développement des systèmes cérébraux et des voies d'échange entre le système réticulaire mésencéphalique, le thalamus et le cortex ainsi que le développement des aptitudes d'inhibition permettrait la maturation des capacités d'attention soutenue. Des études montrent que le nourrisson de 3 mois pourrait consacrer de 5 à 10 secondes d'attention à un stimulus. Cette durée d'attention soutenue atteindrait jusqu'à plusieurs minutes au cours des premières années de vie (Ruff & Capozzoli, 2003).

Physiologiquement, on assiste également à la production de gaines de myéline qui vont recouvrir l'axone des neurones et permettre, en plus d'une protection des neurones, une transmission plus efficace, plus rapide, de l'influx nerveux. Le processus de myélinisation est également lent (Figure 26). Il s'effectue des zones internes vers les zones externes du cerveau. Selon les travaux de Giedd (1999), l'augmentation du volume de la substance blanche corticale

serait linéaire au cours de l'enfance et de l'adolescence et non pas exponentielle (Giedd et al., 1999). Le cortex préfrontal terminerait ainsi sa myélinisation à l'âge adulte. Cette description du développement cérébral est en lien avec de récentes revues de la littérature montrant que les comportements volontaires et motivés, bien qu'émergeant à l'âge de 1an (Courage, Reynolds, & Richards, 2006 ; Ruff & Saltarelli, 1993), ne cessent de se développer pendant l'enfance et l'adolescence. Progressivement, ceci leur permettrait entre autres d'évaluer leur propres comportements, de générer des actions en lien avec leur motivation et leurs objectifs (Best & Miller, 2010 ; Garon, Bryson & Smith, 2008)

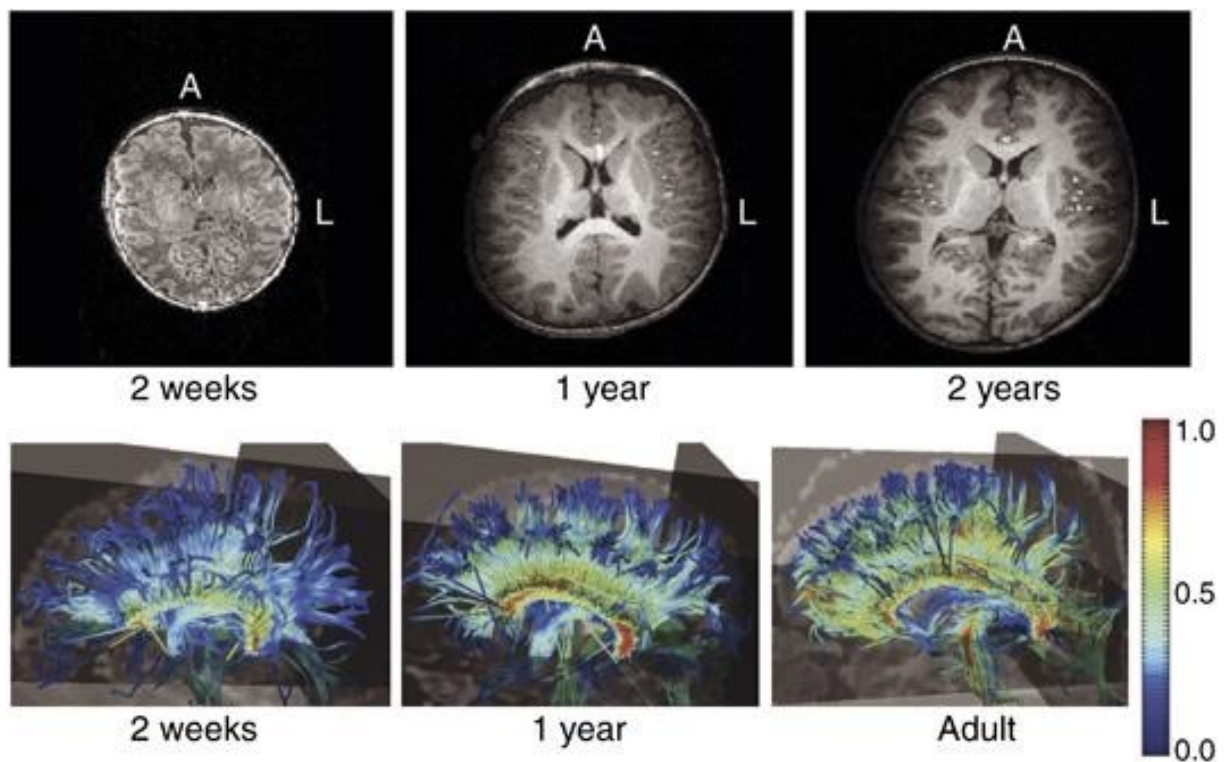


Figure 26. Myélinisation du cerveau à travers le développement. En haut, images IRM (Image par Résonance Magnétique) axiales d'un enfant capturées de façon longitudinale, montrant une augmentation de la taille du cerveau et de l'intensité de la substance blanche liée à l'âge. En bas, images DTI (Diffusion tensor imaging) de la tractographie de la substance blanche dans une comparaison transversale montrant une augmentation liée à l'âge de l'organisation de la substance blanche du corps calleux. Chaque panneau représente un sujet. L'échelle de couleur représente l'anisotropie fractionnelle ; des valeurs plus élevées sont en corrélation avec une plus grande organisation des pistes de fibres. Extraite de Tau & Peterson (2009).

En somme, le cortex préfrontal et les réseaux neuronaux ne sont pas matures chez le jeune enfant. Or, sa maturation permettrait le développement des compétences attentionnelles notamment une meilleure aptitude de focalisation attentionnelle (e.g., Enns & Girgus, 1985), d'inhibition et de flexibilité attentionnelle (Case, 1992 ; Dempster & Brainerd, 1995 ; Enns & Brodeur, 1989). Ceci explique les effets des mauvaises performances dans des situations de double-tâche (Irwin-Chase & Burns, 2000). Cependant, il y a encore débat sur ce qui se développe réellement dans les mécanismes attentionnels. Pour certains chercheurs, c'est la quantité de ressources dont dispose l'enfant qui croît à mesure que l'enfant grandit (Pascual-Leone & Baillargeon, 1994). Pour d'autres, ce sont les capacités de contrôle qui augmentent avec l'âge (Karatekin, 2004), tel que les enfants plus âgés utilisent plus efficacement leurs ressources (Case, 1990 ; Cowan, Nugent, Elliott, Ponomarev & Saults, 1999). Il est à noter toutefois que ces hypothèses ne sont pas exclusives.

Pascual Leone et Baillargeon (1994) développent ainsi un modèle mathématique de développement de l'attention. Dans ce modèle, la capacité d'attention mentale (M_{capacity}) dépend simultanément des variations de niveaux de capacité d'attention mentale des sujets (M_{power}) et de la demande mentale des tâches (M_{demand}). M_{power} est croissante jusqu'à l'âge d'environ 2-3 ans et représente le taux de ressources attentionnelles. M_{demand} quant à lui augmente au-delà de 2-3 ans grâce à l'automatisation de schèmes qui dépend des opérations cognitives impliquées dans une tâche. Ainsi, les capacités de raisonnement de base et les opérations de contrôles concourent également à l'augmentation des ressources attentionnelles avec l'âge.

En outre, une troisième hypothèse est qu'on assisterait avec la maturation cérébrale à l'augmentation avec l'âge de la vitesse du traitement de l'information. Comme nous l'avons vu, la myélinisation de l'encéphale impliquée dans la rapidité de l'influx nerveux progresse jusqu'à l'âge adulte. Ceci se traduit au niveau comportemental par une augmentation de la vitesse de traitement (Bartzokis, Lu, Tingus, Mendez, Richard, Peters, Oluwadara, Barrall, Finn, Villablanca, Thompson & Mintz, 2011 ; Kail & Ferrer, 2007). L'accélération de la vitesse de traitement a de multiples répercussions sur le traitement cognitif. En traitant plus rapidement l'information, les enfants saturent moins rapidement leurs systèmes de mémoire de travail, ils sont capables de prêter attention à davantage de stimuli, ils sont aptes à réajuster plus rapidement le niveau d'attention nécessaire selon la demande de la tâche et enfin, et ils consomment moins de ressources pour réaliser la tâche. Certains chercheurs affirment alors que le facteur le plus déterminant est la vitesse de traitement de l'information. Le développement des autres fonctions cognitives dépendrait alors de cette fonction primaire. Toutefois, il est

difficile de savoir si c'est la vitesse de traitement qui améliore les capacités attentionnelles ou si ce sont les capacités attentionnelles qui augmentent la vitesse de traitement. Dans les modèles d'horloge interne, il est en fait difficile de savoir si les modifications avec l'âge de la vitesse de traitement se traduisent par une accélération de l'horloge interne ou par une augmentation des systèmes propres à l'attention et ses différentes composantes. Bien que l'on ne puisse exclure les deux hypothèses (Droit-Volet, 2016), nous avons pris le parti de nous baser sur les modèles attentionnels d'estimation du temps qui n'évoquent pas cette influence de vitesse de traitement du temps. De plus, en voulant tester l'accélération du système d'horloge interne avec des séquences accélérées de clicks, Droit-Volet (2017) observe que ces effets sur le jugement du temps dépendent aussi des capacités attentionnelles de l'enfant.

En somme, pour des raisons liées au développement cérébral, l'attention se développe au cours de l'enfance, plus particulièrement entre 5 et 8 ans, pour se prolonger lentement jusqu'à l'âge adulte. Le chapitre théorique final vise à articuler ce que nous venons d'exposer sur le développement de l'attention avec le développement du jugement des durées.

CHAPITRE V : ETUDES ATTENTION – TEMPS : APPROCHE DEVELOPPEMENTALE ET QUESTIONS POSEES

I – Le paradigme de double-tâche appliqué au temps

Lorsque l'observateur a pour unique tâche de juger de la durée, le ratio de la durée estimée sur la durée réelle augmente généralement en fonction de la quantité d'informations non-temporelles à traiter dans l'intervalle évalué (Fraisse, 1963 ; Thomas & Brown, 1974) ou de leur complexité (Schiffman & Bobko, 1974 ; Thomas & Weaver, 1975). Ainsi, l'estimation du temps est meilleure lorsque l'on simplifie le milieu, en supprimant toutes les « fioritures » contextuelles. En situation de double-tâche, avec une tâche temporelle et une tâche non-temporelle, la soustraction de la durée estimée en simple tâche par celle en double-tâche est toujours inférieure à zéro. Ce résultat indique une sous-estimation temporelle en double-tâche comparativement à la simple-tâche. Cette sous-estimation temporelle a été observée indépendamment de la tâche non temporelle employée, que ce soit une tâche mnésique (e.g., Champagne & Fortin, 2008 ; Fortin & Breton, 1995 ; Fortin, Rousseau, Bourque, & Kirouac, 1993), une tâche de Stroop (Brown & Perreault, 2017 ; Zakay & Fallach, 1984) ou encore

d'autres types de tâches (e.g., Casini & Macar, 1997, 1999 ; Coull, 2004 ; Fortin & Rousseau, 1998 ; Grondin & Macar, 1992 ; Hicks, Miller, & Kinsbourne, 1976 ; Kladopoulos, Hemmes & Brown, 2004 ; Macar, Grondin, & Casini, 1994). Pour tenter d'expliquer l'effet de raccourcissement temporel observé dans les tâches doubles, Thomas et Weaver (1975) ont proposé un modèle mathématique qui, bien que peu cité est la principale base de tous les modèles et travaux sur l'attention et le temps.

II – Les modèles attentionnels

II – 1. Modèle de Thomas et Weaver (1975)

Le modèle attentionnel de Thomas et Weaver répond à la simple équation fonctionnelle $t(I) = \alpha f(t, I) + (1 - \alpha) g^*(I)$, présentée graphiquement Figure 27. Ainsi, selon ce modèle, la durée perçue (t) d'un intervalle contenant certaines informations (I) est égale à la moyenne pondérée de la quantité d'informations encodées par un processeur temporel $f(t, I)$ et un processeur non temporel $g^*(I)$ (Thomas & Weaver, 1975 ; Thomas & Brown, 1974). Le temps est alors conçu comme étant un système général de traitement de l'information, et non au sein d'un système spécifique aux informations temporelles. La durée perçue dépend alors de la quantité d'attention accordée aux informations temporelles, au détriment de celles accordées aux informations non-temporelles. Par conséquent, elle est dépendante des ressources puisées par la tâche non temporelle : plus l'attention est détournée du temps et plus le temps est sous-estimé. De ce fait, le modèle intègre également la notion de fiabilité (α), la durée estimée (t) reposant davantage sur le processeur temporel ou non-temporel, en lien aux ressources attentionnelles allouées. Ainsi, plus α se rapproche de 1, plus le sujet encode d'informations temporelles et plus l'indice de fiabilité α se rapproche de 0, plus le sujet encode d'informations non temporelles. En somme, dans les jugements rétrospectifs, où très peu d'attention est allouée au temps, $\alpha f(t, I)$ a très peu de poids dans l'estimation. A l'inverse, dans le jugement prospectif, $\alpha f(t, I)$ est plus lourd au détriment de $(1 - \alpha) g^*(I)$.

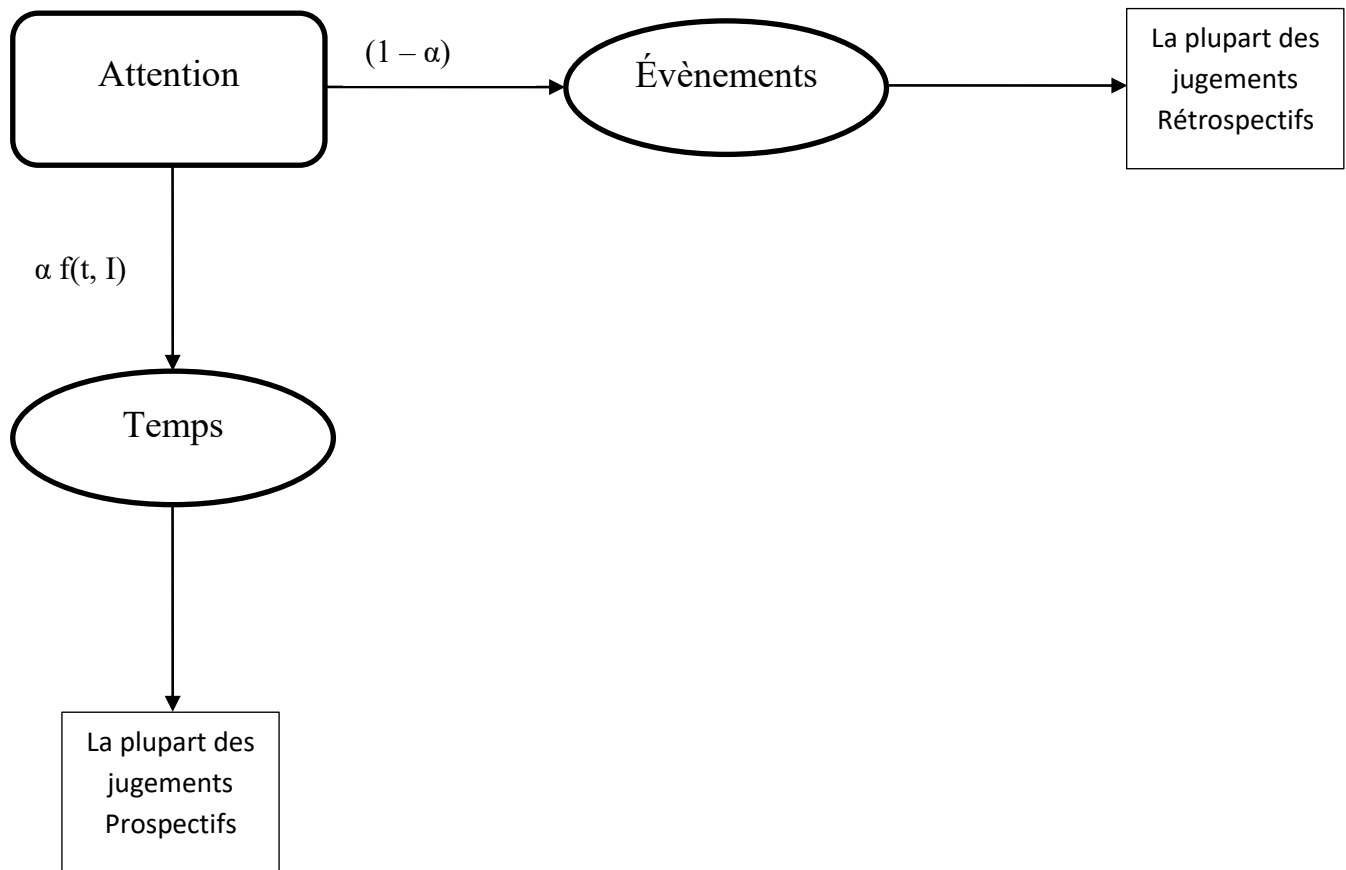


Figure 27. Equation fonctionnelle du modèle de Thomas & Weaver (1975).

En 1989, Zakay perfectionne l'idée proposée par Thomas et Weaver (1975) et propose le modèle d'allocation de ressources ou « RAM » (Resource Allocation Model). Dans ce modèle, l'estimation temporelle repose uniquement sur la sortie du processeur le plus fiable, l'autre étant supprimé. Cette distinction permet d'expliquer les différents résultats entre les approches prospectives ou rétrospectives de l'estimation de temps, comme nous venons de l'évoquer pour le modèle de Thomas et Weaver (1975). En effet, dans le cas d'un jugement temporel rétrospectif, nous allouons davantage nos ressources attentionnelles à l'information non temporelle. Le processeur temporel est donc le moins fiable des deux processeurs puisque le temps n'est pas l'objet principal du traitement cognitif. Dans ce cas, l'estimation du temps est donc intégralement dépendante du processeur non-temporel. Elle se base alors sur les informations du processeur non-temporel envoyées en mémoire de travail, puis en mémoire à long terme. Or, plus l'attention est dévolue au processeur non-temporel, plus la taille de stockage (« storage size ») en mémoire à long-terme est importante. Ainsi, en condition rétrospective, l'estimation est une fonction linéaire positive de la taille de stockage. Dans la

situation prospective, c'est le processeur temporel qui, en revanche, nourrit l'estimation du temps, puisque le sujet lui a alloué plus de ressources attentionnelles.

Pendant chaque intervalle de temps mesuré, des « unités de temps subjectif » s'accumulent dans ce processeur. Zakay explique alors que l'estimation du temps repose ainsi sur la quantité « d'unités de temps subjectif » accumulée en mémoire de travail durant la durée de l'intervalle, où plus il y a eu de ressources allouées aux informations non temporelles, plus d'unités temporelles sont perdues. De ce fait, le temps est sous-estimé. L'allocation des ressources entre ces deux processeurs serait dépendante de plusieurs facteurs comme les attentes du sujet, les consignes reçues, la difficulté du traitement de la tâche, ou encore la signification subjective de la situation.

Comme nous l'avons déjà stipulé, de nombreuses études ont obtenu des résultats validant les prédictions du modèle de Zakay. Dans ces études, les chercheurs ont par exemple manipulé la difficulté de la tâche non temporelle ou bien donné des consignes explicites de partage attentionnel. Quelle que soit la procédure employée pour moduler l'attention, les résultats de ces études révèlent que le détournement des ressources attentionnelles des paramètres temporels détériore systématiquement la performance temporelle dans le sens d'un raccourcissement de la durée subjective dit « shortening effect » (Casini & Macar, 1997, 1999 ; Casini, Macar & Grondin, 1992 ; Grondin & Macar, 1992 ; Hicks & Brundige, 1974 ; Hicks, Miller, & Kinsbourne, 1976 ; Macar, Grondin, & Casini, 1994 ; Predebon, 1996 ; Thomas & Cantor, 1978 ; Tse, Intriligator, Rivest & Cavanagh, 2004 ; Underwood & Swain, 1973 ; Zakay, 1993 ; Zakay & Tsal, 1989). Cependant aucune de ces études n'a regardé les changements de performances temporelles selon les différences interindividuelles en terme de capacités attentionnelles chez l'adulte comme chez l'enfant. Or, les moins bonnes capacités attentionnelles des jeunes enfants peuvent être à l'origine de leurs moins bonnes performances temporelles. Notre question est donc : est-ce que le bruit du système perceptif temporel chez l'enfant peut s'expliquer par leurs capacités attentionnelles réduites ? Si oui, comment les performances temporelles chez les enfants avec des capacités réduites varient suivant le type de tâche attentionnelle ? L'un des objectifs de nos études expérimentales vise à étudier ces questions sur différentes quantités de ressources attentionnelles, différents intervalles, dans différents types de tâches, notamment de double tâche. Nous avons également évalué les capacités de mémoire à court terme et de mémoire de travail pour déterminer les meilleurs prédicteurs des différences avec l'âge dans les jugements temporels selon les différentes tâches utilisées.

Bien que les modèles attentionnels que nous venons de décrire permettent d'expliquer de nombreux effets, ils s'avèrent aussi insuffisants sur certains points. Il n'y a notamment aucun mécanisme dédié à des facteurs physiologiques comme l'état d'éveil. En effet, ces modèles supposent un bassin constant de ressources attentionnelles, sans prendre en compte le niveau d'éveil ou les variations de la vigilance imputables aux rythmes circadiens et à d'autres facteurs biologiques. Zakay et Block (1994) ont notamment essayé de pallier à ce problème dans leur modèle plus récent de porte attentionnelle.

II – 2. Le modèle attentionnel de Zakay et Block

II – 2.1. Présentation du modèle

Afin d'affiner le modèle de traitement de l'information temporelle initialement proposé par Gibbon et ses collaborateurs, Zakay et Block (1994) ajoutent de nouvelles variables d'entrée qui envisagent les effets physiques de l'éveil sur l'horloge interne. Sur la Figure 28 représentant leur modèle, on peut apercevoir trois nouvelles variables d'entrée ayant chacune un impact sur un mécanisme spécifique d'horloge interne. Comme nous l'avons déjà dit à plusieurs reprises, le premier mécanisme est fonction de l'état d'éveil, ce qui impacte directement la fréquence d'émission des impulsions du pacemaker. Le second mécanisme correspond à l'attention allouée à l'information temporelle. Celle-ci agit directement sur le mécanisme de portail attentionnel (*attentional gate*). Elle permet au portail de s'ouvrir plus ou moins largement, laissant ainsi transiter une quantité d'impulsions plus ou moins importante. Plus la quantité de ressources attentionnelles allouées au temps est petite, en présence d'une double tâche non temporelle par exemple, plus petite est l'ouverture du portail attentionnel. Par conséquent, moins d'impulsions passent et le temps est perçu comme plus court qu'il ne l'est réellement. Cette opération rend donc compte de la fluctuation de la quantité d'attention allouée au temps de façon continue, sans interruption. Aussi, Zakay et Block ajoutent un troisième mécanisme, celui de la signification temporelle. Celle-ci joue le rôle d'attention sélective, permettant à l'interrupteur attentionnel, décrit dans le modèle d'horloge interne de Gibbon et ses collaborateurs (page 32), de s'ouvrir ou de se fermer. Pour sa part, l'interrupteur fonctionne de façon binaire, en "tout ou rien". Il se ferme au début et s'ouvre à la fin d'un intervalle temporel à juger (Zakay & Block, 1994, p. 175). Les résultats de différentes études étayaient cette idée en démontrant par exemple que l'augmentation de la variabilité dans le délai de fermeture de l'interrupteur serait due à une attention sélective moindre (Allan, 1992 ; Droit-Volet, 2003 ; Witherspoon & Allan, 1985). Tout comme les différences dans les capacités d'attention

sélective pourraient prédire sa variabilité d'ouverture en fin de durée (Allan, 1992 ; Droit-Volet & Wearden, 2002). Le modèle de Zakay et Block est le modèle actuel le plus utilisé dans les études sur le jugement temporel. Nous avons fait le choix de nous baser sur ce modèle. Néanmoins, il faut être conscient que ce modèle a été discuté.

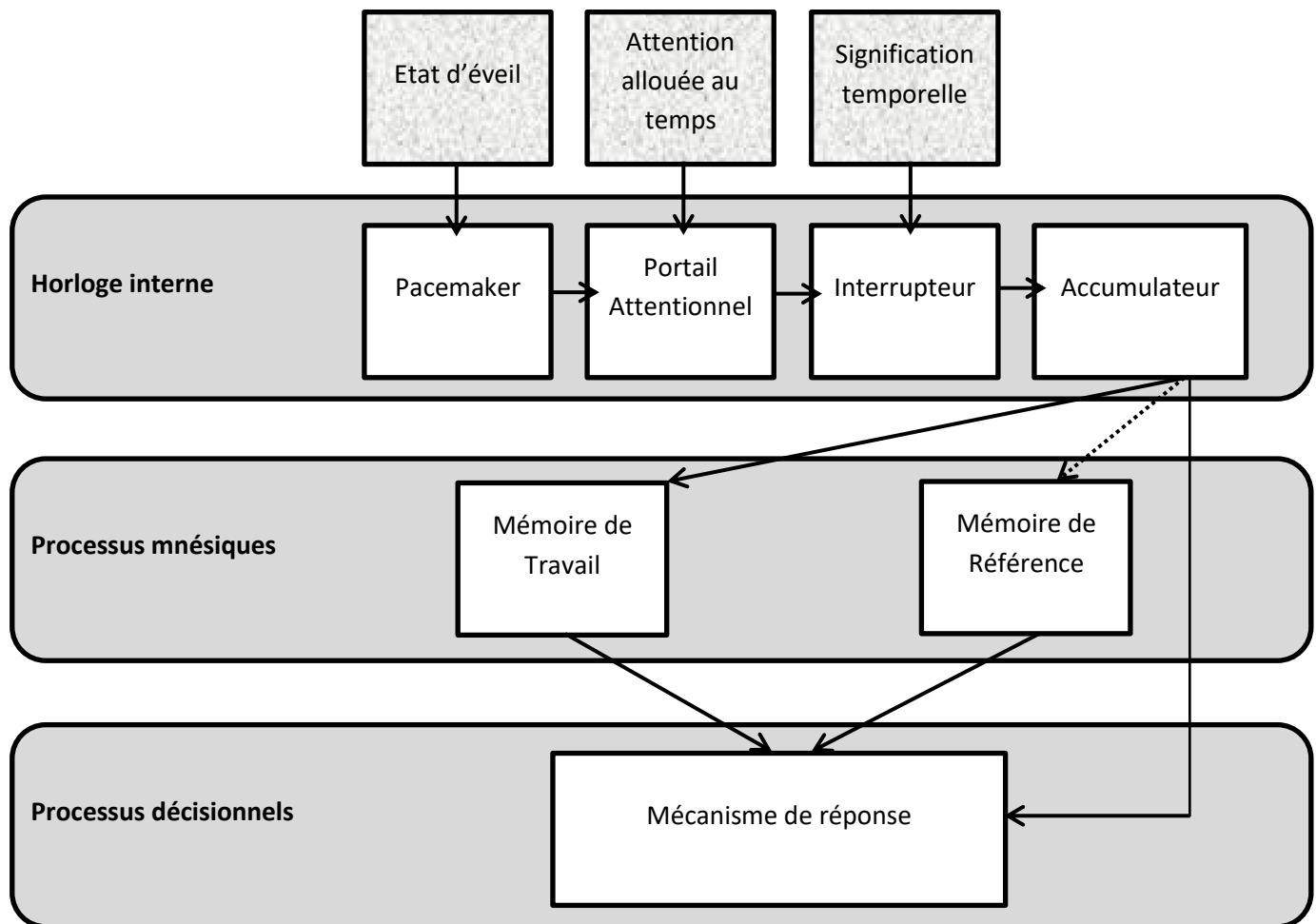


Figure 28. Modèle de portail attentionnel selon Zakay et Block (1994).

II - 2.2. Discussion du modèle

Suite à la publication du modèle de Zakay et Block (1994), une controverse s'est engagée sur la nature du mécanisme attentionnel. Le mécanisme de porte attentionnelle a notamment été remis en question. Selon Helga Lejeune (1998, 2000), le portail attentionnel est un mécanisme superflu, car tout peut être expliqué par l'interrupteur attentionnel. Lejeune explique que le délai d'ouverture et de fermeture de l'interrupteur peut varier selon l'attention accordée au stimulus temporel. Elle propose aussi un autre mode de fonctionnement de l'interrupteur. En effet, sur leur modèle, Gibbon et ses collègues (1984) ont décrit l'interrupteur

comme fonctionnant selon un mode « run » et un mode « stop », permettant d'accumuler ou non les impulsions. Cependant, comme le dit Lejeune, il est tout à fait concevable d'établir un troisième mode de fonctionnement avec l'oscillation de l'interrupteur entre ces deux états selon un mode vacillant « flickering mode » (Figure 29). Dans ce mode, l'interrupteur s'ouvre momentanément lors du passage de l'attention de la tâche temporelle à la tâche non temporelle. L'attention est donc conçue comme un système d'alternance de phases attentionnelles. Ainsi, si la tâche non-temporelle est trop complexe, ou s'il est demandé au participant de moduler l'attention à allouer aux informations non temporelles, alors l'interférence est plus grande. Le nombre plus important d'ouvertures de l'interrupteur va de manière subreptice engendrer une perte d'unités temporelles plus importante, résultant en une sous-estimation du temps plus marquée.

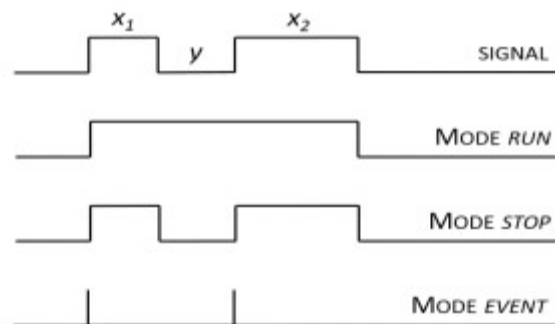


Figure 29. Schéma des différents fonctionnements de l'interrupteur attentionnel au sein de l'horloge interne. X1 et X2 correspondent à des durées pour lesquelles l'interrupteur est fermé, et les unités temporelles sont accumulées. « Y » correspond à l'ouverture de l'interrupteur, quand les unités temporelles sont perdues. Extrait de Lejeune, 1998.

Cela étant, quelle que soit la nature du mécanisme attentionnel en jeu, les prédictions restent similaires. Le temps perçu dépend de l'attention qui lui est allouée, celui-ci étant raccourci plus ou moins selon le manque d'attention. De même, lorsqu'aucune attention n'a été allouée au temps, l'estimation repose sur les informations non temporelles gardées en mémoire. Il subsiste néanmoins un problème pour les études comportementales car le flickering de l'interrupteur se traduit par des effets sur le jugement temporel de type multiple avec les durées. Il est alors difficile de clairement dissocier les effets d'accumulateur et de ralentissement de l'horloge interne (Penney, 2003).

III – Attention et estimation du temps chez l'enfant : son étude et les perspectives de recherches

Étonnamment, seules quatre études ont testé expérimentalement le développement typique du jugement du temps chez l'enfant dans un paradigme de double-tâche (Arlin, 1986a, 1986b ; Gautier & Droit-Volet, 2002 ; Rattat, 2010) et aucune de ces études n'a étudié le lien entre les performances temporelles des enfants et leurs capacités cognitives. Dans l'étude d'Arlin (1986a, b), il est demandé aux enfants âgés de 6 à 12 ans de reproduire la durée de sons (2, 10, 5 s) lorsqu'ils effectuent une deuxième tâche non-temporelle, telle que nommer une série d'images. Dans l'étude de Gautier et Droit-Volet (2002) et celle de Rattat (2010), il est demandé aux enfants plus jeunes, âgés de 5 à 8 ans, de reproduire un stimulus visuel de 6 ou 12 s avec différentes tâches interférentes: nommer des images, discriminer des sons, ou réaliser une tâche de mémoire visuo-spatiale. Dans toutes ces études, la reproduction de la durée est toujours plus courte dans la double tâche que dans la simple tâche, et ce, d'autant plus que l'enfant est jeune. Les auteurs ont donc logiquement conclu que cet effet est la conséquence des capacités attentionnelles limitées chez les plus jeunes enfants (Dempster & Brainerd, 1995 ; Gathercole, 2002 ; Towse, Hitch & Horton, 2007)

Le lien direct entre les capacités d'attention et l'ampleur de l'effet de raccourcissement temporel n'a donc pas encore été démontré chez les enfants, aucune étude n'ayant encore évalué les capacités d'attention individuelle. Pour la même raison, nous ne savons pas quelle composante cognitive de l'attention (mémoire de travail, attention partagée, attention sélective) intervient dans le raccourcissement du temps dans une situation de double tâche. Des effets attentionnels ont été mis en avant, mais quelle dimension de l'attention influe le plus sur les distorsions temporelles ? De plus, les chercheurs n'ont à notre connaissance jamais testé l'aptitude des enfants à réaliser une double-tâche si les deux tâches sont de nature temporelle, autrement dit si l'enfant doit traiter simultanément plusieurs durées. Les enfants, avec leurs capacités attentionnelles moindres, peuvent-ils juger plusieurs durées présentées simultanément ? Si oui, existe-t-il une distorsion et quelle est son ampleur ? Autrement dit, quel est l'effet d'interférence temporelle sur le jugement des durées ? L'ampleur de cet effet peut renseigner sur l'existence ou non de plusieurs horloges internes et / ou de plusieurs accumulateurs comme nous venons de le discuter dans cette introduction. Dans cette thèse, nous avons aussi réalisé plusieurs expériences sur d'autres paradigmes attentionnels, en l'occurrence

un paradigme implicite de double-tâche, de distracteur attentionnel, un paradigme d'interférence inter-dimensionnelle et un paradigme de recherche visuelle pendant l'estimation du temps. Cependant, dans cette thèse, je ne présenterai que les études qui ont été publiées ou qui feront l'objet d'un article scientifique.

Dans cette thèse sur attention et temps, nous nous sommes également intéressés aux effets de contexte sur la perception du temps et au développement de certaines dimensions. Récemment, une étude utilisant la tâche de reproduction temporelle a été menée chez des enfants autistes et « sains » âgés de 6 à 14 ans (Karaminis et al., 2016). Les résultats de cette étude, dont nous avons déjà parlé à propos de l'effet Vierordt, ont montré l'existence de l'effet de tendance centrale dans tous les groupes d'âge, avec un effet plus fort chez les participants plus jeunes. Cependant, nous ne savons pas aujourd'hui à quel âge cet effet apparaît et s'il existe un effet planché dû aux faibles capacités attentionnelles du jeune enfant. De plus, les auteurs n'ont pas analysé la possible influence des propres productions temporelles des participants. C'est pour cette raison que nous avons réalisé une étude sur cette thématique. De plus, nous avons réalisé deux autres études, l'une sur l'effet de contexte social et l'autre sur l'effet de la modalité sensorielle du stimulus, la question d'un stimulus sensoriel dans une modalité sensorielle pouvant requérir plus d'attention pour son traitement.

Chapitres expérimentaux

Le but de cette thèse est d'analyser les mécanismes pouvant être en jeu dans la plus grande variabilité du temps chez l'enfant.

Le chapitre I a pour objectif de nous orienter sur les âges des enfants qui devront être sélectionnés pour constituer les échantillons expérimentaux de ces travaux de thèse.

La première étude de cette thèse analyse donc l'évolution des aptitudes de discrimination temporelle auprès de sujets âgés de 3 à 19 ans (Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (submitted). The age of maturity in time discrimination abilities ?).

Le premier axe porte sur les effets de l'attention dans l'estimation du temps.

Plus exactement, la première étude vise à déterminer la ou les composante(s) attentionnelle(s) impliquée(s) dans la distorsion perceptive du temps lors d'une situation de double tâche et de comparer les distorsions générées par les enfants à celles générées par les adultes. (Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2017). High levels of time contraction in young children in dual tasks are related to their limited attention capacities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 161, 148–160. doi:10.1016/j.jecp.2017.04.013)

Dans une seconde étude, nous déterminerons également les différences de coûts et donc, de contraction temporelle, entre une simple et une double-tâche selon que celle-ci soit temporelle (deux tâches temporelles traitées simultanément) ou non temporelle (une tâche temporelle et une tâche non-temporelle). (Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2019). Timing in a dual-task in children and adults: when the interference effect is higher with concurrent non-temporal than temporal information. *Journal of Cognitive Psychology*, 31(1), 34–48. doi:10.1080/20445911.2019.1567519).

De par les résultats de cette étude, nous avons analysé sur une troisième étude, le développement de l'aptitude des enfants à traiter plusieurs durées simultanément. (Hallez, Q., Monier, F., & Droit-Volet, S. (submitted). Simultaneous time processing in children and adults: when attention predicts temporal interference effects).

Enfin, la dernière étude analyse non plus les effets d'allocation de l'attention au temps, mais les effets du contrôle de l'attention. Cette quatrième étude repose sur un paradigme de distracteurs attentionnels et analyse l'influence du moindre contrôle attentionnel (e.g., inhibition) sur les estimations temporelles. (Hallez, Q. (*en préparation*))

Cependant, nous nous sommes également intéressés aux effets contextuels pouvant générer des distorsions temporelles du temps. La première étude a ici pour but de tester l'effet de la modalité sensorielle de la présentation de la durée (visuelle vs auditive) sur le jugement du temps et ses changements au cours du développement. (Droit-Volet, S., & Hallez, Q. (2018).

Differences in modal distortion in time perception due to working memory capacity: a response with a developmental study in children and adults. *Psychological research*, 1–10. doi:10.1007/s00426-018-1016-5

Conjointement aux modèles Bayésiens exposés au sein de cette thèse, nous nous sommes également intéressés au contexte temporel et avons lancé une étude visant à comparer les effets du contexte temporel sur le jugement du temps chez les enfants et les adultes. (Hallez, Q., Damsma, A., Rhodes, D., van Rijn, H., & Droit-Volet, S. (2019). The dynamic effect of context on interval timing in children and adults. *Acta Psychologica*, 192, 87–93. doi:10.1016/j.actpsy.2018.10.004)

Le contexte social ayant également son importance, nous avons examiné dans une troisième étude la capacité des jeunes enfants à incarner le temps des autres dans leurs jugements de temps. (Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2018). Young children embody the time of others in their time judgments: The role of the theory of mind. *Infant and Child Development*, 27(6), e2101. doi:10.1002/icd.2101)

Enfin, le dernier chapitre constitue la pierre angulaire de la contribution de cette thèse, puisqu'il est l'aboutissement, en un modèle général, d'un modèle d'horloge interne développemental. Ce modèle, applicable tant chez l'adulte que chez l'enfant a pour but d'expliquer mécaniquement les effets attentionnels et cognitifs altérant la perception du temps. (Hallez, Q., Mermillod, M., & Droit-Volet, S. (*en préparation*))

AXE I : TEMPS ET NEUROPSYCHOLOGIE DEVELOPPEMENTALE

I – 1. Modélisation du développement des capacités de discrimination du temps au sein d'une tâche de bissection temporelle auprès d'une population âgé de 3 à 19 ans.

Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (submitted for peer-review). The age of maturity in time discrimination

Introduction

The studies that have examined the characteristics of time perception behaviors in human adults have used the same temporal discrimination tasks as those used in animals (Church & Deluty, 1977), such as the temporal bisection task (Allan & Gibbon, 1991; Wearden, 1991). In this task, individuals are presented with a short (*S*) and a long (*L*) standard duration on a small number of trials (3-5). They are then presented with probe durations equal to either *S* or *L* or of an intermediate value. Their task is to judge whether the probe duration is more similar to *S* or *L*. Data in temporal bisection are generally represented in the form of a psychophysical function plotted as the proportion of “long” responses [$p(\text{long})$] against probe durations. In bisection, human adults produce a psychophysical function with a steep slope, indicating a high sensitivity to time. A measure of this time sensitivity is the Weber Ratio (WR). The WR is a sort of coefficient of variation (SD/M). This is the Difference Limen (DL) divided by the point of subjective equality, also called the Bisection Point (BP). The BP is the probe duration that the participants classify as often long as short ($p(\text{long}) = .50$.) This is a sort of “psychological mid-point” of the duration range between *S* and *L* (Wearden, 2016, p. 72). The DL is half the difference between the probe duration giving rise to $p(\text{long}) = .75$ and that giving rise to $p(\text{long}) = .25$. A low WR indicates a high sensitivity to time, and a high WR a low sensitivity to time, thereby reflecting a flatter psychophysical function. In human adults, the WR is between 0.15 and 0.25, depending on the task difficulty, being found for example, in the visual modality, at 0.17 for the discrimination of durations in the range of hundreds of milliseconds and at 0.23 in that of seconds (15/30-s) (Droit-Volet, 2011; Zélanti & Droit-Volet, 2011).

The studies that have addressed the development of the ability to discriminate time have therefore logically used the temporal bisection task initially used in adults, and which is considered to be one of the easiest tasks to use in young children (Droit-Volet, Wearden, & Zélanti, 2015). McCormack et al. (1999) first tested this task in children aged 5, 8, and 10 years with one short duration range (200/800-s). Droit-Volet and Wearden (2001) subsequently tested children aged 3, 5 and 8 years with two longer duration ranges (1/4-s and 2/8-s). Despite a trend toward an increase in the BP value with increasing age, no significant age-related changes in the BP were found in these studies. The major developmental difference lay in the WR values, which were significantly higher in the 5-year-olds than in the 8-year-olds. These studies thus suggest a significant increase in time sensitivity between 5 and 8 years. Since these two

pioneering studies, a long series of at least 25 studies has been performed using the bisection task with typically developed children (e.g., Delgado & Droit-Volet, 2007; Droit-Volet, 2017; Droit-Volet, Clement, & Fayol, 2008; Droit-Volet & Izaute, 2009; Droit-Volet & Rattat, 2007; Droit-Volet, Tournet, & Wearden, 2004; Droit-Volet & Wearden, 2002; Droit-Volet & Zélanti, 2013a,b; Rattat & Droit-Volet, 2005; Zélanti & Droit-Volet, 2011, 2012), as well as with children with disorders (autism, deaf children, cerebellar disorders), although in limited numbers (e.g., Allman, DeLeon, & Wearden, 2011; Brodeur, Green, Flores, & Burack, 2014; Gil et al., 2012; Droit-Volet et al., 2013; Gori, Chilosi, Forli, & Burr, 2017; Gori, Sandini, & Burr, 2012). These studies systematically replicated the results previously found in children by identifying a significant increase in time sensitivity between 5 and 8 years of age. The studies that also included groups of adult participants also found that the 8-year-old children exhibited similar temporal bisection performance to that of adults. Nonetheless, some differences in performance were still observed between 8 years of age and adulthood under more difficult conditions, such as when long durations had to be judged (> 4 s) (e.g., Droit-Volet & Zélanti, 2013).

Since these studies, it has been common to consider that time discrimination abilities increase with age to reach an adult-like level at about 8 years of age. However, so far, studies have only tested differences in temporal performance between two or three groups of participants of different ages without investigating the exact age (6, 7, 8 years or even later) at which temporal performance is stabilized, which would indicate the attainment of maturity in time discrimination abilities. This is likely to be due to the methodological difficulty of testing a number of children of all ages ranging from 3 years through to adulthood, and finding a new mathematical way to identify a threshold above which temporal performance is stabilized, i.e., as of which no further changes occur, based on a performance development curve plotted against age. This is the purpose of this study in which a large sample of participants aged from 3 to 19 years was tested on two bisection tasks, one with a short duration range (0.5/1-s) and the other with a longer one (5/10-s).

Method

Participants

The sample consisted of 119 participants aged from 3 to 19 years (66 girls and 53 boys). The participants were recruited in the Auvergne-Rhône-Alpes region of France from

environments known to the researchers (including PhD students) at Clermont Auvergne University (UCA). All the participants were volunteers and signed written informed consent (parents signed on behalf of their children). This study was carried out according to the principles of the Helsinki Declaration.

Material and Procedure

The participants were seated in a quiet room in front of a computer with a 15" square screen. E-prime 2.0 software generated the experiment and recorded the responses. The stimulus to be timed was a blue circle presented in the center of the computer screen. Responses were made on the “*d*” and “*k*” keys of the computer keyboard on which stickers depicting a small or a larger circle indicated "short" or "long".

All the participants completed two bisection tasks, one for the short durations (0.5/1-s) and the other for the long durations (5/10-s). The task order was counterbalanced across subjects, with a 15-minute break between each task. For the short durations, the short anchor duration (*S*) was 0.5 s and the long anchor duration (*L*) 1.0 s. The probe durations were 0.5, 0.58, 0.67, 0.75, 0.83, 0.92, and 1.0 s. For the long durations, *S* and *L* were 5.0 and 10 s, respectively, and the probe durations: 5.0, 5.83, 6.67, 7.5, 8.33, 9.17 and 10 s.

In each bisection task, the participants were given a 10-trial training phase and a 70-trial testing phase. In the training phase, they were trained to respond “short” or “long” after *S* and *L*, by pressing the corresponding key, each duration being presented 5 times. Key-press assignments were counterbalanced across subjects. In the testing phase, the task was similar, i.e. responding “short” or “long” when the participants judged that the probe duration was more similar to *S* or *L*, respectively. In the testing phase, the participants performed 10 blocks of 7 randomly presented trials, one trial for each probe duration. A trial was initiated by the word “prêt/ready” presented on the computer’s screen and spoken by the experimenter. When the participant was actually ready, the experimenter pressed the spacebar and the visual stimulus was displayed after 600 ms. The experimenter also told the participants not to count because counting time can bias the data (Rattat & Droit-Volet, 2012).

Data analysis

Of the 119 participants, 9 % in the short duration condition (i.e., 5 participants aged 3 years, 3 aged 4 years, 2 aged 5 years and 1 aged 7 years) and 18 % in the long duration condition (i.e., 5 participants aged 3 years, 11 aged 4 years, 6 aged 5 years, 3 aged 6 years, 1 aged 7 years, 1 aged 9 years and 1 aged 19 years) were excluded from the statistical analyses because they

always responded short or long, giving a totally flat psychophysical function. This resulted in a final sample of 108 and 91 participants in the short and the long duration condition, respectively.

Statistical analyses were performed on three indexes of bisection performance: the proportion of long responses [$p(\text{long})$] for each probe duration, the bisection point (BP) and the Weber Ratio (WR). The BP and the WR were used to characterize the psychophysical function. As explained in the introduction, the BP is the probe duration giving rise to $p(\text{long}) = 0.50$. The WR is the index of the steepness of the psychophysical function that reflects time sensitivity. A high WR indicates a low time sensitivity coupled with a flatter psychophysical function and a low WR a higher time sensitivity with a steeper psychophysical function. These two indexes were derived from the fit of the Pseudo-Logistic Model (PLM) with the individual psychophysical functions (Killeen, Fetterman, & Bizo, 1997) (mean $R^2 = .83$ for the short duration condition, and $.77$ for the long duration condition).

For each index of temporal performance, the significant relationship between age (in months) and performance was initially tested using a Linear Mixed Model (LMM) for $p(\text{long})$ and simple linear regressions for BP and WR. These analyses make it possible to assess the significant evolution of performance with increasing age in the range from 3 to 19 years. However, it does not allow us to identify the exact age at which performance stabilizes, forming a plateau, which could be an indicator of the attainment of maturity. Therefore, for both the BP and the WR, we decided to fit our data using the Nelder-Mead simplex algorithm (downhill simplex algorithm) in the `scipy.optimize.fmin` package of Python. The Nelder-Mead method is an algorithm that optimizes the fit of a function (Lagarias, Reeds, Wright, & Wright, 1998; Nelder & Mead, 1965; Olsson & Nelson, 1975). It automatically converges towards the best parameter values by minimizing the sum of the squares of the differences between the data and the model. The evolution of the performance curve as a function of participants' age followed either an increasing (BP) or decreasing (WR) exponential law in accordance with the function $a \cdot \exp(-(x-b)/\tau) + c$ (Berg & Ditlevsen, 2013; Kasprovicz et al., 2012; Rall, 1960). The interest of this function lies in the fact that there is a constant time (τ), where τ is the x value of the origin of the tangent. After a period of 1 constant time (1τ), the function reaches approximately 37% of its final value. After a period of 5 constant times (5τ), the function reaches a value less than 1% of its asymptote. Consequently, 5τ is considered to represent a threshold beyond which differences are no longer significant (Liptak, 2003). This point can thus be used to identify the

exact age from which a stabilization of performance is observed, i.e., the age at which some parameters of judgment in temporal bisection cease to change.

Results

Proportion of long responses

Initial analyses showed neither an effect of gender nor any interaction involving this factor for either the short or the long duration condition (all $p > .05$), except for a main effect of gender in the long duration condition, indicating that the girls responded long more often than the boys ($B = 0.28$, $SE = 0.11$, $CI[-0.000829, 0.564106]$, $t = 1.955$, $p < .05$). Therefore, the gender factor was excluded from subsequent statistical analyses.

The LMM on $p(\text{long})$ showed a significant age x probe duration interaction for the short duration ($B = 0.000097$, $SE = 0.000005$, $CI[0.000087; 0.000107]$, $t = 19.559$, $p < .05$), and the long duration condition ($B = 0.000007$, $SE = 0.000001$, $CI[0.000005, 0.000008]$, $t = 11.294$, $p < .0001$), with a significant main effect of age and probe duration (Short duration: $B = -0.073$, $SE = 0.0043$, $CI[-0.0817, -0.065]$, $t = -17.09$, $p < .0001$; $B = 0.00049$, $SE = 0.000056$, $CI[0.00038, 0.0006]$, $t = 8.804$, $p < .0001$, respectively; Long duration: $B = -0.052$, $SE = 0.005$, $CI[-0.0623, -0.0427]$, $t = -10.49$, $p < .0001$; $B = 0.000061$, $SE = 0.000007$, $CI[0.000047, 0.000076]$, $t = 8.54$, $p < .0001$). There was therefore a significant increase across ages in the slope of the psychophysical function plotting $p(\text{long})$ against the probe durations.

Bisection Point

Figure 30 shows the mean BP for each age year in the range from 3 to 19 years for the short and the long duration condition. An analysis of variance was conducted with gender as between-subject factor and age as covariate for each duration condition taken separately. However, this did not reveal any effect of gender or age x gender interaction (all $p > .05$). By contrast, there was a significant effect of age on the BP for both the short duration ($B = .0001$, $SE = 0.0001$, $\beta = 0.22$, $t = 2.32$, $p < .05$), and the long duration condition ($B = .004$, $SE = 0.002$, $\beta = 0.22$, $t = 2.14$, $p < .05$). This suggests a shift in the BP value to the right during childhood, which is consistent with an initial shortening effect that gradually decreases with age.

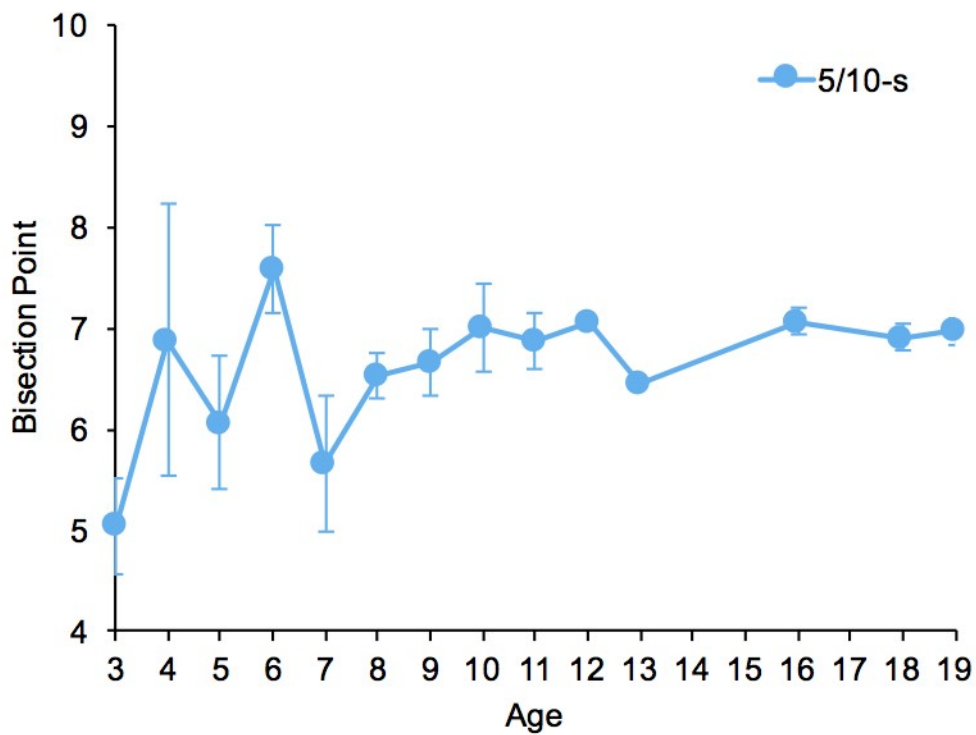
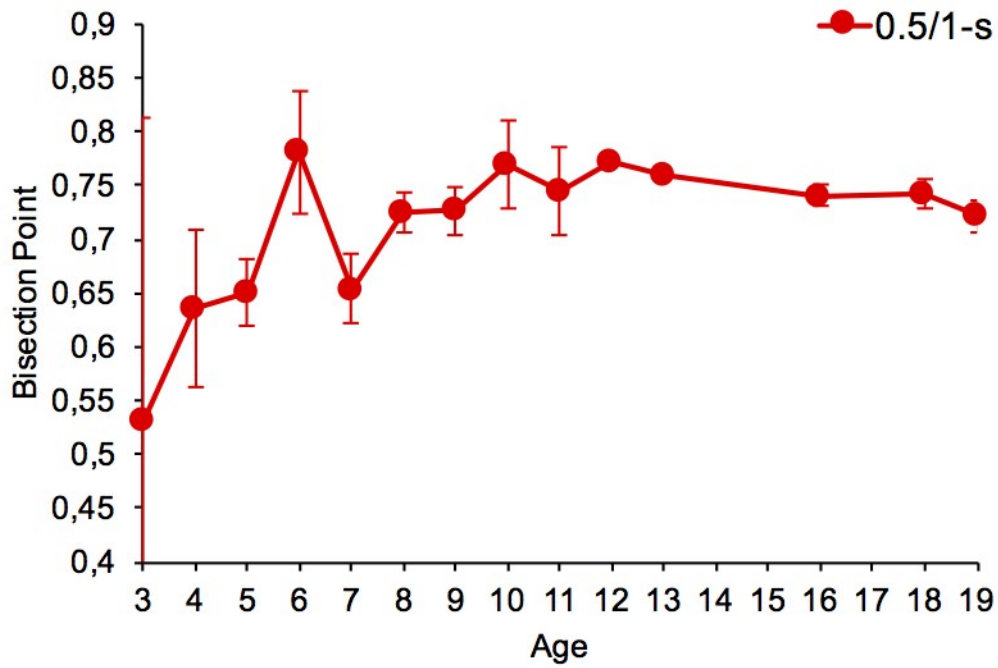


Figure 30. Mean bisection points for each age year going from 3 to 19 years, for the short (0.5/1.0-s) and the long (5/10-s) duration condition.

Nonetheless, the fit of our BP data with the results of our function $[a \cdot \exp(-(x-b)/\tau) + c]$ allows us to identify the age at which the BP value ceases to change. For the short durations,

the best predictor parameters were $a = 0.72$, $b = 48.25$, $\tau = 0.71$, $e = 0.0004$, $\text{Sum}_{\text{squares}} = 1.16$, $\text{LSD} = 0.01$; and for the long duration $a = 6.89$, $b = 142.30$, $\tau = 34.72$, $c = 0.10$, $\text{Sum}_{\text{squares}} = 59.09$, $\text{LSD} = 0.83$. However, the values of the last squares indices ($\text{Sum}_{\text{squares}}$ and LSD) accounting for the differences between the empirical data and the adjusted model, indicated a good fit for the function with the data for the short durations. Although there is no law or mathematical processes allowing us to decide from when the model is significantly different from the empirical data, it appears that the least squares indices are higher for the long durations. This indicates a considerable inter-individual differences in the BP values in the long duration condition. In our function, 5τ is equal to $5 * \tau + b$. Therefore, for the short duration, $5 \tau = 51.8$ ($5 * 0.71 + 48.25 = 51.8$). In other words, the BP value no longer varied from the age of 52 months (4.3 years), and systematically converged toward a BP value of 0.716 s, which is close to the geometric mean ($\sqrt{0.5}x1 = 0.707$) (Figure 31a). For the long duration, the BP would reach its final value ($y = 69.76$) at the age of 316 months ($5 * 34.72 + 142.30 = 315.9$), suggesting great inter-individual differences in BP values across all ages (Figure 31b). The inter-individual variability in the BP value was therefore lower for the short than for the long durations. The point of subjective equality in temporal bisection thus reached a value characteristic of that of adults at the early age of 4 years for the short duration and never reached a point of stabilization for the long duration. Both of these findings are consistent with the results of studies showing the absence of significant age-related differences in the BP.

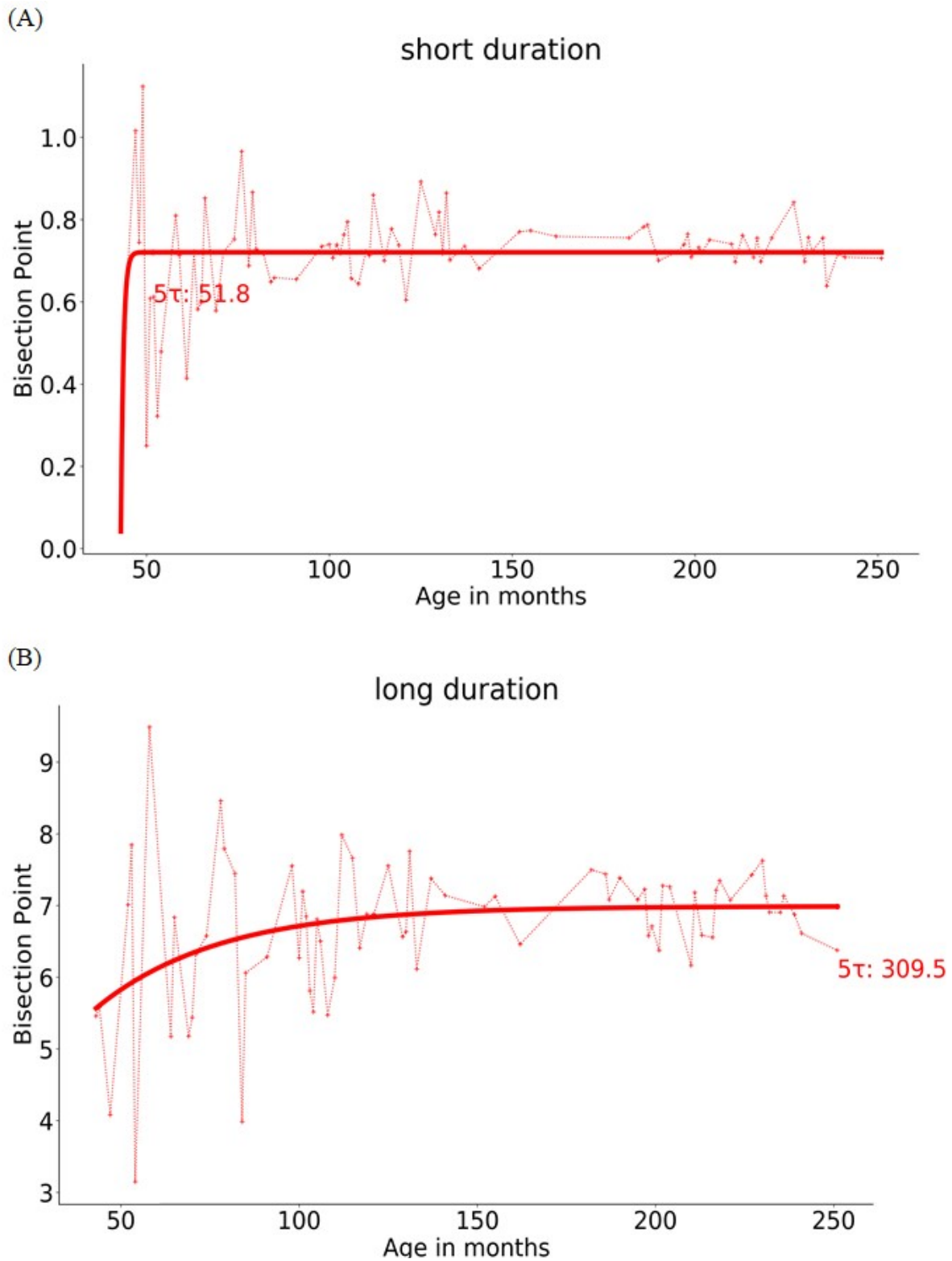


Figure 31. Empirical data (dotted lines) and fitted functions (continuous lines) of the bisection points plotted against the participants' age in months for the short (0.5/1.0-s) and the long (5/10-s) duration condition.

Weber Ratio

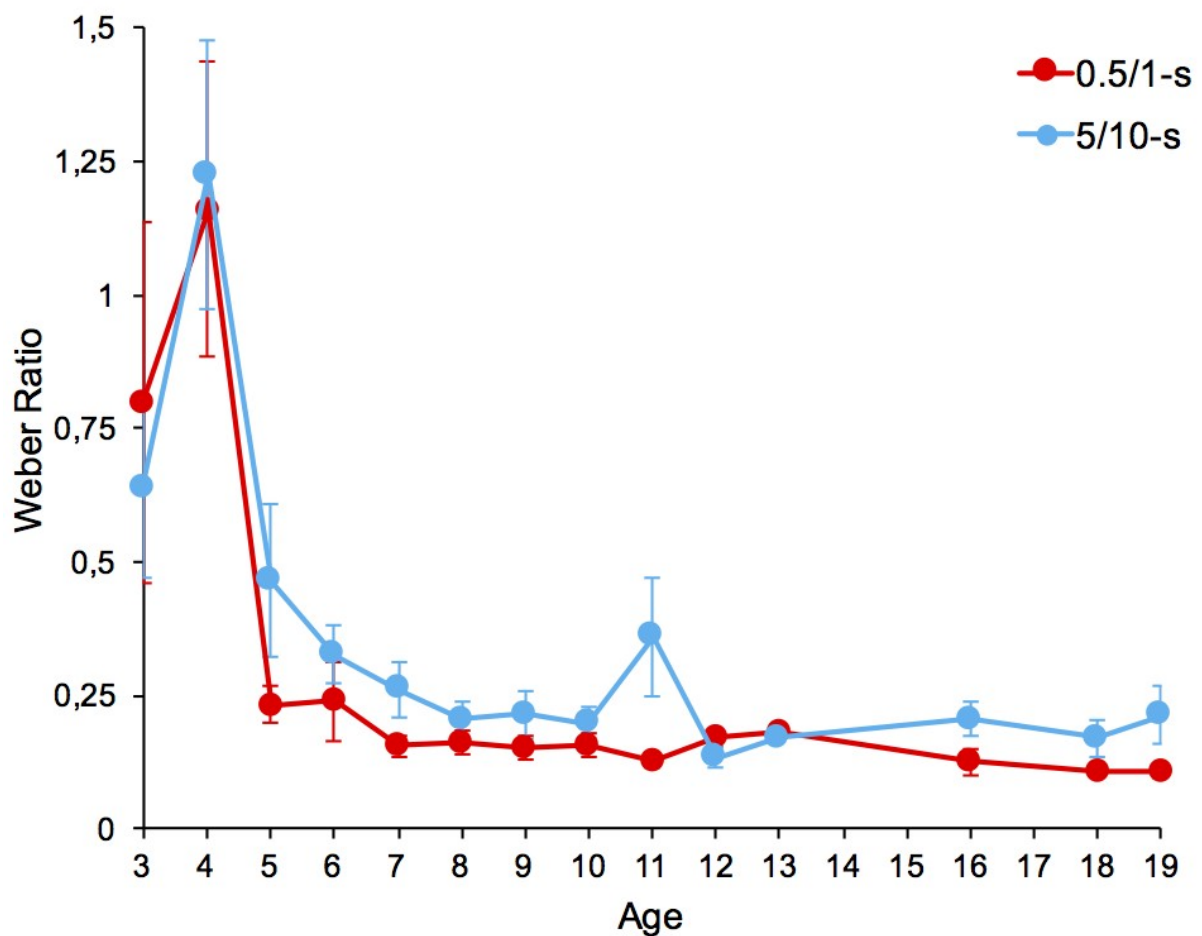


Figure 32. Mean Weber Ratio for each age year going from 3 to 19 years, for the short (0.5/1.0-s) and the long (5/10-s) duration condition.

Figure 32 shows the mean WR for the different ages in the short and the long duration condition. No effect related to the gender factor was found in the statistical analyses (all $p > .05$). The analyses only indicated a significant effect of age for the short duration condition ($B = -.003$, $SE = 0.001$, $\beta = -0.408$, $t = -4.607$, $p < .0001$), as well as for the long duration condition ($B = -.002$, $SE = 0.001$, $\beta = -0.333$, $t = -3.326$, $p < .001$). Therefore, the WR decreased significantly as children grow older, indicating a progressive improvement of sensitivity to time with increasing age from 3 to 19 years.

Notwithstanding, the modeling of our WR data suggests that the children reached an adult-like time sensitivity at the age of 6 years for the short durations and 8 ½ years for the long durations. To establish these ages, we did not use the function described above $[a \cdot \exp(-(x-b)/\tau) + c]$ because it did not fit well with our data, due to the great inter-individual variability in the WR values in the children younger than 5 years (60 months). As the variability seems to follow a Gaussian inverse law, a better fit can be obtained by multiplying the increasing exponential function and by its decreasing inverse, thus keeping the advantage of a time constant, i.e. $a(1-\exp(-(x-b)/c)) \cdot (\exp(-(x-d)/\tau) + e)$.

The final functions were therefore $48.64 \cdot (1 - \exp(-(x-43.08)/7025.46)) \cdot \exp(-(x-60.98)/3.33) + 0.14$, $\text{Sum}_{\text{squares}} = 4.30$, $\text{LSD} = 0.05$, for the short durations, and $113.15 \cdot (1 - \exp(-(x-42.58)/23098.98)) \cdot \exp(-(x-72.31)/6.50) + 0.21$, $\text{Sum}_{\text{squares}} = 7.55$, $\text{LSD} = 0.11$, for the long durations. Thus, for the short durations, 5τ is equal to 77.7 ($5 \cdot 3.33 + 60.98 = 77.7$), suggesting that, at 6 years, the WR value has reached a value that no longer changes despite the increase in age, with a WR close to 0.21 (Figure 33a). For the long duration, the asymptote was similar ($y = 0.21$), but it converged later, at the age of 8.75 years (105 months) ($5 \cdot 6.50 + 72.31$) (Figure 33b).

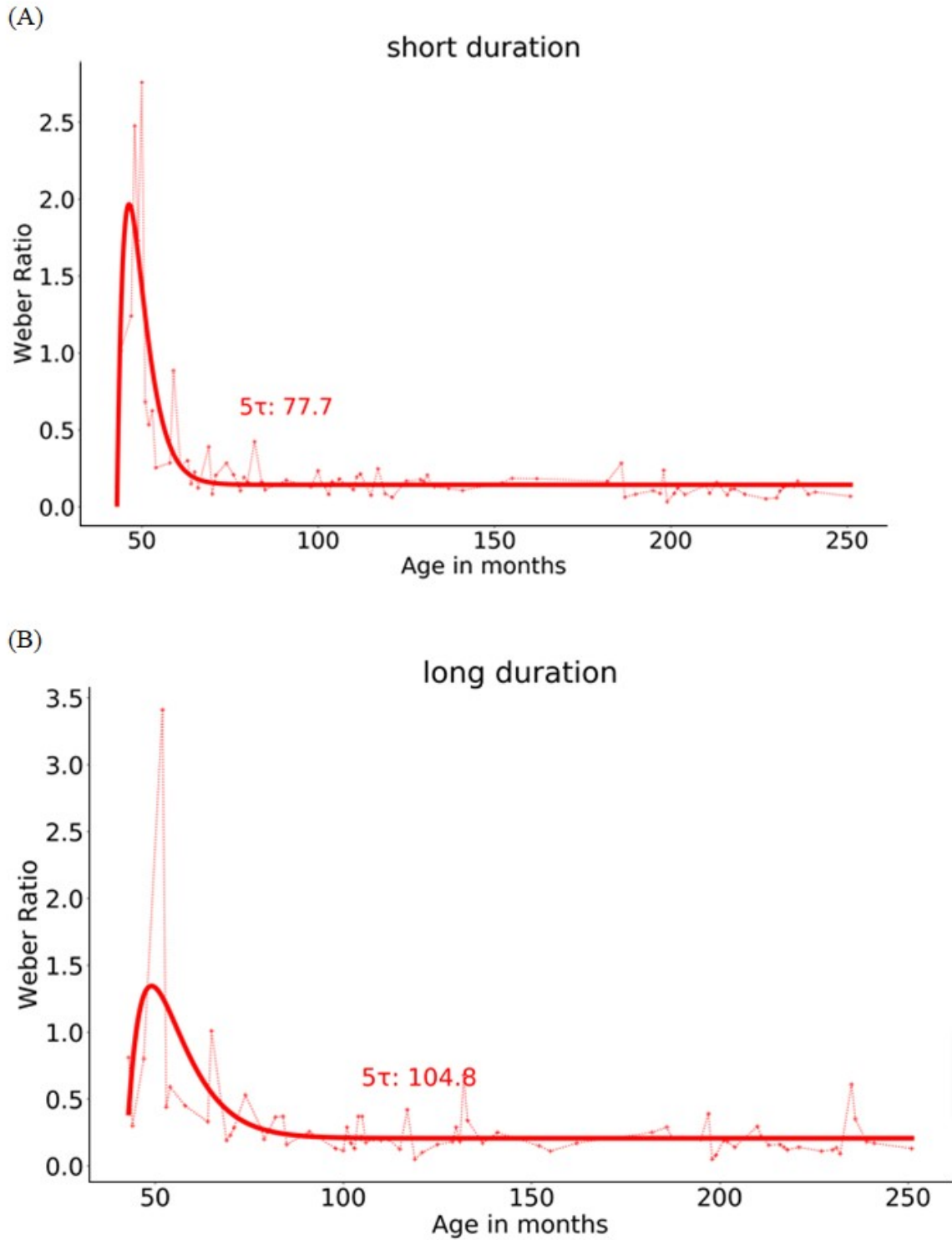


Figure 33. Empirical data (dotted lines) and fitted functions (continuous lines) of the Weber Ratio plotted against the participants' age in months for the short (0.5/1.0-s) and the long (5/10-s) duration condition.

Discussion

The present study was designed to identify the age of maturity in time abilities, that is the exact age from which performance in a time discrimination task reaches adult-like characteristics, for both the processing of short durations of a few hundreds of milliseconds and that of longer durations of several seconds. A temporal bisection task was used because it is judged to be one of the easiest to use in young children (Droit-Volet, Wearden, & Zélanti, 2015). Our data obtained from a large sample of participants aged from 3 to 19 years and their modeling allows us to identify that the curve plotting the evolution of WR values as a function of age reached a floor threshold at the age of 6 years for the short durations, and 8 ½ years for the long durations. At the same time, the curve for the BP values never reached a ceiling threshold for the long durations, whereas it reached a converging value at the very young age of 4 years.

Our results on the BP are entirely consistent with those of previous developmental studies using two age groups, one of 5 and the other of 8 years, or three age groups including a group of adults. Indeed, most of these studies did not find any age-related effect on the BP values. Accordingly, we also did not observe any significant changes in the BP between the 5-year-olds and the adults. Nevertheless, the cause of the absence of any significant difference in BP varied as a function of the duration range. For the short duration, our results suggest that this difference was due to the value of the mid-point between S and L , which becomes fixed very early, at the very young age of 4 years. By contrast, for the long duration, it was due to the great inter-individual variability in the BP values at all ages, with the result that no converging value emerged. This demonstrates an early accurate representation of short durations (< 1 s). This is consistent with the studies on babies using other adapted procedures that suggest that there is an early ability to accurately represent stimulus durations of the order of milliseconds even at these ages (e.g., Brannon, Roussel, Meck, & Wodroff, 2004; Provasi, Rattat, & Droit-Volet, 2011). Therefore, our results provide additional evidence of an early automatic processing of short durations, in other words of an innate ability to represent the temporal properties of our surrounding environment. However, when the stimuli to be timed were of long durations, longer than 5 s, no common mid-point between S and L among individuals emerged in bisection, or became common from a given age. Wearden and Ferrara (1995, 1996) showed that the value of BP depends on the temporal scale examined and the difficulty of the task. Consequently, when the bisection task is more difficult, as in the long duration condition used

in our study, although a subjective temporal threshold between S and L can be found on all individual bisection curves, this temporal threshold value varies too much between individuals. The inter-individual differences in decision rules and/or the extent of the difference tolerated between the probe duration and L in order to answer “long” probably explained this finding in the case of the long durations (Wearden, 1993, 2004).

Our data also confirm that the major developmental difference in timing abilities lies in the variability of time judgment, i.e., in the WR values in temporal bisection. Indeed, our data clearly found a decrease in the WR values with age. Moreover, the mathematical modeling of our data allows us to identify a threshold age at which no further difference in temporal performance is expected. This age appears to be 6 years for the short durations and 8 ½ years for the long durations. In other words, sensitivity to time in temporal bisection stops improving at 6 years and 8-9 years for the short and the long durations, respectively. Preliminary developmental studies have not been designed in a way that would make it possible to detect these key ages in the maturation of time discrimination. Nevertheless, for short durations, they have systematically obtained a significant difference in WR values between groups of children aged 5 and 8 years, with no difference being observed between 8-year-olds and adults. Our results therefore confirm that the age of 6 years is a key age in terms of timing development, at least for short durations (< 1 s). Only a few studies have examined long durations in children, even in temporal bisection. However, those that have been conducted suggest that time abilities develop later. Droit-Volet and Zélanti (2003) and Droit-Volet et al. (2015) still observed differences in the WR values between 7-9 years and adult age for the duration ranges of 4/8 s and 8/16 s, respectively. Although some differences in temporal performance can occur as a function of the durations tested, our study allows us to identify 8 years as being a key age in the development of the processing of long durations.

There are several developmental trajectories depending on the temporal tasks used, on whether these tasks involve an automatic and implicit processing of time (time conditioning, expectation of an incoming stimulus) or a controlled and explicit processing of time, as in most tasks used in adults and verbal children (Droit-Volet & Coull, 2016; Coull & Droit-Volet, 2018). The originality of our study, which used this latter type of task, is to have succeeded in identifying a developmental threshold in time sensitivity as of which no further changes are observed, thus indicating the attainment of maturity in timing abilities. This age is 6 years for short durations and 8 years for long durations. These key ages can obviously change as a function of the task used, probably being later for the more difficult temporal generalization

task or temporal reproduction and production task. These ages in temporal bisection therefore represent an age-standard (age-norm) in the development of time skills, making it possible to detect dysfunctions in timing in children, i.e., a developmental delay in the emergence of time skills. Detecting such delays in the development of time skills at an early age makes it possible to provide specific therapeutic care for children. A series of new developmental studies has attributed the developmental changes in time abilities to concurrent age-related development in attention and working memory capacities, as assessed by neuropsychological tests (e.g., Droit-Volet & Zélanti, 2013; Droit-Volet & Hallez, 2018; Hallez & Droit-Volet, 2017, 2019; Zélanti & Droit-Volet, 2011; 2012). Timing skills and attention and working memory abilities are indeed closely connected. Nevertheless, Rammsayer and his colleagues showed that performance in explicit timing tasks is a better predictor of intelligence than performance on other subtests that focus more on attention and working memory (Troche & Rammsayer, 2009; Rammsayer & Brandler, 2007). Increasing numbers of studies are suggesting that time processing is a primary function that explains cognitive disorders such as dyslexia or schizophrenia (Casini, Pech-Georgel, & Ziegler, 2018). This can easily be understood since time processing involves a large neural network that is distributed in the brain and is based on the functioning of synchronized neural oscillators. Therefore, the early detection of time deficits by means of the bisection task can permit early remedial treatment, thus promoting a rapid improvement in time and cognitive capacities during a critical period of development which is characterized by its high plasticity.

I – 2. Etude de la contraction temporelle causée par une double-tâche en situation de reproduction temporelle chez des enfants âgés de 5 à 7 ans et chez les adultes.

Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2017). High levels of time contraction in young children in dual tasks are related to their limited attention capacities. *Journal of Experimental Child Psychology, 161*, 148-160.

Introduction

During recent decades, many researchers have spent much time demonstrating that humans, like all animals, possess an internal clock system that allows them to accurately measure time. However, humans often experience a dilatation or a contraction of time, with time being judged longer or shorter than it really is. Among the factors responsible for these time distortions, one can mention the attention allocated to the processing of time (Nobre & Coull, 2010). Time is indeed judged shorter when our attention is distracted away from the passage of time.

The contraction of time as a function of attention has been widely studied in human adults by means of the dual-task paradigm (for a meta-analysis, see Block, Hancock, & Zakay, 2010). In the dual-task paradigm, participants need to judge the duration of a stimulus while they perform a secondary non-temporal task. The non-temporal task has taken the form of a memory task (e.g., Champagne & Fortin, 2008; Fortin & Breton, 1995; Fortin, Rousseau, Bourque, & Kirouac, 1993), a Stroop task (Brown & Perreault, 2017; Zakay & Fallach, 1984), and another specific task (e.g., Casini & Macar, 1997, 1999; Coull, 2004; Fortin & Rousseau, 1998; Grondin & Macar, 1992; Hicks, Miller & Kinsbourne, 1976; Kladopoulos, Hemmes, & Brown, 2004; Macar, Grondin, & Casini, 1994). Whatever the non-temporal task used, the results systematically show that the stimulus duration is judged shorter in the dual-task than in the simple task when participants need only to judge time.

The resource-based theory of time perception suggests that this is linked to the processing of temporal information, which is a demanding cognitive task that consumes limited attention resources (Block et al., 2010; Brown, 1997; Thomas & Weaver, 1975; Zakay, 1989, 1992, 1993). According to the internal clock models (Gibbon, 1977; Gibbon, Church, & Meck, 1984; Treisman, 1963), the raw material for the representation of time consists of a number of pulses that are emitted by a pacemaker and transferred into an accumulator via an attention-controlled switch that closes at the beginning and opens at the end of the stimulus to be timed. Temporal shortening, thus, would result from a loss of temporal units (pulses) that underlie the representation of time. Lejeune (1998) explained this loss of pulses in terms of an attentional switch that would close early when the participant needs to perform a second task and/or would flicker more often between the onset and offset positions. This latter proposal is consistent with the idea of a succession of alternating attention phases between the non-temporal and temporal tasks. However, this explanation in terms of an “all-or-nothing” switch mechanism does not

take into account the performance in a dual task when there is a continuous “sharing” of attention resources between two tasks rather than “a single excursion away from the timing of a duration while a non-temporal task is carried out” (Wearden, 2016, p. 90). Indeed, the judgment of time in a dual task also depends on the degree of attention allocated to temporal information. Thus, in their attentional gate model, Zakay and Block (1996, 1998) extended the clock system to include an attentional gate that controls the quantity of attentional resources allocated to time processing. The opening of the attentional gate, thus, would be smaller in the dual-task condition than in the single-temporal-task condition, thereby limiting the number of pulses passing into the accumulator.

Regardless of the way in which these authors conceive of attention (e.g., switch, gate), all of them consider that the time contraction in the dual task would occur at an early stage of temporal processing, namely during the online accumulation of pulses. However, other authors place the source of this time distortion at a later stage, at the level of memory, when temporal information (pulses) is maintained, or rehearsed, in short-term memory in order to make temporal decisions or temporal predictions (for discussions, see Fortin & Schweickert, 2016; Ivry & Schlerf, 2008; Taatgen, Van Rijn, & Anderson, 2007). For example, Fortin et al. (1993) showed that the accuracy of temporal reproduction decreased as the short-term memory requirements of concurrent tasks increased, and they concluded that the interference of the non-temporal task on temporal processing “may not be a matter of non-specific general purpose attentional resources, but rather of concurrent short-term memory processing demands” (p. 536). Several studies have indeed found a shortening of estimated durations as the retention interval in memory increases (e.g., Church, 1980; Rattat & Droit-Volet, 2010; Grant & Spetch, 1993). This is also explained by a loss of pulses during the retention interval (Spetch & Wilkie, 1983).

In sum, the contraction of time may be due to specific attentional control processes that limit the amount of pulses entering the accumulator (accumulation process per se), to memory processes that erode the amount of already accumulated pulses, or to both. The aim of our study was to investigate this question by testing children in an age range between 5 and 7 years in which there are considerable inter-individual differences in attention and memory capacities (Gathercole, 1998; Gathercole, 2002). The aim was to examine which is the best predictor (attention, memory, or processing speed) of individual differences in the shortening effect in a dual-task paradigm during childhood.

Surprisingly enough, only three studies on time judgment have tested typically developing children in a dual-task paradigm (Arlin, 1986; Gautier & Droit-Volet, 2002; Rattat, 2010), and none has investigated the link between children's temporal performance in this paradigm and their individual cognitive capacities. In Arlin's (1986) study, children aged 6–12 years were asked to reproduce the duration of tones (2, 10, and 5 s) while they performed a second non-temporal task such as naming a series of pictures. In Gautier and Droit-Volet (2002) and Rattat's (2010) studies, younger children (5–8 years) were asked to reproduce a visual stimulus of 6 or 12 s with different interfering tasks: picture naming, sound discrimination, digit and visuospatial memory tasks. In all of these studies, the reproduction of the duration was always shorter in the dual task than in the single task, a finding that is consistent with the shortening effect found in adults. However, and more interesting, this shortening effect was greater in 5-year-olds than in the older children (8 years). Thus, the authors concluded that this developmental effect in the contraction of time in a dual-task is due to attentional capacities, which are more limited in the youngest children. It is indeed well established that the total quantity of mental resources available to process a given task increases as children grow older (Dempster & Brainerd, 1995; Towse, Hitch, & Horton, 2007). However, the direct link between attentional capacities and the magnitude of the shortening effect has not yet been demonstrated in children because their individual attention levels have not been measured. Furthermore, the greater shortening in young children may be related to their low ability to retain temporal information in short-term memory.

Numerous neuropsychological tests have been validated in children to assess their cognitive capacities. These have been widely used for clinical purposes but also to examine the relationships between individual cognitive differences and performance in different tasks (Muris, Mayer, van Lint, Hofman, 2008; Savage, Cornish, Manly, & Hollis, 2006), including simple temporal tasks (e.g., Droit-Volet, Wearden, & Zélanti, 2015; Droit-Volet & Zélanti, 2013a, 2013b; Ogden, Wearden, & Montgomery, 2014; Rammsayer & Brandler, 2007; Ulbrich, Churan, Fink, & Wittmann, 2007; Zélanti & Droit-Volet, 2011, 2012). Among these tests, some are used to measure the short-term memory span (i.e., Corsi block-tapping test) that accounts for the ability to keep information active in memory until the task is completed (Corsi, 1972). Others focus more on attention control capacities. The Test of Everyday Attention for Children (TEA-Ch) is composed of a series of subtests that provide an objective measure of available attentional resources (Manly, Robertson, Anderson, & Nimmo-Smith, 1999). Among these subtests, the “Sky search” test was designed to measure selective attention capacities, whereas

the “Listen to two things at once” test measures divided and sustained attention. The aim of our study, thus, was to examine the reproduction of stimulus durations (6 and 12 s) in a dual-task paradigm in children aged 5–7 years. We also used different neuropsychological tests to assess their attentional capacities (selective attention and divided attention) as well as their short-term and working memory capacities. A processing speed index was also calculated. Indeed, the faster the information is processed, the greater the number of time units that can be treated and the smaller the shortening effect will be (Droit-Volet & Zélanti, 2013a). In addition, the faster the information is processed, the lower the interference effects are (Vernon, 1987). Our assumptions, therefore, were that the time estimates should be shorter and more variable in the dual-task than in the single task, especially in the case of the youngest children. According to the resource-based theory of time perception, the extent of the shortening effect should be significantly related to individual capacities of attention rather than to those of short-term memory, although all increase with age.

Method

Participants

A total of 57 children aged 5–7 years took part in this experiment: 25 5-year-olds (11 girls and 14 boys; $M_{\text{age}} = 5.44$ years, $SD = 0.24$), 15 6-year-olds (5 girls and 10 boys; $M_{\text{age}} = 6.48$ years, $SD = 0.36$), and 17 7-year-olds (7 girls and 10 boys; $M_{\text{age}} = 7.68$ years, $SD = 0.31$). The 5-year-olds were recruited from a kindergarten (Philippe Arbos school, Clermont-Ferrand), and the 6- and 7-year-olds were recruited from an elementary school (Félix Thonat school, Cournon), all in the Auvergne region of France. The children’s parents signed written informed consent for participation in this study. The study was carried out according to the principles of the Helsinki Declaration and was approved by both the inspector of the academy of the French National Education Ministry and the Clermont-Ferrand Sud-Est VI Statutory Ethics Committee (Comité de Protection des Personnes [CPP], Sud-Est VI, France).

Materials

In a quiet neutral room, the children sat in front a computer that controlled the experimental event and recorded the responses using E-Prime 2.1 software (Psychology Software Tools, Pittsburgh, PA, USA). For the temporal reproduction task, the children’s responses were presses on the computer mouse. For the non-temporal task, children gave their responses aloud and the experimenter pressed on the corresponding button on the computer

keyboard. In the non-temporal task (color discrimination task), small blue squares (4 cm) of two different colors (light blue and dark blue) were displayed at the center of the computer screen on a black background, each presented for a duration of 200 ms. In the temporal task, the stimulus to be timed was a larger blue square with 15-cm sides that was also presented at the center of the computer screen on a black background. In the dual task, a sequence of different small squares (those used in the non-temporal task) was presented in the large square to be timed.

Procedure

Temporal and non-temporal tasks: Each child performed three successive tasks: a simple non-temporal task, a simple temporal task, and a dual task. Each of these tasks was preceded by six learning trials consisting of three demonstrations and three training trials. After an inter-trial interval randomly selected between 500 and 1000 ms, each trial began with the word “ready”. When the child was genuinely ready, the experimenter pressed the spacebar that triggered the stimulus presentation after a fixed time of 250 ms. In the non-temporal task, the child was given 16 random trials, with one square per trial (i.e., 8 light blue squares and 8 dark blue squares). The child needed to say whether the blue color of each small square was “light” or “dark” (color discrimination task). In the simple temporal task, the child saw the large blue square that was presented for 6 or 12 s. This stimulus then reappeared, and the child needed to produce a press response when he or she judged that the duration of this second stimulus was similar to that of the first one. The child was given 16 trials, 8 trials for each duration, presented in a random order. In the dual-task, the child needed to simultaneously perform the temporal task with the large blue square and the non-temporal task with the small squares of different colors presented inside the large square. There were 16 random trials: 8 trials for the 6-s duration with a sequence of 3 different small squares and 8 trials for the 12-s duration with a sequence of 6 different small squares. The presentation duration of each small square was 200 ms, with an inter-squares interval randomly taken from a temporal window from 500 to 1300 ms. The first small square of the sequence was presented 500 ms after the onset of the large square to be timed. The order of the small squares of different colors was randomized. In this dual task, therefore, the child needed to estimate the presentation duration of the large square while saying the color (light vs. dark) of each small square in the sequence. The large square then reappeared, but without the small squares, and the child pressed when its duration was judged to be similar to the first one.

Neuropsychological tests: Each child was given five neuropsychological tests. The order of presentation was random. The first test used to assess short-term memory and working memory was the Corsi block-tapping test (Corsi, 1972). This test consists of repeating immediately in forward order (short-term memory) and backward order (working memory) the block-tapping sequence presented by the experimenter. There were 8 block-tapping sequences going from 2 to 9 blocks, with two trials per block sequence. The test was halted when the child failed on two trials in the same block sequence. To measure an index of information processing speed, the child also performed two subtests of the Wechsler Intelligence Scale for Children: “Code A” and “Symbol A” (Wechsler, 2005). In the first test, the child was initially presented with 5 figures, each of which was associated with a specific code. The child then drew the right code for a series of 64 figures in a given time of 120 s. In the second test, also limited in time (120 s), the child was presented with 45 symbols and needed to judge whether or not each of them was present in a series of 5 different symbols. The last two tests were subtests of the TEA-Ch (Manly et al., 1999). The first test, called “Listen to two things at once,” measures divided and sustained attention; the second test, called “Sky search,” measures selective attention. In the first test, the child needed to simultaneously address two distinct sources of relevant stimuli; the child needed to simultaneously listen to a series of stories in order to recall the names of the animals cited in each story and to count the number of shots that occur randomly during each story. In the second test, the child was presented with a sheet containing 130 pairs of spaceships consisting of five different types. The child’s task was to circle all pairs of identical spaceships as quickly as possible.

Results

Temporal performance

Preliminary statistical analysis led us to exclude 6 children (3 5-year-olds and 3 7-year-olds) from the subsequent statistical analyses because their mean temporal reproduction was outside of the ± 3 standard deviations range, although their inclusion did not change the results. Figure 34 shows the mean durations reproduced by the other children aged 5, 6, and 7 years for the target durations of 6 and 12 s in both the simple temporal task and the dual task. An analysis of variance (ANOVA) was performed on this measure with two within-participants factors (duration vs. task) and one between-participants factor (age). This ANOVA¹ showed a main effect of duration, $F(1, 50) = 55.54, p = .0001, \eta^2_p = .54, (1 - \beta) = 1.0$, indicating that the

children reproduced shorter durations for 6 s than for 12 s, although the 6-s duration tended to be overestimated and the 12-s duration tended to be underestimated (see Discussion). The main effect of age did not reach significance, $F(2, 50) = 1.86, p = .17$, and neither did the Duration Age interaction, $F(2, 50) = 1.42, p = .25$. This suggests that age per se did not explain differences in temporal reproductions.

More interesting, a significant effect of the task was obtained, $F(1, 50) = 70.23, p = .0001, \eta^2_p = .59, (1 - \beta) = 1.0$, with the reproduced durations being shorter in the dual-task than in the simple task. This finding is consistent with a time contraction effect in the dual task. Moreover, the Task Duration interaction was significant, $F(2, 50) = 12.94, p = .001, \eta^2_p = .21, (1 - \beta) = .94$, indicating that the time contraction in the dual-task compared with the simple task was greater for the longer stimulus duration. There was also a significant Task Age interaction, $F(2, 50) = 4.15, p = .022, \eta^2_p = .15, (1 - \beta) = .71$. The three-way Age Task Duration interaction was not significant, $F(2, 50) = 0.51, p = .60$. When we calculated the difference in reproduced durations between the dual task and the simple task, we found that the magnitude of this difference was higher in the 5-year-olds ($M = 9949$ ms) than in the 7-year-olds ($M = 5689$ ms), $t(36) = 2.33, p = .026$. No difference was found between these two ages and the intermediate age of 6 years ($M = 9874$ ms), $t(35) = 0.025, p = .98$ and $t(29) = 1.34, p = .20$, respectively.

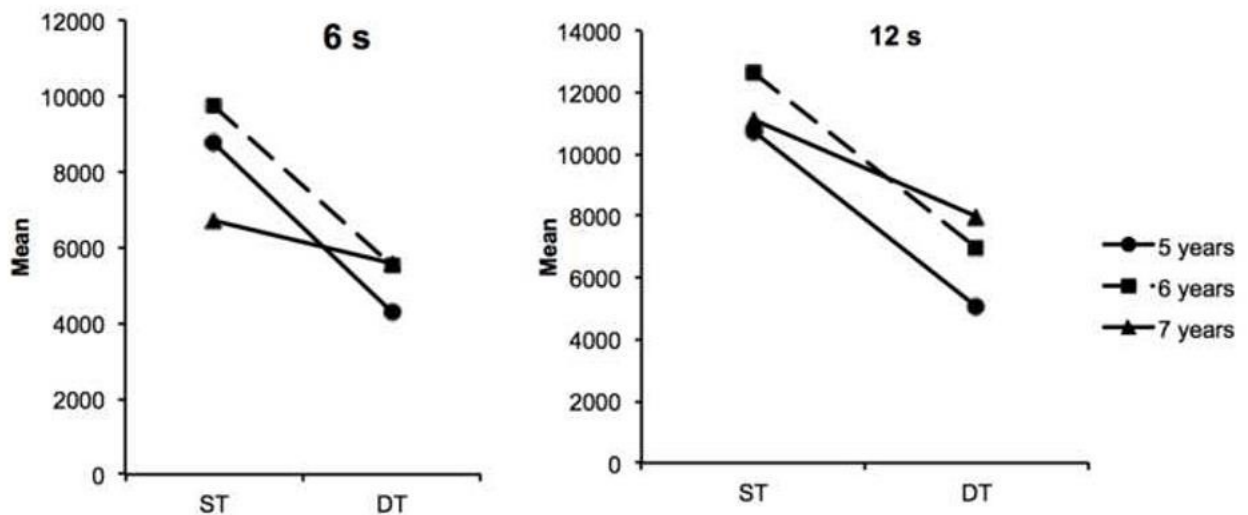


Figure 34. Mean reproduced durations in children aged 5, 6, and 7 years for the simple task (ST) and the dual task (DT) for the 6-s and 12-s target durations.

The same ANOVA was performed on the standard deviation of reproduced durations (Figure 35). Significant main effects of duration, $F(1, 50) = 17.63, p = .0001, \eta^2_p = .27, (1 - \beta) = .98$, and age, $F(2, 50) = 7.88, p = .001, \eta^2_p = .25, (1 - \beta) = .94$, were found. Consequently, the reproduced duration was more variable for the 12-s duration than for the 6-s duration, especially among the young children. Furthermore, there was no main effect of task, $F(1, 50) = 4.00, p = .051$, Task Age interaction, $F(2, 50) = 0.622, p = .54$, Task Duration interaction, $F(1, 50) = 0.054, p = .82$, or Time Task Age interaction, $F(2, 50) = 0.13, p = .88$. In summary, although the variability of temporal reproductions was higher in the younger children and for the longer duration, the task did not affect the variability of temporal reproductions.

Correlations between the single-/dual-task difference in reproduced durations and cognitive abilities

Table 2 shows the raw scores for the different neuropsychological tests. An analysis of covariance (ANCOVA) was initially performed on these neuropsychological scores, with the child's age in months taken as a covariate. The statistical results systematically showed a significant age effect: short-term memory, $F(1, 50) = 14.88, p = .0001, \eta^2_p = .23, (1 - \beta) = .97$; working memory, $F(1, 50) = 26.23, p = .0001, \eta^2_p = .35, (1 - \beta) = .99$; processing speed, $F(1, 50) = 18.52, p = .0001, \eta^2_p = .27, (1 - \beta) = .99$; selective attention, $F(1, 50) = 36.83, p = .0001, \eta^2_p = .43, (1 - \beta) = 1.0$; divided attention, $F(1, 50) = 53.83, p = .0001, \eta^2_p = .53, (1 - \beta) = 1.0$. In summary, the older the children were, the higher their scores on the different neuropsychological tests were.

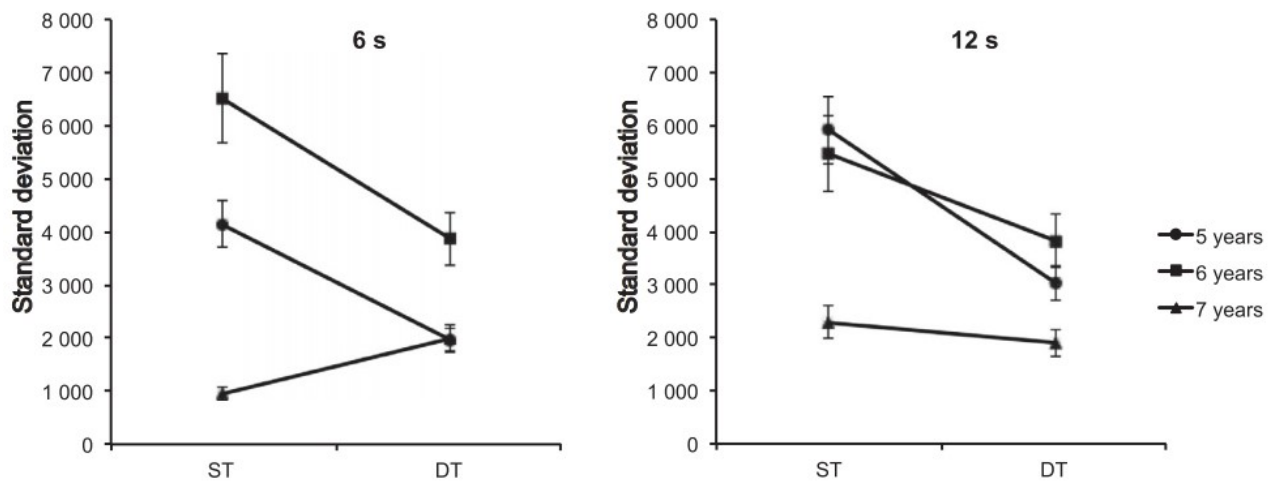


Figure 35. Standard deviations of reproduced durations in children aged 5, 6, and 7 years for the simple task (ST) and the dual task (DT) for the 6-s and 12-s target durations.

Table 2. Means, standard deviations, and minimums and maximums of raw scores for different neuropsychological tests.

	5 years			6 years			7 years		
	M	SD	[Min; Max]	M	SD	[Min; Max]	M	SD	[Min; Max]
Short-term memory	4.18	1.56	[2; 8]	5.40	1.72	[3; 10]	6.57	2.03	[4; 12]
Working memory	2.68	2.06	[0; 9]	4.73	1.58	[2; 8]	6.21	1.18	[4; 8]
Processing speed	49.23	18.10	[26; 102]	75.13	14.16	[47; 100]	76.14	14.67	[50; 96]
Selective attention	42.48	20.81	[14; 87]	17.56	10.31	[8; 50]	12.86	4.07	[7; 22]
Divided attention	6.33	3.44	[1; 11]	9.47	2.92	[4; 14]	13.71	2.78	[10; 19]

Table 3 shows the correlations between the scores of the different neuropsychological tests. This table shows a high level of correlation between the different neuropsychological scores (all $ps < .01$), although the correlation was lower between the short-term memory scores and the attention-related scores (selective and divided attention), with a non-significant correlation between short-term memory and divided attention ($r = .25, p > .05$).

We then calculated the differences in temporal reproduction between the simple task and the dual task for each participant and each stimulus duration (6 or 12 s). A preliminary statistical test of collinearity was performed to test the reproduction-related multicollinearity among our five variables. Tolerance was greater than .10, and the variance inflation factor obtained was less than 10 for each of our variables, indicating that multicollinearity was not a concern (selective attention scores: tolerance = .47, $VIF = 2.14$; divided attention scores: tolerance = .72, $VIF = 1.38$; processing speed scores: tolerance = .48, $VIF = 2.07$; working memory scores: tolerance = .32, $VIF = 3.14$; short-term memory scores: tolerance = .48, $VIF =$

2.08). A correlation analysis was then run among the difference index (6 and 12 s), age, and scores on the different neuropsychological tests (Table 4). Although most of the neuropsychological scores correlated, for the 6-s duration there was a significant correlation only between the single-/dual-task difference and the attention scores (divided attention: $r = .31, p = .031$; selective attention: $r = .31, p = .026$). The correlations with the age and memory scores did not reach significance, $p > .05$. Similarly, for the 12-s duration, the only significant correlation was between the single-/dual-task difference and the attention scores, in particular the selective attention score ($r = .45, p = .002$), given that the correlation with divided attention did not reach significance ($r = .22, p = .13$). Finally, when we averaged the two stimulus durations together, we found a significant correlation only between this overall temporal difference index and the scores on the two attention tests (divided attention: $r = .28, p = .047$; selective attention: $r = .40, p = .004$).

Table 3. *Correlation matrix between age and the raw scores of neuropsychological test.*

	1	2	3	4	5
1. Age in months	1				
2. Short-term memory	.48**	1			
3. Working memory	.59**	.71**	1		
4. Processing speed	.52**	.51**	.61**	1	
5. Selective attention	-.66**	-.42**	-.65**	-.62**	1
6. Divided attention	.73**	.25	.41**	.44**	-.50**

** Correlation significant at .01 level.

Table 4. *Correlations between simple-/dual-task differences in reproduction durations, ages, and scores on neuropsychological tests.*

	6-s Difference	12-s Difference	Overall
Age	-.21	-.13	-.18
Short-term memory	.11	.05	.08
Working memory	-.12	-.09	-.11
Processing speed	-.12	-.14	-.14
Selective attention	.31*	.42*	.40*
Divided attention	-.31*	-.22	-.28*

* $p < .05$.

When we ran a simple linear regression on this overall single-/dual-task temporal difference index with age as a factor, the model was not significant, $F(1, 50) = 2.17, p = .15$ ($B = 1991.04, SE = 1351.35, \beta = .206, R^2 = .042$). However, when we extended our model to include the scores on the two tests of attention in addition to age, the model became significant, $F(3, 48) = 3.70, p = .018$. The age variable became even less significant ($B = 2373.12, SE = 2074.56, \beta = .243, p = .26, R^2 = .043$), whereas the model explained more variance. In this

current model, selective attention reached significance ($B = 181.28$, $SE = 70.75$, $\beta = .445$, $p = .014$, $R^2 = .19$), whereas divided attention did not ($B = 437.96$, $SE = 352.42$, $\beta = .233$, $p = .22$, $R^2 = .08$).

We then ran a hierarchical regression on the overall single-/dual-task differences, including the scores on the two attention tests (selective and divided attention), to identify which component of attention was the best predictor of time contraction in the dual task. The results revealed a greater effect of selective attention ($B = 142.61$, $SE = 62.36$, $\beta = .350$, $R^2 = .17$, $p = .027$), whereas the effect of divided attention was no longer significant ($B = 204.12$, $SE = 288.02$, $\beta = .108$, $R^2 = .08$, $p = .48$). In other words, the selective attention capacities explained the largest part of the variance in the shortening of time between the simple task and the dual-task.

Finally, we compared the correlation obtained between the selective attention scores and the overall single-/dual-task difference ($r = .40$, $p = .04$) as well as between the divided attention scores and the overall single-/dual-task difference ($r = .28$, $p = .47$). It appears that the correlations were significantly different from each other, $t(51) = 3.05$, $p < .01$, thereby confirming that the link between the magnitude of time contraction and selective attention capacities was the strongest.

Non-temporal performance

A first ANOVA was performed on the correct response rate in the dual task, with one within-participants factor (duration) and one between-participants factor (age) (Figure 36). There was neither an effect of duration, $F(1, 50) = 0.80$, $p = .38$, nor an Age Duration interaction, $F(2, 50) = 0.23$, $p = .80$. However, the effect of age was significant, $F(1, 56) = 7.92$, $p = .001$, $\eta^2_p = .25$, $(1 - \beta) = .94$. Therefore, the duration of stimulus presentation did not affect performance in the non-temporal task.

A second ANOVA was performed on the correct response rate, with task as a within-participants factor (simple vs. dual task) and age as a between-participants factor. The results again revealed a significant effect of age, $F(2, 50) = 8.53$, $p = .001$, $\eta^2_p = .26$, $(1 - \beta) = .96$, suggesting that younger children make more mistakes than older children independently of the task. More interesting, however, the effect of task now also reached significance, $F(1, 50) = 11.48$, $p = .001$, $\eta^2_p = .19$, $(1 - \beta) = .91$. Thus, the children made more mistakes in the dual task than in the simple task. However, there was no significant interaction between age and task,

$F(2, 50) = 2.21, p = .12$. When we calculated the difference in the total correct responses between the simple task and the dual task, we found that the magnitude of this difference was higher in the 5-year-olds ($M = 4.09$) than in the 7-year-olds ($M = 0.93$), $t(36) = 3.53, p = .002$. We also found a difference between the 5-year-olds and the 6-year-olds ($M = 1.07$), $t(35) = 3.24, p = .003$. However, no significant differences were found between the 7-year-olds and the 6-year-olds, $t(29) = 0.29, p = .775$.

Correlations between the single-/dual-task difference in non-temporal performance and cognitive abilities

A correlation analysis was carried out among the difference index calculated above, age, and the scores on the different neuropsychological tests. Unlike for time judgment, the single-/dual-task difference in the non-temporal task was significantly correlated not only with age ($r = .39, p = .01$) but also with all of the neuropsychological scores, that is, both those for memory (short-term memory: $r = .36, p = .01$; working memory: $r = .41, p = .003$) and those for attention (divided attention: $r = .46$; selective attention: $r = .49$; all $ps < .001$). There was also a significant correlation with processing speed ($r = .60, p = .0001$). A hierarchical analysis of regression on this single-/dual-task difference index with the different scores in the neuropsychological tests was then run. This regression showed a significant result for the processing speed scores ($B = .434, SE = .03, p = .01$), indicating that an increase of 1 point in correct responses caused an increase of 0.432 point in the processing speed score. The effect of divided attention was also significant ($B = .345, SE = .124, p = .047$). No other variables reached significance (i.e., age, working memory, short-term memory, and selective attention, all $ps > .05$).

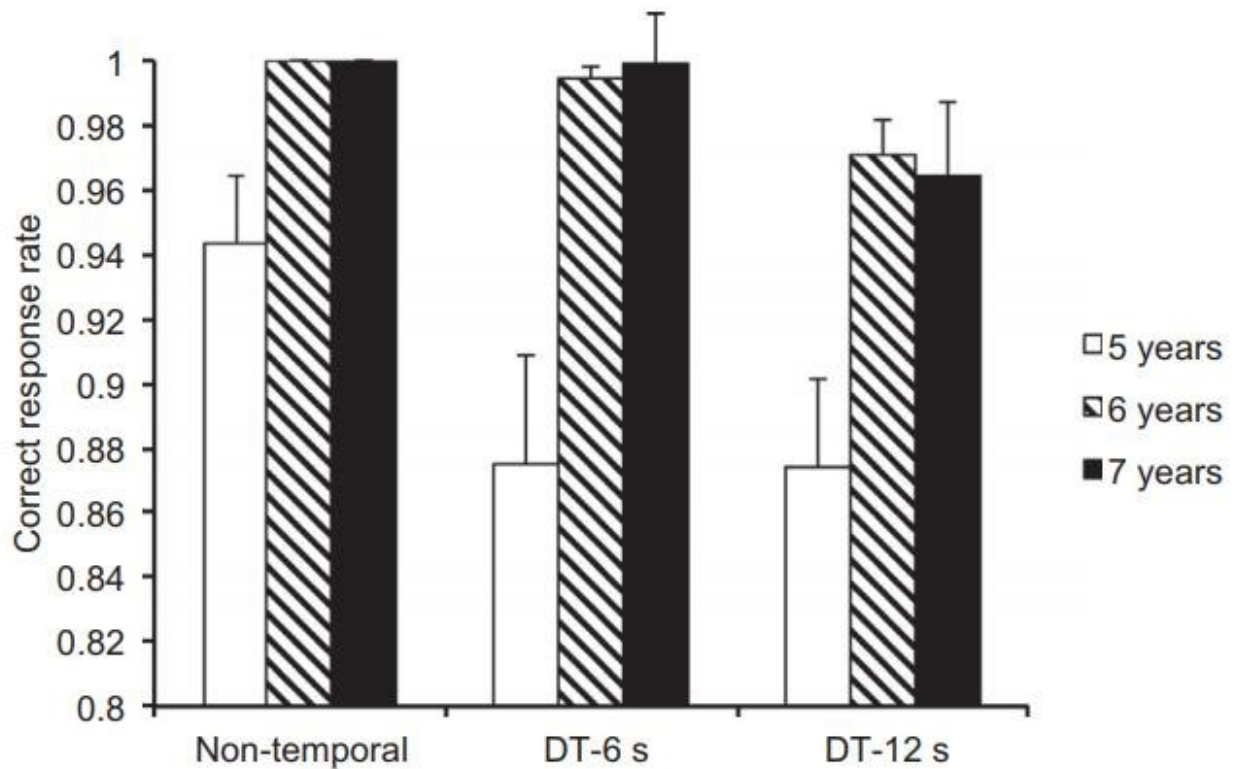


Figure 36. Correct response rates in the non-temporal task for the single task and dual task (DT) when the stimulus durations were 6 s and 12 s in children aged 5, 6, and 7 years.

Finally, we ran a last hierarchical regression to examine whether selective and divided attention scores were still significant predictors of the single-/dual-task difference in the time estimates when the non-temporal results were included in the model. The selective attention always tended to be significant ($B = 126.67$, $SE = 65.17$, $\beta = .311$, $R^2 = .16$, $p = .05$), whereas the other variables were not significant (for divided attention: $B = 113.45$, $SE = 307.17$, $\beta = .06$, $R^2 = .08$, $p = .71$; for correct response rate in non-temporal task: $B = 354.14$, $SE = 408.82$, $\beta = .138$, $R^2 = .09$, $p = .39$). This suggests that the selective attention capacities remained the main factor explaining the individual differences in time contraction in a dual task and not the level of performance on the secondary non-temporal task.

Discussion

Children aged 5–7 years were given a temporal reproduction task in a simple-task condition and a dual-task condition involving a non-temporal color discrimination task. In the simple temporal task, the children tended to overestimate the shortest stimulus duration (6 s) and tended to underestimate the longest stimulus duration (12 s), as predicted by Vierordt's

(1868) law for adults. According to this law, the shortest durations are reproduced longer and the longest durations are reproduced shorter than they actually are (Lejeune & Wearden, 2009). However, our results suggest that there is a greater temporal bias in the younger children, at least for the shortest duration. A similar temporal bias has been observed in other studies in children (Droit-Volet, 2010; Droit-Volet et al., 2015). This has generally been explained in terms of the effect on temporal reproduction of the slower initiation of the motor response in young children. However, this did not affect the interference effect observed in our dual-task paradigm, showing that a concurrent non-temporal task produced a shortening of reproduced time in children similar to that observed in adults (Brown & Perreault, 2017). However, the interest of our study was to show that this time contraction in the dual-task was greater in the youngest children and decreased with increasing age. In addition, our results demonstrated that the age-related decrease in the shortening effect was specifically related to the improvement of individual attention capacities; the more limited the attentional capacities, the shorter the reproduced time was. In sum, our study demonstrated that the contraction of time in the dual-task depends directly on the individual attentional resources available for the processing of time. Thus, it provides support for the resource-based theory of time perception according to which the representation of time depends on attentional resources allocated to time (Block et al., 2010; Brown, 1997; Thomas & Weaver, 1975; Zakay, 1989, 1992, 1993).

Our results also showed a bidirectional effect on performance between the temporal and non-temporal tasks. Indeed, the color discrimination task affected time judgment by shortening reproduced durations, and the judgment of time affected color discrimination by increasing the number of discrimination errors. The mutual interference between these two tasks suggests that common processes exist for the processing of temporal and non-temporal information (Navon & Gopher, 1979). The internal clock models specifically designed to account for timing do not include common mechanisms for the processing of different types of information. According to Baddeley and Hitch's (1974) working memory model, all information is processed via a central administrator with limited capacity that controls and allocates attentional resources to the different types of information to be processed. The processing of temporal and non-temporal information, therefore, could call on the same attentional resource pool managed by this central processor. The shared mechanisms for the processing of both temporal and other information, therefore, would be restricted to general attention mechanisms. This view is consistent with our results showing that both temporal and non-temporal performance in the dual-task condition depended on individual attentional capacities. However, our results revealed that, for time

judgment, the magnitude of the time contraction produced by the secondary task depended only on individual attentional capacities. In contrast, for color judgment, the decrease in non-temporal performance in the dual task was linked not only with attention scores (selective and divided attention) but also with short-term memory, working memory, and processing speed scores. This suggests that the processing of temporal information involves only the central processor, whereas that of non-temporal information (color discrimination) involves other mechanisms, including the visuospatial sketchpad, which is involved in the short-term retention of visual information. This is consistent with the idea that, for long durations (>500 ms), the processing of time does not depend on modality-specific mechanisms and that this one involves a central executive system that manages attentional resources (see Rammsayer, Borter, & Troche, 2015). It is also consistent with the developmental studies showing that the age-related differences in time sensitivity are mainly due to the development of general cognitive capacities in terms of attention and working memory (for reviews, see Droit-Volet, 2013, 2016). Similarly, brain imaging studies have identified the prefrontal cortex as a key brain structure in explicit time judgments, whereas this structure also plays a critical role in executive control functions (e.g., Coull, Cheng, & Meck, 2011).

Some researchers hold that the interference effects on timing are due to “concurrent short-term memory processing demands” rather than to competition for the consumption of attentional resources (for a discussion, see Fortin & Schweickert, 2016). Our results showed that the magnitude of the shortening effect was not linked to individual short-term memory or working memory capacities. In other words, the contraction of time was not higher in the children with low memory capacities, that is, those who found it difficult to actively retain information in memory. Similarly, Fortin and Massé’s (1999) study showed that the amount of non-temporal information maintained in short-term memory did not have a significant effect on concurrent time production. Rather than memory capacities, our study demonstrated that selective attention capacities are the only reliable predictors of individual differences in time contraction in a dual task. Therefore, time contraction is mainly related to children’s difficulties in keeping track of the flow of temporal information in the presence of a secondary task. This provides support for the attention-based theory of time perception according to which a concurrent task operates at the level of the process of accumulation of temporal units (pulses) before their storage in memory (Lejeune, 1998; Rousseau, Picard, & Pitre, 1984; Zakay & Block, 1996). In other words, the concurrent task would lead to a loss of pulses during their accumulation in the timer.

The question raised now is the nature of the mechanism that produces this loss of pulses during the accumulation process. As mentioned in the Introduction, Lejeune (1998) explained time contraction in dual-tasks in terms of the all-or-nothing operation of the switch located between the pacemaker and the accumulator. To account for time contraction in dual-tasks, Zakay and Block (1996) added to this switch system an attentional gate, the size of opening of which controls the amount of pulses transferred into the accumulator. Our results did not allow us to settle the question of the nature of the attentional mechanisms involved in time judgments in a dual-task condition, and further experiments will be necessary. In addition, the effect on time judgment of other concurrent non-temporal tasks, namely those with different types of non-temporal tasks that produce larger differences between age groups, must be examined. Nevertheless, our results revealed that the best predictor of individual differences in time contraction in a dual-task was selective attention, although divided attention also played also a significant role. Selective attention refers to the ability to focus on one item of information while ignoring the rest of the items, whereas divided attention refers to the ability to process two or more items of information simultaneously by allocating a quantity of attentional resources to each item (Pashler & Sutherland, 1998). These two modes of attention are related, with both depending on executive control functions and the maturation of the prefrontal cortex during childhood (Casey, Tottenham, Liston, & Durston, 2005; Sowell et al., 1999; Tsujimoto, 2008). Nevertheless, it is conceivable that the most critical cognitive operation for the perception of time in a dual-task lies in the capacity to control the switch-like system, that is, to close the attentional switch just at the onset of the to-be-timed stimulus and to keep it closed during its presentation. Consequently, children's low capacities in terms of selective attention would produce a malfunction of the switch system that would close later or that would flicker more frequently in a dual-task. This is consistent with the developmental studies showing that time contraction is greater with than without an attention distracter in a reproduction task (Zakay, 1992) and a bisection discrimination task (Gautier & Droit-Volet, 2002).

However, our results suggest that time estimates in a dual-task are also related in part to the development of divided attention capacities (albeit to a lesser extent). This would indicate that the switch system is insufficient to account for time contraction in a dual-task. As argued by Zakay and Block (1996, 1998), a second mechanism is required, a mechanism that manages the quantity of attentional resources devoted to time at any given moment. In another words, the quantity of attentional resources allocated to time processing can differ even if the switch closure duration remains the same. However, there are few studies in adults, and none in

children, that have gathered data allowing us to specifically validate the existence of a gate in the internal clock system. Macar et al. (1994) nevertheless showed that the magnitude of the shortening effect depends on the degree of attention allocated to time by telling adults to allocate a given percentage of their attention to time (e.g., 100%, 75%, 25%, 0%). Thus, future experiments are needed in children to dissociate between the effects related to the switch and the gate in the internal clock system.

In summary, our study examined the direct connection between individual attention capacities and explicit time reproduction in a dual-task paradigm. The results demonstrated that the explicit judgment of time was directly linked to the capacity to allocate attentional resources to time. This provides convincing support for the hypothesis according to which the explicit processing of time involves a general information processor. The issue is now to successfully describe the link between a putative internal clock and general information processing systems.

Footnotes

1. An ANCOVA was also performed with age in month as covariate and found similar results with a significant task x age interaction, $F(1, 56) = 9,62, p = .003$, and a significant age x task x duration, $F(1, 56) = 1.06, p = 0.31$.

I – 3. Etude des différences de contraction temporelle entre une simple et une double-tâche selon que la nature de la tâche concurrente (temporelle vs non-temporelle) chez des enfants âgés de 5 à 8 ans et des adultes.

Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2019). Timing in a dual-task in children and adults : when the interference effect is higher with concurrent non-temporal than temporal information. *Journal of Cognitive Psychology*.

Introduction

In recent decades, the dual-task paradigm has been increasingly used to demonstrate that the processing of time is attentionally demanding (for a review, see Block, Hancock & Zakay, 2010; Brown, 1997; Brown, Collier, & Night, 2013). In a typical dual-task procedure, participants have to perform a temporal task and a non-temporal task simultaneously. Several non-temporal tasks have been examined (e.g. Stroop task, colour discrimination task, memory task). Despite the different natures of the tasks used, the results found have been consistent, systematically showing that the stimulus duration is judged shorter in a dual-task than in single temporal task (e.g. Brown, 1997; Casini & Macar, 1997, 1999; Champagne & Fortin, 2008; Fortin & Breton, 1995; Kladopoulos, Hemmes, & Brown, 2004; Macar, Grondin, & Casini, 1994; Zakay & Fallach, 1984).

Most researchers explain this temporal shortening effect in dual-tasks in terms of attentional models of timing based on the existence of an internal clock system dedicated to the processing of all stimulus durations. According to internal-clock models (Church, 1984; Gibbon, Church, & Meck, 1984; Treisman, 1963), the clock system consists of a pacemaker, an attention-controlled switch and an accumulator. The pacemaker continuously generates pulses (the temporal units). The switch system allows the pulses to transit into the accumulator, and the accumulator counts the amount of pulses associated with the stimulus to be judged. At the onset of this stimulus, the switch connecting the pacemaker to the accumulator closes, allowing the pulses to increment in the accumulator. At its offset, the switch opens, thus interrupting the incrementation process. The number of accumulated pulses therefore gives a subjective measure of the time corresponding to a given duration: The fewer pulses that are accumulated, the shorter time appears to be, and vice-versa.

To attempt to explain the temporal shortening effect observed in dual-tasks, Thomas and his colleagues initially proposed a mathematical model according to which attention is divided between two information processors that operate in parallel: a temporal and a non-temporal processor (Thomas & Brown, 1974; Thomas & Weaver, 1975). The perceived duration is then directly linked to the “weighted average” of the amount of information encoded by these two processors (Block, 1990, p. 9). In other words, the perceived duration simply depends on the amount of attention allocated to temporal information, in the same way as for any other type of information. This model reduces the processing of temporal information to that of any other information. However, temporal information has certain specificities. There is no sensory

organ to capture it and each stimulus (visual or auditory) and each action has its own temporal quality. Consequently, Zakay and Block added an attentional gate to the specific system of temporal information processing (internal clock) (Zakay, 1989; Zakay & Block, 1994, 1996). The opening of the gate would thus depend on the amount of attention allocated to time (Attentional Gate model). In other words, the smaller the amount of attentional resources allocated to time due to a concurrent non-temporal task, the narrower the opening of the gate. Consequently, fewer pulses pass through and time is perceived to be shorter than it actually is. For its part, the switch always functions in an “all-or-nothing” mode, closing and opening at the onset and offset of the relevant stimulus to be timed (Zakay & Block, 1994, p. 175).

A way to further test this Zakay and Block’s attention gate model is to examine temporal performance in a dual-task with children of different ages characterised by different attention capacities (e.g. Droit-Volet & Hallez, 2018; Hallez & Droit-Volet, 2017; Zélanti & Droit-Volet, 2011). Indeed, the few studies conducted in young children on time dual-task paradigm have shown a greater underestimation of time in younger children (Arlin, 1986a, 1986b; Gautier & Droit-Volet, 2002; Zakay, 1992). In addition, Hallez and Droit-Volet (2017) have recently assessed individual attention capacities in children and adults using different neuropsychological tests and showed a direct link between the magnitude of the shortening effect in a dual-task and the available attentional resources, but not to other cognitive capacities such as information processing speed, short-term memory and working memory. Moreover, Hallez and Droit-Volet (2017) not only observed in children that the non-temporal task affected time judgment by shortening reproduced durations, but also that the timing task affected non-temporal judgment by increasing the number of discrimination errors. This is the well-known effect observed in adults called “bidirectional interference” (for a meta-analysis see Brown, 2006). This symmetrical interference would indicate that the two tasks share a common pool of attention resources (Block et al., 2010; Brown, 2006). Since these resources form a continuum, the greater the number of inferences that are made, the more the tasks share common resources (Navon & Gopher, 1979; Wickens, 2002). The aim of our study was thus to further examine the role of developmental differences in terms of attention capacities on the time judgment in a dual-task paradigm by testing this bidirectional effect.

In the dual-task paradigm with a temporal task and a concurrent non-temporal task, both the task (e.g. colour discrimination, name words) and the nature of the information to be processed (non-temporal information) change. It is therefore difficult to identify the source of the greater underestimation of time in young children as it could be due either to the attentional cost

of the concurrent task (dual-tasking cost), or to the specificity of the information to be processed, or both. It has been demonstrated that the nature of the task, along with the underlying level of difficulty, influences the pattern of interference between the temporal and non-temporal task (Boltz, 1998; Brown, 1997, 2010). However, the nature of the information to be processed (temporal vs. non temporal) may also influence this pattern of interference. Therefore, we decided to test this bidirectional attention-related effect in children in a dual task with similar concurrent tasks (discrimination tasks) which, nevertheless, differed in the type of information to be processed: temporal vs. non-temporal information.

To our knowledge, no studies have used the same dual-task paradigm to compare the effect of a concurrent temporal and non-temporal discrimination task. Only a small number of studies have examined multiple timing, i.e. when different stimulus durations are presented simultaneously (Brown & West, 1990; Bryce, Seifried-Dübon & Bratzke, 2015; Cheng, Yang, Han, Ding, & Fan, 2014; Klapproth, 2011; van Rijn & Taagtne, 2008). An increase in variability and a decrease in temporal accuracy were observed in the multiple timing condition compared to the timing of a single duration. However, in these studies, the temporal error varies toward both an over- and an under-estimation of time depending of the task used (Hallez & Droit-Volet, submitted; Brown & West, 1990). In their study, van Rijn and Taatgen (2008) showed that the simultaneous judgment of two partially overlapping durations has no effect on the judgment of the first duration, thus resulting in the absence of a temporal underestimation. They explained this result by suggesting that the processing of two durations is not attentionally costly because participants would use only one master clock to process multiple durations. The flow of pulses would simply be segmented on each new temporal cue. Taking the idea that a single master clock is used to process multiple durations as our starting point, we can assume that, if the temporal underestimation in the dual-task condition is due to the nature of the interfering information to be processed, we should expect to find that the non-temporal task interfere more than the temporal task, i.e. a greater temporal underestimation when the concurrent processing involves non- temporal rather than temporal information, provided that the two tasks are of a similar type (discrimination). In this case, the result with the concurrent temporal dual-task would provide support to recent neuroimaging findings showing that not all dual tasks require additional executive functioning. Indeed, in some cases, moving from a single to a dual task condition only leads to an increase in the magnitude of neural activation of same brain areas (Buchweitz, Keller, Meyler, & Just, 2012). Nevertheless, if the temporal underestimation is only due to the task to be performed (doing something else) and not to the nature *per se* of the

information, we would expect to find that the temporal and the non-temporal task interfere equally, i.e. a systematic underestimation of time, whatever the nature of the information to be processed. However, it is also possible that both the task and the information type play a role in interference effects. In this case, an additional task would systematically generate temporal underestimations, while the nature of the concurrent information would modulate the size of the interference effect.

In the present study, we thus examined the effects on temporal reproduction of a dual-task condition, in which the concurrent task was either a temporal or a non-temporal discrimination task, compared to a single-task condition. The study focused on children aged from 5 to 8 years, as well as adults, because there are great inter-individual differences in terms of attentional resources in this age range which are explained by the development of the prefrontal cortex (Gathercole, 2002; Towse, Hitch, & Horton, 2007). In our study, the individual cognitive capacities (short-term memory, working memory, attention) were thus assessed by means of different neuropsychological tests. We therefore tested, in children and adults, the interference effects on temporal performance in a reproduction task of a discrimination task using either non-temporal (colour discrimination) or temporal information (temporal discrimination). Bidirectional interference was also examined in order to observe the interference effect due to the same temporal task (temporal reproduction) on performance in a discrimination task in which different types of information had to be discriminated, i.e. temporal and non-temporal information.

Method

Participants

The participant sample consisted of 170 participants: thirty-nine 5-year-olds (mean age = 5.51 years, $SD = 0.25$) thirty-three 6-year-olds (mean age = 6.54 years, $SD = 0.33$), fifty-two 7-year-olds (mean age = 7.67 years, $SD = 0.34$), and forty-six adults (mean age = 21.83, $SD = 7.07$). Statistical analysis led us to exclude eleven subjects (one 6- and ten 7-year-olds) (see results). Children were recruited from different nursery and primary schools in the Auvergne region of France. The adults were undergraduate Psychology students at University Clermont Auvergne. The children's parents, as well as the adult subjects, signed written informed consent for their participation in this experiment. This experiment was carried out according to the

principles of the Helsinki declaration and was approved by the research ethical committee IRB-UCA.

Material

In a neutral and quiet room of their school or university, the participants sat in front of a computer that delivered and recorded all the experimental events via E-prime (Psychology Software Tools, Pittsburgh). In the temporal reproduction task, the responses were given on a computer mouse. In the discrimination tasks (the Non-Temporal discrimination task and the Temporal discrimination task), they were given aloud and recorded on the computer by the experimenter. In the temporal reproduction task, the stimulus to be timed was a large blue 15-cm square presented on a black screen (Figure 37). In the non-temporal discrimination task, small squares (4 cm), which were either light or dark blue, were displayed for 200 ms on the computer screen. In the temporal discrimination task, the stimulus was a 6-cm white circle. In the dual-task, these squares were presented in the centre of the large blue square.

Procedure

Tasks: the participants were given two experimental phases. In the first phase, they performed successively two single tasks that were counterbalanced between subjects: a single discrimination task and a single temporal reproduction task. Then, in the second phase, they performed these two tasks simultaneously, i.e. dual-task. In addition, the participants were randomly sorted into two different experimental conditions, as a function of the modality of the discrimination task (temporal vs. non-temporal) (concurrent task condition). In one condition, the participants thus performed the temporal discrimination task, and in the other one the non-temporal discrimination task (Figure 37).

Each task (single and dual task) was preceded by 6 learning trials: 3 demonstration and 3 training trials. Each trial began with the word “ready” after an inter-trial interval randomly selected between 500 and 1000 ms. The experimenter pressed the spacebar to trigger the trial when the participant was ready and the stimulus appeared after a fixed interval of 250 ms. In both discrimination tasks, the participants were given a total of 16 trials. In the single non-temporal discrimination task, they were randomly presented with 8 light blue squares and 8 dark blue squares. Their task was to judge whether the presented square was dark or light. In the temporal discrimination task, they were randomly presented with 8 short stimulus duration (1.5 s) and 8 long stimulus duration squares (3 s). Their task was to judge whether the presented duration was

long or short. In the single temporal reproduction task, the participants were also given 16 trials (randomly presented), i.e. 8 trials for each of 2 different target durations used, i.e. 6 and 12 s. In a comparative perspective, we decided to use these two target durations because they have been employed in other developmental studies using a dual-task paradigm (Gautier & Droit-Volet, 2002; Hallez & Droit-Volet, 2017; Rattat, 2010). In the reproduction task, on each trial, the participants initially saw the target stimulus duration (large square). Then it reappeared and their task was to press the computer mouse when they judged that the duration of the second stimulus was similar to the first one.

In the dual-task, the participants had to perform two tasks simultaneously: the discrimination task (temporal or non-temporal) and the temporal reproduction task. There was no task priority as the participants were instructed to do their best for both tasks. In the dual-task, there were 16 random trials, i.e. 8 trials for the 6-s target duration and 8 trials for the 12-s target duration. In the dual-task with the temporal reproduction and the non-temporal discrimination task, 3 different blue squares, randomly selected among the light and dark squares, were presented during the 6-s target duration, and 6 different squares during the 12-s duration. In the dual task with the temporal reproduction and the temporal discrimination task, 1 white circle, randomly selected from the short and the long duration, was presented during the 6-s target duration and 2 white circles during the 12-s target duration. The moment of appearance of the circle within the square was taken at random from within a temporal window $[0.5 \text{ s}; 6 \text{ s} - \text{Duration of the white circle}]$ ($D = 1.5$ or 3 s). That being so, the white circle was not presented before or after the blue square used for the reproduction task.

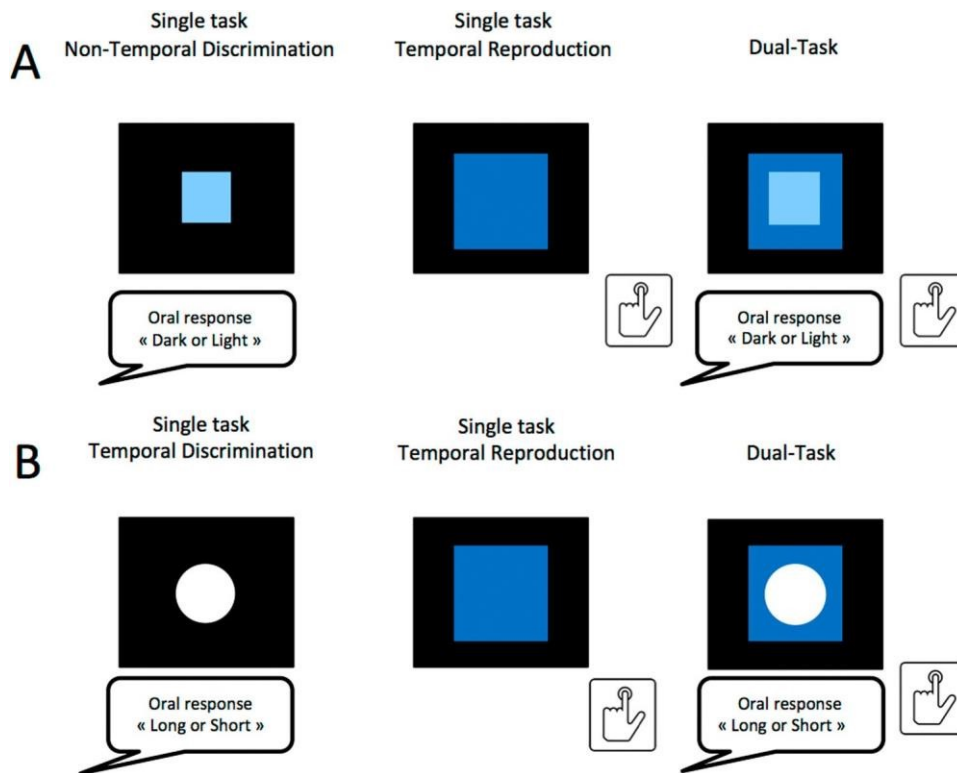


Figure 37. Experimental design used in the two experimental conditions: (A) with the concurrent non-temporal discrimination task used in the dual task, and (B) the concurrent temporal discrimination task used in the dual task. The participants performed two single tasks (counterbalanced between subjects) before the dual task: a discrimination task and a temporal reproduction task.

Neuropsychological tests: the participants performed four neuropsychological tests designed to assess short-term memory, working memory, divided attention and selective attention, the test presentation order being random. The first two tests were subtests of the Corsi Block-Tapping Test (Corsi, 1972). In this test, the experimenter taps blocks in a sequence that the participant has to reproduce immediately in forward (short-term memory) and backward order (working memory). There are a total of 8 block tapping sequences increasing from 2 to 9 blocks, with 2 trials per block sequence. The test is stopped when participant fails on 2 trials of the same sequence. The other two tests were subtests of the TEA-Ch (Test of Everyday Attention of Children, Manly, Robertson, Anderson, & Nimmo-Smith, 1999). In one test, called “listen to two things at once”, the participant has to pay attention simultaneously to two distinct sources of relevant information: name the animal cited in a story, and count the number of laser shots emitted randomly during this story (divided

attention). In the other test, called “Research Sky”, the participant has to circle all pairs of identical space-ships among 130 pairs (selective attention).

Results

Performance in temporal reproduction

The preliminary statistical analysis led us to exclude 11 children (one 6-year-old and ten 7-year-olds) from the subsequent statistical analyses, because either their overall mean temporal reproduction, or their overall non-temporal performance, or their neuropsychological scores were more than 3 *SD* above or below the mean.

Temporal reproduction in single task: In order to verify that the temporal performance was similar between groups (with a temporal or a non-temporal discrimination task in the subsequent dual task), a preliminary ANOVA was performed on the mean reproduced duration for the single temporal reproduction task with a within-subjects factor (stimulus duration) and two between-subjects factors (age, concurrent-task condition). There was neither a significant main effect of the concurrent-task condition, $F(1, 151) = 1.94, p = 0.16$, nor any significant interaction involving this factor (all $p > .05$). The temporal performance in the single reproduction task was therefore similar across the different conditions. There was only a significant main effect of stimulus duration, $F(1, 151) = 213.37, p = 0.0001, \eta^2_p = 0.59$, and a significant age \times stimulus duration interaction, $F(3, 151) = 7.39, p = 0.0001, \eta^2_p = 0.13$, with no main effect of age, $F(3, 151) = 1.12, p = 0.34$. Indeed, the main effect of age was observed for the reproduction of 6 s, $F(3, 155) = 4.33, p = 0.006, \eta^2_p = 0.08$, but not for that of 12 s, $F(3, 155) = 0.45, p = 0.77$. For the 6-s stimulus duration, the temporal reproductions appeared to be more accurate in the adults and the 7-year-olds than in the 5- and the 6-year-olds, who tended to produce longer durations, in line with a temporal overestimation of short durations (Bonferroni, $p < .05$). No difference was observed between the two older age groups ($p > .05$). In contrast, for the longest duration (12-s), the temporal reproductions were similar across the different age groups with a general temporal under-reproduction (temporal underestimation of long durations) (for the same type of performance in the temporal reproduction see Droit-Volet, Wearden, & Zélanti, 2015; Hallez, Damsma, Rhodes, van Rijn, & Droit-Volet, 2018) (Figure 38).

An ANOVA was also conducted on the standard deviation of reproduced duration with

the 3 factors described above. The ANOVA only yielded a significant main effect of age $F(3, 151) = 12.86, p = 0.0001, \eta^2_p = 0.20$ ($M_{5\text{years}} = 4.67, M_{6\text{years}} = 3.33, M_{7\text{years}} = 2.36, M_{\text{adults}} = 1.78$). As confirmed by the significant linear regression, the variability in temporal reproduction decreased with the increase in age in months ($\beta = 0.42, SE = 1.35, p = 0.0001$).

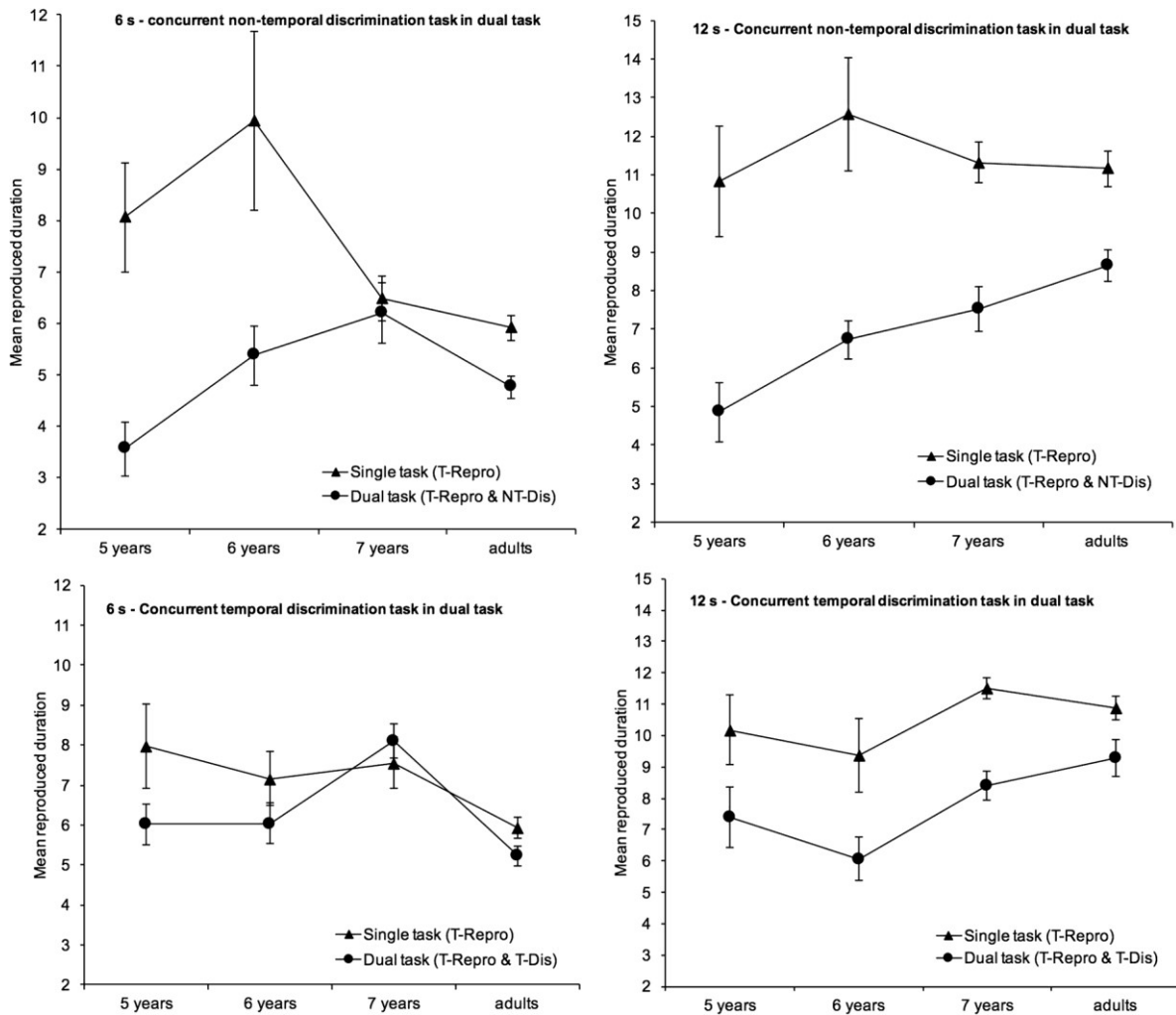


Figure 38. Mean reproduced duration for children aged 5, 6 and 7 years as well as adults in the single task condition and the dual-task condition for the 6-s and 12-s with the concurrent non-temporal discrimination task and the concurrent temporal discrimination task.

Single/dual-task difference:

We calculated the differences in mean reproduced duration between the single task and the dual-task condition for each subject and each stimulus duration. The ANOVA on this index with age, concurrent-task condition and stimulus duration as factors showed a main

effect of stimulus duration, $F(1, 158) = 48.05$, $p = 0.0001$, $\eta^2_p = 0.24$, indicating that the difference in time reproduction between the single and the dual-task condition was greater for the long stimulus duration (12 s) ($M = 3499$ ms) than for the shorter one (6 s) ($M = 1570$ ms). More interestingly, a significant main effect of the concurrent-task condition (concurrent temporal discrimination vs. concurrent non-temporal discrimination) was obtained, $F(1, 158) = 12.87$, $p = 0.0001$, $\eta^2_p = 0.08$, but no other interaction involving this factor (duration \times concurrent-task, $F(1, 158) = 0.001$, duration \times concurrent-task \times age, $F(3, 156) = 0.36$, concurrent task \times age $F(3, 156) = 1.56$, all $ps > 0.10$). This significant results indicates that the shortening effect in the temporal reproduction in the dual task compared to the single task was greater with the non-temporal discrimination task ($M = 6625$ ms) than with the temporal discrimination task ($M = 3452$ ms). This suggests that the attentional effect of the concurrent task on time judgment is greater when the concurrent task is non-temporal rather than temporal.

The effect of age also reached significance, $F(2, 157) = 6.26$, $p = 0.0001$, $\eta^2_p = 0.11$. This significant effect indicates that the concurrent discrimination task interfered more with temporal reproduction in the 5- and the 6-year-olds than in the 7-year-olds ($t(79) = 3.23$, $p = 0.002$; $t(72) = 2.11$, $p = 0.04$, respectively), and the adults ($t(83) = 3.64$, $p = 0.0001$; $t(76) = 2.41$, $p = 0.02$), whatever the modality (temporal or non-temporal) of the discrimination task. No difference was found between the two younger age groups (5 years vs. 6 years, $t(69) = 0.43$, $p = 0.67$) or between the two older age groups (7 years vs. adults, $t(86) = 0.48$, $p = 0.63$).

The ANOVA on the difference in the standard deviation of reproduced duration between the single and the dual-task condition did not show any significant results involving the concurrent-task condition (e.g. concurrent-task, $F(1, 151) = 0.36$, concurrent-task \times age $F(3, 151) = 1.20$, concurrent-task \times duration, $F(1, 151) = 0.68$, concurrent-task \times age \times duration, $F(3, 151) = 0.07$, all $ps > .10$). There was only a general effect of age, $F(3, 151) = 2.79$, $p = 0.04$, $\eta^2_p = 0.05$, which showed that the magnitude of the difference in temporal variability between the single and the dual-task was greater in the 5-year-olds than in the other participants (Bonferroni, $p < .05$), although no significant difference was observed between the 5- and the 6-year-olds. In sum, unlike in the case of temporal accuracy, the modality of the concurrent-task in the dual-task (temporal vs. non-temporal) did not affect the variability in time estimates, with the variability in temporal reproduction always being greater in the single than in the dual-task

condition (2.97 vs. 2.39, $t(158)=2.80, p=0.006$). This is probably due to the fact that temporal reproduction was shorter in the dual-task than in the single task condition.

Correlations between the single/dual- task difference in reproduced durations and cognitive abilities

Table 5 shows the mean score obtained by the participants on the different neuropsychological tests used. A series of ANOVAs was performed on these scores with the age in months taken as a covariate. The effect of age was significant for all the neuropsychological tests: short-term memory, $F(1, 155) = 64.03, p = 0.0001, \eta^2_p = 0.29$; working memory, $F(1, 155) = 95.22, p = 0.0001, \eta^2_p = 0.39$; divided attention, $F(1, 155)=120.64, p=0.0001, \eta^2_p = 0.44$; selective attention, $F(1, 155)=38.70, p=0.0001, \eta^2_p = 0.20$. To summarise, the younger the participants, the lower their cognitive abilities, assessed by the various neuropsychological tests. The same effects were observed when the analyses were conducted only with the children (all $ps < .05$).

Table 5. Mean, Standard Deviation, minimum and maximum of raw scores of different neuropsychological tests.

	5 years			6 years			7 years			Adults		
	M	SD	[Min, Max]	M	SD	[Min, Max]	M	SD	[Min, Max]	M	SD	[Min, Max]
Short-term memory	4.51	1.41	[2; 8]	5.41	1.48	[3; 10]	6.67	1.89	[2; 12]	8.37	1.88	[5; 13]
Working memory	3.26	3.26	[0; 9]	4.44	1.54	[0; 8]	5.94	1.48	[3; 8]	8.50	2.06	[4; 13]
Selective attention	30.27	22.06	[5; 87]	15.70	3.09	[5; 50]	10.99	4.19	[4; 24]	3.14	1.24	[2; 6]
Divided attention	7.74	3.44	[1; 18]	10.53	9.33	[4; 16]	13.76	3.49	[6; 20]	18.78	0.83	[15; 20]

For each dual-task condition with the concurrent temporal or non-temporal discrimination task, correlation analyses were then performed on single/dual-task differences in reproduced duration, the age in months, and the significant z-scores on the different neuropsychological tests. No correlations were found for the single/dual-task difference in temporal reproduction with the concurrent temporal discrimination task condition (Table 6), either for the 6- or for the 12-s duration (all $ps > 0.05$). In contrast, with the concurrent non-temporal discrimination task, significant correlations were found between this difference index and the scores of selective and divided attention both for each target duration and for all the durations included in the same analysis (see Table 2) (overall durations, selective attention, r

= -0.44, divided attention, $r = -0.37$, both $p < 0.001$). The correlation with the working memory scores also reached significance ($r = -0.27$, $p = 0.02$).

Finally, we ran a hierarchical regression on the overall single/dual-task differences in reproduced duration when the concurrent non-temporal discrimination task was used in the dual-task condition, including the age in months as well as the significant z-scores on the neuropsychological tests (working memory, selective and divided attention). While the model appeared significant, $F(4, 155) = 7.56$, $p < 0.001$, $h^2 = 0.18$, only the component of selective attention actually reached significance ($\beta = 0.41$, $SE = 690.37$, $p = 0.0001$, $\eta^2_p = 0.10$), whereas the effects of divided attention ($\beta = -0.17$, $SE = 879.67$, $p = 0.16$), working memory ($\beta = 0.14$, $SE = 816.44$, $p = 0.21$) and age were no longer significant ($\beta = 0.04$, $SE = 768.04$, $p = 0.36$). Similar effects persisted when adults were extracted from the model (Table 7).

Table 6. Correlation between the single/dual-task difference in reproduced duration, the age and the different neuropsychological scores with the concurrent non-temporal discrimination task and the concurrent temporal discrimination task used in the dual-task condition.

	Non-temporal dual task			Temporal dual task		
	6 s	12 s	Overall	6 s	12 s	Overall
Age	-0.20	-0.28*	-0.26*	-0.04	-0.14	-0.11
Short-term memory	-0.14	-0.14	-0.15	-0.16	-0.14	-0.18
Working memory	-0.24*	-0.27*	-0.27*	-0.12	-0.08	-0.11
Selective attention	0.36**	-0.45**	-0.44**	0.18	0.18	0.21
Divided attention	-0.38**	-0.30**	-0.37**	-0.21	-0.14	-0.21

* $p < .05$.
** $p < .01$.

Table 7. Hierarchical regression analysis on the overall single/dual-task difference in reproduced duration for the concurrent non-temporal discrimination task used in the dual-task condition.

Analyses	B	SE B	β	R^2
Model 1				
1. Age	-1189.70	562.88	-.17*	.03*
Model 2				
1. Age	-582.09	718.66	-.08	
2. Working memory	-998.51	737.59	-.14	
Overall significance				.04*
Model 3				
1. Age	383.00	807.88	.06	
2. Working memory	-148.08	803.07	-.02	
3. Divided attention	-2192.11	890.89	-.31*	
Overall significance				.08**
Model 4				
1. Age	280.97	768.04	0.04	
2. Working memory	1023.84	816.44	0.14	
3. Divided attention	-1226.38	879.67	-.17	
4. Selective attention	2786.12	690.37	0.41**	
Overall significance				.18**

* $p < .05$.
** $p < .01$.

Performance in discrimination tasks

Proportion of correct responses in the single task condition: The proportion of correct responses was measured for each discrimination task (temporal vs. non-temporal) in the single task condition (Figure 39). The ANOVA with two between-subjects factors (discrimination task, age) yielded a significant main effect of the discrimination task, $F(1,155)=71.91, p<.001, \eta^2_p=.33$. This suggests that the concurrent discrimination task used in the dual-task condition was more difficult in the temporal than in the non-temporal modality, while the concurrent temporal discrimination also interfered less with temporal reproduction in the dual-task condition. Furthermore, there was a significant effect of age, $F(3, 153)=6.67, p<.001$, but no age \times discrimination task interaction, $F(1, 155)=1.10, p=.35$.

Single/dual-task difference in the proportion of correct responses : an ANOVA was conducted on this measure of the difference in the proportion of correct responses obtained in the discrimination task when this one was performed in the single and the dual-task condition with two between-subjects factors (age, discrimination task). The ANOVA revealed a main effect of age, $F(3, 156)=3.06, p=.03, \eta^2_p=.06$, indicating that the number of mistakes made by the younger participants increased from the single to the dual task condition. However, there was neither a main effect of the discrimination task, nor any age \times discrimination task interaction (all $ps >.05$). This indicates that even if the temporal discrimination task was more difficult than the non-temporal discrimination task in the single task condition, the decline in proportion of correct responses when the temporal reproduction task was simultaneously performed, was not statistically different between the two discrimination tasks, i.e. temporal or non-temporal.

However, when we did not use a performance index based on the difference in the proportion of correct responses between the single and the dual-task condition, but only the proportion of correct responses in the dual-task condition, the ANOVA showed a significant effect of the discrimination task, $F(1, 155)=48.99, p=0.0001, \eta^2_p=0.24$, since the participants performed better on the non-temporal discrimination task than in the temporal discrimination task, even when they also had to simultaneously perform the temporal reproduction task. Therefore, it seems that even if the temporal discrimination task was harder than the non-temporal discrimination task, it generated less interference during temporal reproduction (shortening effect) than the non-temporal discrimination task.

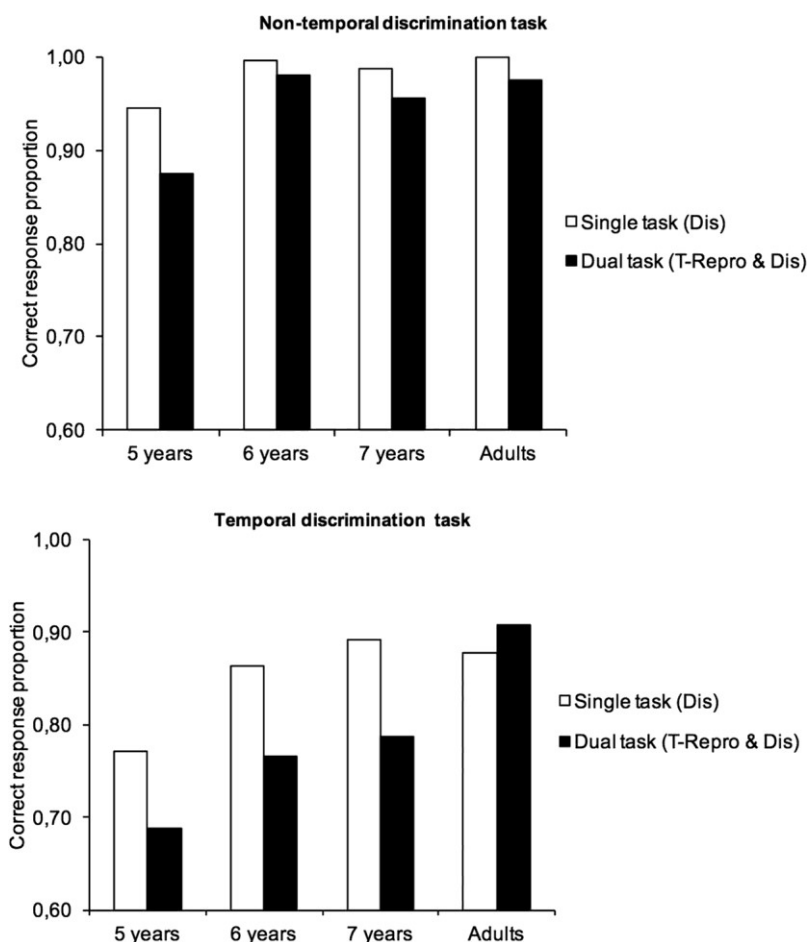


Figure 39. Proportion of correct responses for the non-temporal and the temporal discrimination task in the single task condition and the dual-task condition with the temporal reproduction task for the children aged 5, 6, 7 years and adults.

Correlations between single/dual-task difference in discrimination performance and cognitive abilities

Correlation analyses were carried out between the single/dual-task difference in the proportion of correct responses in the discrimination tasks, the age (in months) and the significant z-scores on the different neuropsychological tests. In the non-temporal dual-task condition, the divided attention, selective attention and working memory scores stood out (short-term memory, $r = -0.21$, $p = 0.06$; working memory, $r = -0.27$, $p = 0.02$; divided attention, $r = -0.32$, $p < 0.01$; selective attention, $r = -0.28$, $p = 0.01$). Only age failed to reach significance (age, $r = -0.13$, $p = 0.26$). On the other hand, in the temporal dual-task condition, this difference index in the proportion of correct responses was correlated with all our variables (age, $r = -0.29$, $p < 0.01$; working memory, $r = -0.25$, $p < 0.03$; divided attention, $r = -0.32$, $p < 0.01$;

selective attention, $r=0.26$, $p=0.02$), except for short-term memory ($r=-0.17$, $p = 0.13$) (Table 8).

However, we were unable to progress any further with regard to this effect on the overall participants since the simple regression analysis produced no significant models, either for the non-temporal dual-task, $F(5, 63) = 1.95$, $p = .099$, or for the temporal dual-task, $F(5, 71) = 2.025$, $p = .085$ (all variables $ps > .05$).

Table 8. *Correlations between single/dual-task differences in the proportion of correct responses, the age and the z-score of neuropsychological tests for the non-temporal discrimination task and the temporal discrimination task in the dual task condition with the same temporal reproduction task.*

	Non-temporal discrimination task	Temporal discrimination task
Age	-0.13	-0.29**
Short-term memory	-0.21	-0.17
Working memory	-0.27*	-0.25*
Selective attention	0.28**	-0.26*
Divided attention	-0.32*	-0.32**

* $p < .05$.

** $p < .01$.

Discussion

In our study, children aged from 5 to 8 years and adults were given a temporal reproduction task with either a temporal or a non-temporal discrimination task. Our results showed a considerable underestimation of time in the dual-task condition compared to the single task condition that decreased with age, whatever the interfering task employed. This finding is in line with the results of studies using a dual-task paradigm with a non-temporal task in adults (Block et al., 2010; Koch, Poljac, Müller, & Kiesel, 2018) and children (Arlin, 1986a, 1986b; Gautier & Droit-Volet, 2002; Hallez & Droit-Volet, 2017; Zakay, 1992). The temporal shortening effect in the dual-task paradigm is thus a robust phenomenon observed at all ages. In addition, our results replicated those found by Hallez and Droit-Volet (2017) in children, showing that the magnitude of the shortening effect in a dual-task using a non-temporal discrimination task is directly linked to individual attention capacities: the lower the individual attention capacities, the higher the shortening effect in the dual-task. However, the originality of our study was to test different concurrent tasks, not only a non-temporal discrimination task but

also a temporal discrimination task. Our results thus revealed that the shortening effect was greater when the interfering task was non-temporal than when it was temporal.

The fact that the shortening effect was smaller with the concurrent temporal than with the concurrent non-temporal task could have arisen because the former task was easier than the latter. However, our results on the proportion of correct responses in the discrimination tasks in the single discrimination task condition ran opposite to this interpretation because the proportion of correct responses was not lower but higher in the non-temporal discrimination than in the temporal discrimination task. In other words, although the temporal discrimination task was more difficult for the participants than the non-temporal discrimination task, its interfering effect on time estimates in the reproduction task was lower. This result supports the hypothesis according to which the processing of different durations in two temporal tasks performed simultaneously (temporal discrimination and temporal reproduction) does not compete, in terms of cognitive resources, for the use of same “clock” system (Van Rijn & Taatgen, 2008). Indeed, according to attentional models of timing, the competition for a common system produces a shortening effect that increases with the difficulty of the concurrent task (Hancock, 1996; Hanley & Morris, 1982). In other words, the higher the interference effects (e.g. lower performance), the more resources are shared for both tasks (Navon & Gopher, 1979; Nijboer, Borst, van Rijn & Taatgen, 2013; Wickens, 2002). In addition, our results showed that none of the cognitive capacities (short-term memory, working memory, selective and divided attention) assessed by the neuropsychological tests explained temporal performance in the dual-task that used the concurrent temporal discrimination task. By contrast, the magnitude of the shortening effect with the non-temporal discrimination task was significantly correlated with individual attentional capacities. Our results thus provide evidence for the lack of competition for resources in the processing of a set of presented simultaneously stimulus duration. This can be explained by the idea that the same clock system is used to process different durations which are presented simultaneously (Bryce et al., 2015; Van Rijn & Taatgen, 2008), or in terms of multiple independent clocks (Ayhan, Revina, Bruno, & Johnston, 2012; Cheng et al., 2014; Klapproth, 2011; Meck & Church, 1984).

As suggested by our results, the processing of different simultaneously presented durations would not be very costly in terms of attentional resources in either children or adults. According to models of the architecture of working memory (Executive-Process Interactive Control (EPIC), Meyer & Kieras, 1997; Adaptive Control of Thought-Rational (ACT-R) Anderson, 2007), all central executive activities involved in the completion of tasks (e.g.

declarative memory, production) can be processed in parallel, thus competing for cognitive resources, while different peripheral resources (e.g. vision, motor) cannot be used simultaneously by multiple tasks, with the result that participants switch between the tasks (Nijboer, Taatgen, Brands, Borst, & van Rijn, 2013). To account for the many different multiple-task situations, Salvucci, Taatgen, and Borst (2009) described a multi-tasking continuum in which different lengths of time are spent on one of the tasks before switching to another one. Given this view, we can assume that the concurrent discrimination task produced an interference effect on the time judgment in the reproduction task, but that this interference effect was weaker for the concurrent discrimination task using temporal information because there would be no switching between the two temporal tasks or, if present, would be undemanding and of short duration. By contrast, the discrimination task using non-temporal information would generate a greater number of switching-related activities, which would further disrupt performance on the temporal reproduction task. Recently, Hallez and Droit-Volet (submitted) demonstrated that young children are indeed able to process different durations in a multiple timing task when they are presented with different durations and do not know beforehand which of these durations has to be judged. The processing of durations associated with simultaneously presented events/stimuli would thus be automatic and innate, with the nature of the task, which may be more or less cognitively demanding, accounting for the developmental differences in temporal performance (Coull & Droit-Volet, 2018; Droit-Volet, 2016; Droit-Volet & Coull, 2016; Droit-Volet, de Lurdes Delgado, & Rattat, 2006). This does not mean that participants can simultaneously process an unlimited number of stimulus durations. The maximum number of these durations is thought to be about 3–4 in the visual modality depending on the spatial location of the stimuli (Cheng et al., 2014).

The analysis of differences in the bidirectional interference effect on temporal performance between the temporal reproduction task and the temporal discrimination task confirmed that the duration is, in part, passively or incidentally processed together with the stimulus to be judged and that the interference effects mainly depend on the task type (motor reproduction, visual discrimination). Indeed, the effect of the discrimination task on temporal reproduction was smaller when the discrimination task used temporal information rather than non-temporal information, while the effect of temporal reproduction (increase in number of judgment errors) was similar for the two discrimination tasks, i.e. both temporal and non-temporal. In addition, although there was no correlation between cognitive capacities and performance in the reproduction task with the temporal discrimination task, these correlations

were significant for performance in the temporal discrimination task when the concurrent task was the temporal reproduction task. It is well known that multi-tasking leads to significant reductions in performance resulting from competition between different tasks for cognitive resources (Jiang, Saxe, & Kanwisher, 2004; Poljac, Koch, & Bekkering, 2009; Rubin & Meiran, 2005; Sigman & Dehaene, 2006). The cost of multi-tasking is thus a function of the available cognitive resources, which increase with age (Cepeda, Kramer, & Gonzalez de Sather, 2001; Ferdinand & Kray, 2014; Maquestiaux, Hartley, & Bertsch, 2004; Reimers & Maylor, 2005). fMRI data has shown, for example, that performance on a flanker task improved between 4 and 8 years as the size of the right anterior cingulate increased (Fjell et al., 2012), a brain area involved in executive functions (Posner, Rothbart, Sheese, & Voelker, 2012; Rothbart & Posner, 2015; Rothbart, Sheese, Rueda, & Posner, 2011). This developmental change would be central to improvements in reaction time in a variety of conflict tasks (Bush, Luu, & Posner, 2000; Fjell et al., 2012), such as in time processing (Coull, Cheng, & Meck, 2011). Our results on the bidirectional interference effects in children and adults therefore suggest that the attentional dual-tasking cost was greater when the concurrent task was non-temporal. In addition, as suggested our correlation analyses, the attention cost would be higher as concerned the effect of the temporal reproduction task on the temporal discrimination performance than that of the temporal discrimination task on the temporal reproduction. Indeed, in the temporal reproduction task, the duration to be reproduced has to be maintained in short-term memory, whereas the discrimination judgment is given immediately. This is entirely consistent with the studies showing that the temporal reproduction task is more cognitively demanding than a temporal discrimination task (temporal generalisation or temporal bisection), and that a bisection task in which durations are judged as “short” or “long”, as in the task used in our study, is even less cognitively demanding than the other temporal tasks (Droit-Volet et al., 2015; Ogden, Wearden, & Montgomery, 2014).

In sum, the difference in the bidirectional effects between the reproduction and the discrimination task suggests that in the dual-task procedure used in our study, the reproduction task consumed more attentional resources than the discrimination task, and that this discrimination task competed more strongly for cognitive resources with the temporal reproduction task when the information to be discriminated was non-temporal than when it was temporal. This conclusion is consistent with the empirical predictions of the AG model (Block et al., 2010; Zakay, 1989, 1992). However, it also suggests that the temporal shortening effect observed in dual tasks results from interfering effects between different tasks rather than from

an impairment of time encoding *per se*. This might seem to cast doubt on the AG model. However other experiments must be performed before we can come to a more definitive conclusion. Notwithstanding, our experiment allows us to make the following four assumptions. First, in line with other researchers (Cheng et al., 2014; Fereday & Buehner, 2017; Klapproth, 2011), we assume that there is a master clock system or different independent clock systems that can automatically process different stimulus durations presented in parallel. Second, at an early phase of time processing, a temporary disruption in time encoding can nevertheless be produced simply by presenting a concurrent discrimination task (Casini & Macar, 1997; Macar, 1996). This would explain why we nevertheless observed a shortening effect when a temporal discrimination task was administered during temporal reproduction task and why this shortening effect was smaller with the concurrent temporal discrimination task than the concurrent non-temporal discrimination task. Third, duration is closely associated with the event or the task to be performed and the mechanisms involved in its processing thus depend on its modality of presentation (type of event, type of task). This is consistent with neuroscientific studies suggesting that there is not one single specific system dedicated to time processing but extensive neural circuitry whose activation depends on the context in which durations are presented (Coull & Droit-Volet, 2018; Merchant, Harrington, & Meck, 2013). Fourth, the completion of a time judgment task competes, at an advanced level of temporal information processing, for cognitive resources with the processing of other information during the attentionally guided integration of temporal information in the duration judgment and working memory and decision process. This assumption is consistent with developmental studies showing that children can process time at an early age and that the age-related differences in time sensitivity (variability of time judgment) are mainly due to the development of cognitive capacities, and especially attention and working memory (for a review, see Droit-Volet, 2013, 2016).

In conclusion, our study, in which we measured the individual cognitive abilities of children and adults with different neuropsychological tests, allows us to better understand the mechanisms underlying the interference effects on time judgment in multi-tasking. Our results showed that the impairment of temporal performance depends mainly on the attentional resources required to process two tasks simultaneously. Temporal performance in a dual-task is thus lower in young children with limited attention capacities. However, the results also highlight the critical impact on performance of the nature of the dual-task (dual-tasking cost) and the modality of the information to be processed in the concurrent task, since the temporal

information produced a smaller interference effect than the non-temporal information when the concurrent discrimination task was used. It is therefore now important to further examine this question by systematically testing different concurrent tasks, such as another reproduction task for example, of different levels of difficulty.

I – 4. Etude du traitement simultanée de durées chez des enfants et des adultes : quand l'attention prédit l'effet d'interférence.

Hallez, Monier & Droit-Volet (submitted).

Introduction

Our perception of time depends on events that fill the duration to be judged. The duration of interval is for example judged shorter when it is empty (empty duration) than when it is filled by an event (filled in duration) (Droit-Volet, 2008; Horr & Di Luca, 2015; Plourde, Gamache & Grondin, 2008; Wearden, Norton, Martin & Montford-Bebb, 2007). Time distortions are also observed in dual-tasks when participants simultaneously perform a temporal and a non-temporal task. Temporal performance is indeed more variable and less accurate (underestimation) in a dual than in a single task, with a temporal underestimation increasing with the difficulty of the non-temporal task (Block, Hancock & Zakay, 2010; Hallez & Droit-Volet, 2017, 2019; Koch, Poljac, Müller & Kiesel, 2018).

Researchers have proposed attentional models to explain this temporal performance in dual-tasks (Thomas & Weaver, 1975; Block et al., 2010; Zakay, 1989, 1992). According to these models, duration processing is an effortful process which draws resources from a pool of limited attentional resources that is shared by the processing of other information (Thomas & Cantor, 1975; Thomas & Weaver, 1975). The most popular theories of timing suppose that time is counted by means of a single clock-like system (“clock”) composed of a pacemaker and an accumulator (Church & Gibbon, 1982; Gibbon, 1977; Gibbon, Church & Meck, 1984; Treisman, 1963). The perceived duration results from the number of pulses generated by this pacemaker and transferred to the accumulator (counter). A switch ensures the pulses are transmitted by closing the circuit when a signal indicates the beginning of the temporal interval. Consequently, to account for time distortion in a dual-task, Zakay and Block (1996) extended this simple switch mechanism by adding an attentional gate whose opening varies as a function of the allocated attentional resources (attentional gate model). When attentional resources are allocated to time, the gate opens wider or more frequently. As a result, more pulses pass through and time is judged longer. Conversely, when the attention allocation for time is limited, fewer pulses pass through and time is judged shorter. This model has since been widely validated empirically (Block et al., 2010). It has nevertheless been discussed with regard to the interest of adding a gate to the clock system, as a switch that flickers throughout the processing of the entire duration allows the same temporal predictions (Lejeune, 1998, 2000; Zakay, 2000).

However, the greatest issue for this attentional model results from studies of timing that have used two concurrent temporal tasks, i.e. a multiple timing task. In this task, participants are presented with different durations in each trial and must pay attention to each of them because they do not know beforehand which stimulus has to be judged (e.g. Brown & West,

1990). Although the use of this task remains rare and sporadic, some studies have shown that humans are able to time different stimuli presented simultaneously (Ayhan, Revina, Bruno & Johnston, 2012; Burr, Tozzi & Morrone, 2007; Cheng, Yang, Han, Ding & Fan, 2014; Johnston, Arnold & Nishida, 2006; Klapproth, 2011; Rousseau & Rousseau, 1996; van Rijn & Taagten, 2008), as has also been found in other animals (rats or pigeons) (Church, Guilhardi, Keen, Macinnis & Kirkpatrick, 2003; Meck & Church, 1984; Meck & Williams, 1997; Roberts, 1995). In the multi-timing condition, Brown and West (1990) showed that the absolute error in time judgment (and the temporal variability) increased as a function of number of simultaneously presented durations. However, the direction of judgment errors did not indicate a systematic underestimation of time, as observed in dual-task with non-temporal information: “with both under and overestimations contributing to time judgment inaccuracy” (p.117). Brown and West (1990) nevertheless went out, without further evidence, to explain their results based on the attention mechanisms described in the gate-attention model. However, the difference in time judgment in terms under- or overestimation could depend on temporal context, i.e. differences in the presentation of concurrent durations (Buhusi & Meck, 2009). For example, the effect of a gap during the presentation of stimulus to be timed does not depend on its absolute duration, but is relative to temporal context, namely the length of duration after the gap (Buhusi & Meck 2005; Spetch & Rusak, 1992). Recent studies have shown that the effect of temporal context on temporal performance is stronger in participants with limited attention and working memory capacities as in young children (Karaminis, Cicchini, Neil, Cappagli, Aagten-Murphy, Burr & Pellicano, 2016; Hallez, Damsma, Rhodes, Van Rijn & Droit-Volet, 2019). We may thus assume that the simultaneous processing of different durations is possible in all subjects, even young children, although the capacity of processing is limited by the number of sensory information. However, some time distortions may occur in the multi-timing condition related to attention mechanisms involving in processing the temporal context.

To test our hypothesis, we recruited children aged from 5 to 8 years old as well as adults, all of whom were capable of accurate timing (Droit-Volet, 2016; Droit-Volet & Coull, 2016; Coull & Droit-Volet, 2018), but whom the cognitive capacities differed (Casey, Giedd, & Thomas, 2000). In our study, the individual cognitive capacities of the participants were therefore assessed by means of different neuropsychological tests. Before now, the multiple timing task has never been used in children. Only a few studies have tested children in dual-task involving temporal and non-temporal information (Gautier & Droit-Volet, 2002; Hallez & Droit-Volet, 2017, 2019; Zakay, 1992). Therefore, the first aim of our experiments was to verify

whether children, like adults, are capable of simultaneous temporal processing. The second aim was to examine the involvement of attention and other cognitive capacities in temporal interference effects. In our study, the participants were thus presented with either one (solo timing), two (dual timing) or three durations (triple timing). They did not know beforehand which of these durations was to be judged and therefore had to pay attention to all the durations. On each trial, the concurrent duration was shorter or longer than the target duration. In this experimental condition, we assumed that, at the early age of 5 years, young children would be able to process several durations presented simultaneously. However, the proportion of errors in time judgment and its temporal variability should be higher in young children due to their limited attentional capacities.

Experiment 1

Method

Participants. The sample consisted of 65 participants: 22 children aged from 5 to 6 years old (9 females and 13 males, mean age = 5.54 years, $S.D = 0.25$), 24 children aged from 7 to 8 years old (8 females and 16 males, mean age = 7.8 years, $S.D = 0.17$) and 19 adults (18 females and 1 male, mean age = 21.75, $S.D = 2.22$). The children were recruited from various nursery and primary schools in the Auvergne region of France. The adults were undergraduate Psychology students at Clermont Auvergne University. All participants were rewarded for their participation, more specifically with “panini” pictures for the children and course credit for the students. The children’s parents and the adult subjects signed written informed consent for their participation in this experiment, which was carried out according to the principles of the Helsinki declaration and approved by the inspector committee of the academy of the Education French Ministry as required by French law.

Material. Participants were seated in front of a 17-inch computer screen, in a neutral and quiet room of their schools or university. Using a program written in Python and compiled in C, the computer delivered and recorded all the experimental events. The participants gave their responses with their preferred hand using a computer mouse.

The temporal stimuli were 3 squares (5 cm) of different colours: blue, green and orange. They were displayed on a black background in a circular area of 18 cm centered on screen and were located close together to avoid spatial effects (Cicchini & Morrone, 2009). The presentation location of the squares in this area was randomly chosen with the constraint of not being superimposed.

Procedure

Temporal Reproduction Task. Before starting the task, the participants performed a training phase consisting of 6 randomly presented trials: 3 demonstration and 3 training trials, for each of the target durations (3 and 6 s). In the training phase, only one square was presented, with the results that the participant necessary already knew the stimulus to be judged. Each trial began with the words “Ready?” after an inter-trial interval that was randomly selected between 500 and 1000 ms. The experimenter pressed the spacebar when the participant was genuinely ready to trigger the to-be-estimated stimulus (square) after a fixed interval of 250 ms. Then, after the presentation of the temporal stimulus (temporal encoding), a picture appeared for 1 s depicting a finger pressing a button, the colour of which corresponded to the target square to be estimated. In addition, 300 ms after this picture, the target square was presented in the center of the screen, and the participant had to click on the computer mouse when he/she judged that the duration was the same as the target square (temporal reproduction).

In the testing phase, the participants were instructed that 1, 2 or 3 squares were likely to appear simultaneously. They therefore must pay attention to the durations of the different squares, because they would find out which square was to be estimated only after its presentation, by means of the finger indicating the target square. The participants performed 36 trials (random presentation), i.e. 6 trials for each duration (3 and 6 s) presented in 3 different conditions ($6 \times 2 \times 3$): 1 square (solo timing), 2 squares (dual timing), and 3 squares (triple timing). The location and color of the target duration were randomly chosen. However, The location and color of the additional squares were also random, with a duration randomly selected within a temporal window of between 1 and 12 s, with the only constraint being that there had be the same number of durations shorter and longer than the target-square duration. In other words, for each of the two durations, there was: three trials with a longer concurrent duration and three trials with a shorter concurrent duration in the dual-timing condition; and two trials with two longer concurrent durations, two trials with two shorter concurrent durations, and another two trials with a longer and a shorter concurrent duration in the triple-timing condition. To limit the number of information that varies for children, we fixed in Experiment 1 a same onset of presentation for the different squares.

Neuropsychological tests. Following the temporal reproduction task, the participants were randomly assigned to 4 neuropsychological tests. The neuropsychological tests assessing short-term and working memory was the Corsi Block-Tapping Test (Corsi, 1972), in which the participants had to reproduce a block tapping sequence produced by the experimenter in

forward (short-term memory) and backward order (working memory). There was a total of 8 block tapping sequences with 2 trials for each sequence. When the participants succeeded in one of the two trials of the sequence, the test continues with a longer sequence of block to tap (minimum 2, maximum 9). The third test was the « Research sky » from the TEACH (Test of Everyday Attention of Children; Mainly, Robertson, Anderson & Nimmo-Smith, 2006). This test was used to assess selective attention (attention). The participants had to circle all pairs of identical spaceships among 130 possible pairs. In this test, the scores decrease with higher attention capacities, since the score is given by the number of detected pairs of spaceships divided by the time in seconds taken to complete the test. The last neuropsychological test measured the information processing speed. It consisted of the “Code B” and the “Symbol B” subtests of the Wechsler Intelligent Scale for Children (Wechsler, 2005). In the first subtest, the participants saw 9 digits associated with a specific figure. They then had to draw as many correct figures as possible for a series of 119 digits within 120 s. In the second subtest, they had to indicate on each of the 60 trials if a proposed symbol matched one of the 2 target symbols taken from a series of 5 symbols.

Results

Neuropsychological scores. Table 9 shows the raw scores on the different neuropsychological tests in each age group. The ANOVAs showed a significant main effect of age for all neuropsychological tests: short-term memory, $F(2, 55) = 44.62, p < 0.001, \eta^2_p = 0.62$; working memory, $F(2, 53) = 57.17, p < 0.001, \eta^2_p = 0.68$; information processing speed, $F(2, 56) = 358.25, p < 0.001, \eta^2_p = 0.89$, and attention, $F(1, 53) = 28.84, p < 0.001, \eta^2_p = 0.52$. In summary, the younger the participants, the lower their cognitive capacities were.

Table 9. Mean, Standard Deviation, minimum and maximum of raw scores of different neuropsychological tests in the different age groups for Experiment 1 and 2.

	5-6 years			7-8 years			Adults		
	M	SD	[Min;Max]	M	SD	[Min;Max]	M	SD	[Min;Max]
<i>Experiment 1</i>									
Short-Term Memory	4.47	1.37	[2; 6]	6.74	1.45	[4; 9]	9.50	1.88	[6; 13]
Working Memory	2.94	1.43	[0; 5]	5.62	1.66	[3; 9]	9.06	1.95	[4; 12]
Processing speed	13.35	4.63	[4; 23]	26.46	4.54	[16; 32]	58.75	6.45	[48; 69]
Selective Attention	16.46	6.89	[7; 32]	8.95	5.14	[4; 23]	3.31	1.22	[2; 8]
<i>Experiment 2</i>									
Working Memory	2.5	1.58	[0; 6]	4.58	1.66	[2; 9]	7.58	1.53	[5; 11]
Selective Attention	19.96	13.74	[7; 59]	9.00	5.14	[4; 15]	3.00	0.86	[2; 6]

Temporal accuracy. We calculated a time error (TE) for each participant in each experimental condition: $(R-T)/T$, where T is the target duration and R the participants' temporal reproduction. A TE value shorter or longer than zero indicates that temporal reproduction is shorter (underestimation) or longer (overestimation), respectively, than the target duration. A TE close to zero indicates an accurate time judgement. We then ran an ANCOVA on this measure, with one between-subjects factor (age group) and two within-subjects factors [target duration (3, 6 s), timing condition (solo, dual, triple timing)], and the z-scores of different neuropsychological tests used as covariate (short-term memory, working memory, processing speed, attention).

The ANCOVA showed a significant main effect of the timing condition, $F(2, 90) = 4.10$, $p = .02$, $\eta^2_p = 0.08$, and the timing condition did not interact with the age, $F(4, 90) = 0.72$, $p = .55$. The significant linear effect of the timing condition, $F(1, 45) = 5.67$, $p = .02$, $\eta^2_p = .11$, revealed that the target duration was judged longer with than without ($M_{solo} = .08$) concurrent duration, and in a greater extent with two ($M_{triple} = .24$) than one ($M_{dual} = .15$) concurrent duration (Figure 40A).

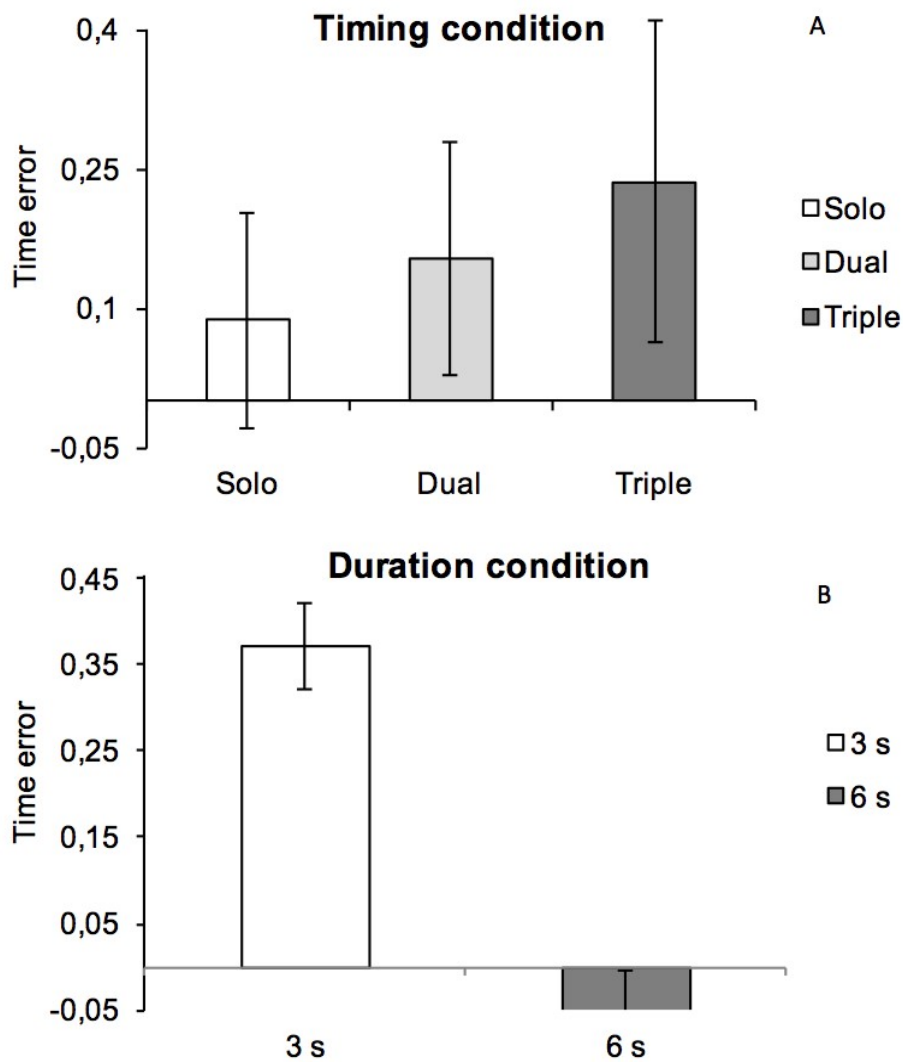


Figure 40. Mean temporal Time Error paired with different (A) conditions of timing (solo, dual and triple timing) and (B) duration of timing (3, 6 seconds).

In addition, there was a significant interaction between the timing condition and the scores of attention, $F(2, 90) = 10.38, p < 0.0001, \eta^2_p = 0.19$, while the timing condition did not interact with the other cognitive scores (timing \times short-term memory: $F(4, 44) = 0.47, p = .63$; timing \times working memory: $F(2, 90) = 0.60, p = .50$; timing \times processing speed, $F(2, 90) = 1.58, p = .21$). The main effects of the age and of different neuropsychological scores were also not significant (all $p > .05$). The temporal overestimation in the multi-timing task was therefore related to attentional processes. As confirmed the regression analysis, the mean of differences in time estimates between the multi- and the single timing task increased when the attention capacities were poorer ($b = 0.029, SE = 0.008, B = .45, t = 3.73, p < .0001$) (Figure 41). As recalled a lower score on the attention test used in our study means higher attention capacities.

In other words, the lower the attention capacities, the higher the lengthening effect in the multi-timing task was.

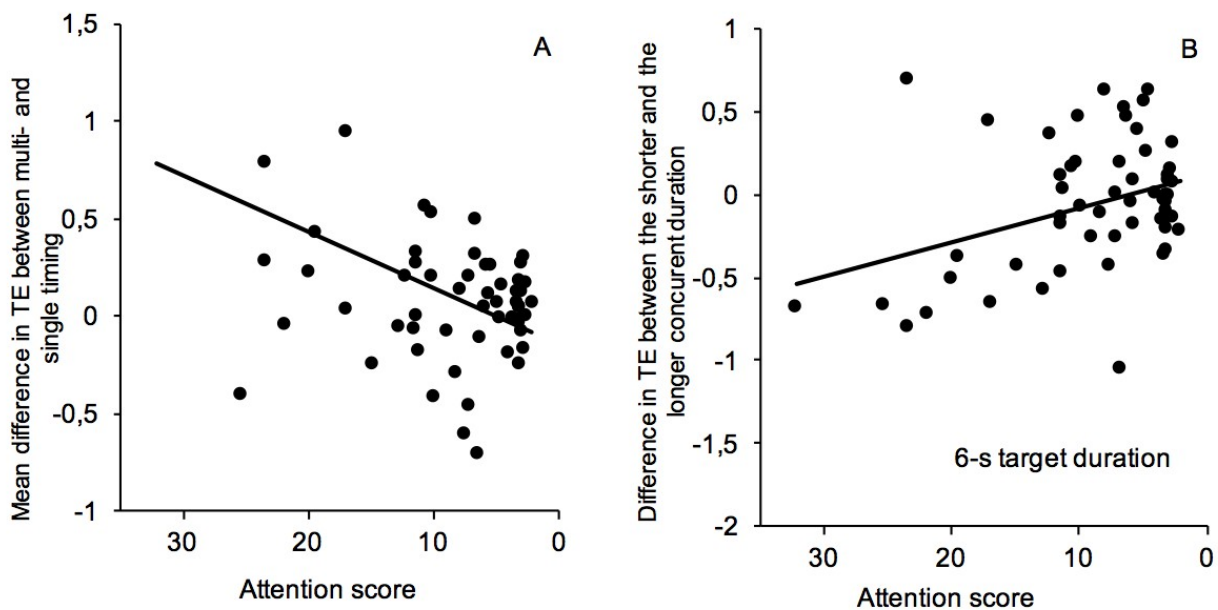


Figure 41. Attention scores plotted against the mean difference in temporal error between multi- and single timing.

The ANCOVA also showed a significant main effect of the target duration, $F(1, 45) = 53.58, p < 0.0001, \eta^2_p = 0.54$, indicating that the short duration (3 s) tended to be overestimated and the longer one (6 s) underestimated (Figure 40B), consistently with Vierordt's law. There was neither target duration \times age nor target duration \times cognitive scores interaction (all $p > .05$), indicating the robustness of this law. However, there was a significant duration \times timing condition interaction, $F(2, 90) = 5.53, p = .005, \eta^2_p = 0.11$. This indicates that the effect of the multi-timing on temporal performance was higher for the 3-s than for the 6-s target duration. Indeed, the difference in TE between the single and the dual or the triple timing was higher for 3 s than for 6 s ($t(64) = 3.43, t(64) = 3.08$, respectively, $p < .01$). There was also a significant timing \times duration \times working memory interaction, $F(2, 90) = 4.47, p = .01, \eta^2_p = 0.9$. The regression analyses indicated that the working memory only played a significant role for the short target duration of 3 s when three durations had to be processed in parallel, i.e. for the triple and the single timing difference in TE ($b = 0.34, ES = 0.038, B = .34, t = 2.67, p = .01$). The 3-s duration was indeed judged longer when the working memory capacities increased.

Temporal variability. An ANCOVA with the same factors as those used for the TE was performed on the standard deviation (*S.D.*) of reproduced durations. This statistical analysis also showed a significant interaction between the timing condition and the attention scores, $F(2, 90) = 11.98, p < .0001, \eta^2_p = .21$, with a significant main effect of attention, $F(1, 45) = 11.98, p = .001, \eta^2_p = .21$. The main effect of the timing condition failed to reach significance ($M_{\text{solo}} = 2.41, M_{\text{dual}} = 2.57, M_{\text{triple}} = 3.07, F(2, 90) = 2.46, p = .09$). There was no other significant effect (all $p > .05$). Therefore, the participants with poorer attention capacities were more variable in their temporal reproduction. In addition, the variability in their reproduction increased with the number of durations to be processed in parallel, as suggested the significant timing \times attention interaction. Indeed, the difference in the temporal *S.D.* between the multi-timing and the single timing task increased with the poorer attention capacities, but in a greater extend for three concurrent durations compared to two concurrent durations ($b = 0.20, ES = 0.057, B = .43, t = 3.5, p = .001; b = 0.13, ES = 0.04, B = .39, t = 3.09, p = .003$). Finally, the time distortion induced by the multi-timing increased in the participants with poorer attention capacities with the variability of their time judgment, as indicated the correlation between the mean of multi-solo timing differences in the SE and that in the SD ($r = .844, p < .0001$).

Length of the concurrent duration. In order to examine the difference in the temporal accuracy (TE) as a function of the length of the concurrent duration, the concurrent duration was splitted into two categories: shorter or longer than the target duration. The triple timing trials with both a shorter and a longer concurrent duration were not considered. An ANCOVA was thus conducted on the TE with the concurrent duration as factor (shorter vs. longer concurrent duration), but also the target duration, the age, and the significant attention scores. This ANCOVA showed a significant target duration effect, $F(1, 48) = 73.78, p < .001, \eta^2_p = .61$, and a significant target duration \times concurrent duration \times attention interaction, $F(2, 48) = 4.78, p = .03, \eta^2_p = .09$. No other main effects or interactions were significant even those involving the age (all $p > .05$). In fact, there was no difference in the time estimates as a function of the length of the concurrent duration for the 3-s target duration, $t(64) = 0.96, p = .34$, while the duration was judged shorter with a longer concurrent duration than a shorter concurrent duration for the 6-s target duration (-0.18 vs. 0.06, $t(64) = 1.98, p = .05$). In addition, the difference in TE between the shorter and the longer concurrent duration decreased with the poorer attention capacities for the 6-s target duration ($b = -0.12, SE = .04, B = -0.36, t = -2.87, p = .006$ (Figure 41B)).

Discussion

The results of our experiment clearly showed that the children as well as the adults were able to process different durations simultaneously. In the children, as in the adults, the processing of multiple durations lengthened the time estimates and increased their variability. In addition, the lengthening effect increased with the number of concurrent durations to be timed. Our results thus replicated in adults but also in children the results found in previous studies in adults on the multi-timing (e.g., Brown & West, 1990; van Rijn & Taagten, 2008). As expected, our results also showed that the magnitude of the temporal overestimation and its variability in a multiple timing task was linked to individual attention capacities, rather than other cognitive capacities of working memory or information processing speed. In particular, the time distortions in the multi-timing conditions increased in the participants with limited attention capacities, characteristics of young children. However, the lengthening of time estimates with a concurrent duration was judged shorter rather than longer with the longest concurrent duration, especially in the participants with high attention capacities.

Overall, our study revealed that at all ages, children and adults are able to process different durations in parallel, but that some interference effects related to temporal context disrupt the accuracy of time judgment. Consequently, participants time durations simultaneously but not independently. As the temporal interference effects were higher in the participants with limited attention, we can suggest that these interference effects are due to the higher impact of temporal context on children's temporal performance (Hallez et al., 2018). Therefore, independent processing of durations develops during childhood with the development of attention. However, our results showed that the time estimates were shorter and not longer with the longer concurrent duration. This is against the idea of a simple interference effect of temporal context based on attention processes. Some decisional processes of comparison between durations have probably also played a role. It is also possible that the children would have focused more attention on the end of the first duration, and less to what happens after, thus explaining the lower effect of the length of the concurrent duration on their timing. In our study, to simplify the task for young children, we decided to use synchronous onsets for the different stimulus durations. With a stimulus onset synchrony, the difference in temporal context (length of durations) only appeared after the end of one of stimulus durations. This might explained the lower effect of the length of the concurrent duration in children if they focused on contextual changes. However, the consequence on temporal performance of the length of the concurrent duration and the overlap between two durations were not sufficiently

controlled in our study using a stimulus onset synchrony. To further examine this issue, we conducted a second experiment in children and adults. The aim of this second experiment was to replicate the results found in Experiment 1 and to examine the effects on timing of concurrent duration's characteristics, i.e., its length but also the overlap between the target and the concurrent duration and the presentation order of durations, by using different stimulus onset asynchrony (SOA)

Experiment 2

Method

Participants. Sixty-nine subjects participated in this experiment: 18 children aged from 5 to 6 years (14 females and 4 males, mean age = 5.67 years, *S.D* = 0.33), 25 children from 7 to 8 years (14 females and 11 males, mean age = 7.50 years, *S.D* = 0.75) and 26 adults (22 females and 4 males, mean age = 19.83, *S.D* = 1.33). The children and the adults were recruited from the same schools and the same university than those used in Experiment 1. The participants were also rewarded in the same way, and they (parents for children) signed written informed consent for their participation in this experiment. This experiment was carried out according to the principles of the Helsinki declaration and was approved by the inspector committee of the academy of the Education French Ministry.

Material and procedure. The material was similar to that used in Experiment 1. The neuropsychological tests used to assess individual cognitive capacities were also the same, except that we no longer used the short-term and the information processing speed tests that provided no significant results in Experiment 1. We therefore assessed in all participants their capacities in terms of working memory and attention.

The used procedure was also similar, except that the onset of the different squares to-be-estimated were not synchronized. In addition, the target durations were of 4 and 6 seconds, instead of 3 and 6 s. The participants thus performed an initial training phase. Then, in the following testing phase, they were instructed that 1 or 2 squares were likely to appear but that they must pay attention to the duration of the different squares because they will only know after their presentations which square has to be judged. In Experiment 2, when the two squares were simultaneously presented, the target square appeared before or after the onset of the second square (Figure 42). Regardless the appearance order (before or after), the duration of the temporal overlap between the two squares was either of 16 or 33% of the total target duration. In Experiment 2, the duration of the second square (concurrent duration) was also

controlled, being 2 seconds longer or shorter than that of the target square: i.e., 2 s and 6 s for the 4-s target duration, and 4 s and 8 s for the 6-s target duration. Thereby, as illustrated Figure 42, there were 16 experimental conditions (2 target durations \times 2 temporal overlap \times 2 target duration order \times 2 concurrent duration) and 2 control conditions where only one square was presented (one for each target duration). There were 5 trials for each condition. That made a total of 100 trials. The participants were given 48 additional distracting trials, where the duration of the target square were different from 4 and 6 s: i.e., 1, 2, 3, 5, 7 or 8 seconds. These distracting durations were thus presented in the different conditions: 6 distracting durations \times 2 temporal overlap \times 2 target duration order \times 2 concurrent duration. All the trials were randomly presented.

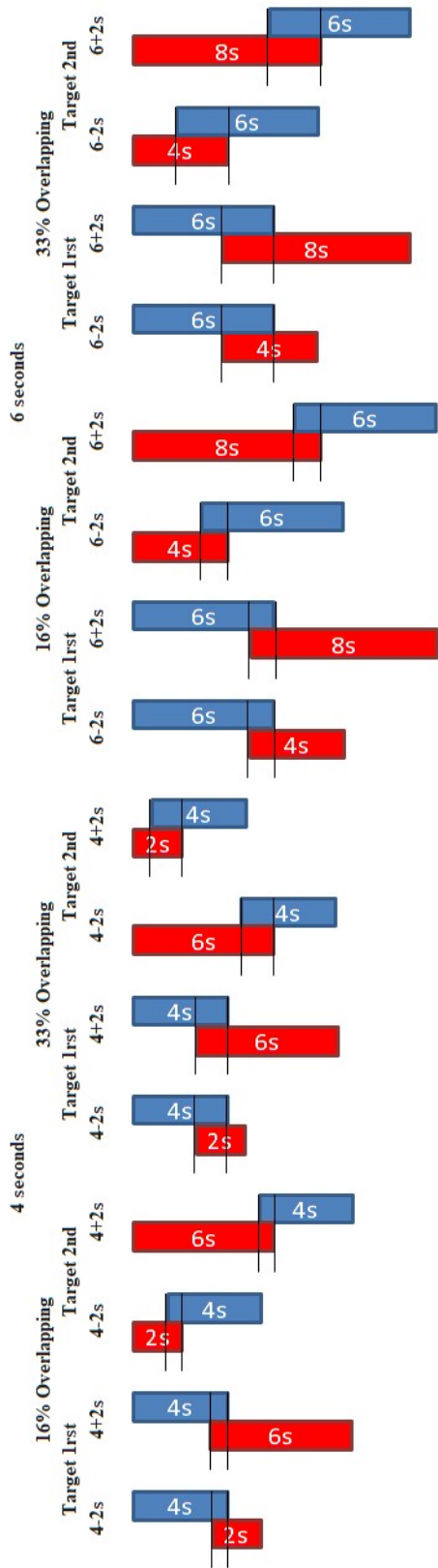


Figure 42. Illustration of the experimental conditions.

Results

Neuropsychological scores. The statistical analyses showed that the working memory and attention scores increased with age as in Experiment 1 ($F(2, 65) = 82.87, p < 0.001, \eta^2_p = 0.56, F(1, 65) = 31.77, p < 0.001, \eta^2_p = 0.33$, respectively) (cf Table9)

Temporal accuracy. 1.17% of the trials were rejected from our sample because they were superior or inferior of 3 standard deviations. As for Experiment 1, we initially performed an ANCOVA on the time error (TE) $[(R - T)/T]$, with the age as between-subject factor and two within-subjects factors: timing condition (solo, dual) and target duration (4, 6 s). The z-scores of working memory and attention were used as covariate.

The ANCOVA showed a significant main effect of the timing condition, $F(1, 63) = 10.93, p = .002, \eta^2_p = 0.15$. This confirmed that the target duration was judged longer in the multi-timing condition ($M = .28$) than in the single timing condition ($M = -.27$), and this regardless of the age group (Figure 43). The target duration \times timing interaction was also significant, $F(1, 63) = 38.69, p < .0001, \eta^2_p = 0.38$, while the main effect of the target duration failed to reach significance in this experiment, $F(1, 63) = 3.10, p = .08$. This significant interaction means that the lengthening effect produced by the multi-timing was greater for the short target duration of 4 s than for the longer one of 6 s.

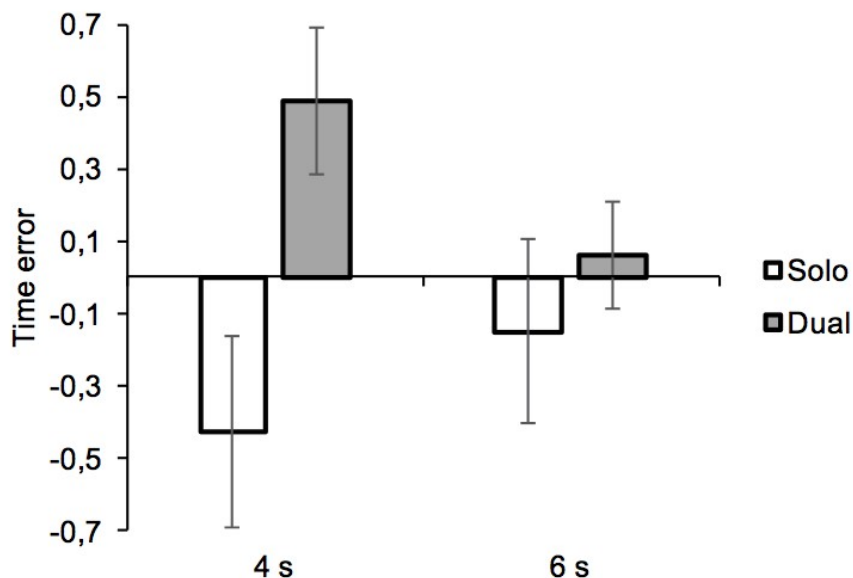


Figure 43. Mean reproduced duration for the two conditions of timing (solo, dual) for both the 4 and 6s duration.

As in Experiment 1, there was a significant timing \times attention interaction, $F(1, 63) = 4.975, p = .03, \eta^2_p = 0.07$. Once again, the TE between the dual and the solo timing increased with the decrease of attention capacities ($b = -.49, ES = .17, B = .49, t = 4.57, p < .0001$) (Figure 44). There was no other significant effects, neither age effect, $F(2, 63) = 1.89, p = .26$, nor age \times timing, $F(2, 63) = 0.92, p = .41$, or working memory \times timing interaction, $F(1, 63) = 0.38, p = .85$. In conclusion, the results of Experiment 2 replicated those of Experiment 1 showing a temporal lengthening in a situation of multi-timing correlated with attention capacities.

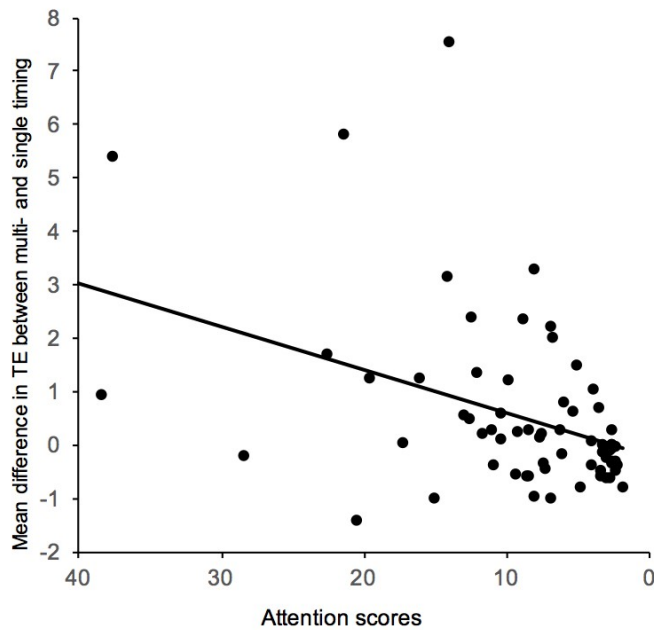


Figure 44. Attention scores plotted against the mean difference in temporal error between dual- and single timing.

Temporal variability. The ANCOVA performed on the standard deviation of reproduced duration found a significant effect of the timing condition, $F(1, 63) = 32.27, p < .0001, \eta^2_p = 0.34$, but now in the direction of a lower temporal variability for the dual ($M = 1.52$) than for the solo ($M = 3.36$) timing condition, although the durations were judged longer in the former condition (Figure 45). However, in this new experiment, there was a significant 3-way timing \times duration \times age interaction, $F(2, 63) = 3.36, p = .04, \eta^2_p = 0.10$, subsumed a significant duration \times timing interaction, $F(1, 63) = 5.95, p = .02, \eta^2_p = 0.09$. Further statistical analyses indicated that the effect of the timing condition was significant in all age groups (5-6 years: $F(1, 17) = 17.03, p = .001, \eta^2_p = 0.50$; 7-8 years, $F(1, 24) = 7.66, p = .01, \eta^2_p = 0.24$, adults: $F(1, 25) = 19.38, p < .0001, \eta^2_p = 0.43$), while neither the duration effect, nor the timing \times duration interaction were significant (all $p > .05$). The significant 3-way interaction thus mainly suggests that the difference in the temporal variability between the solo and the dual

timing condition was greater for the long than for the short target duration, and in a greater extend in the younger children. Indeed, the dual-solo difference in the temporal variability (averaged over durations) was greater for the youngest children ($M = 3.86$) than for the adults ($M = 0.55$), $t(42) = 3.51, p = .003$). The other age-related differences failed to reach significance (5-6 years vs. 7-8 years ($M = 1.74$), $t(41) = 1.88, p = .07$; 7-8 years vs. adults, $t(49) = 1.86, p = .075$).

The ANCOVA did not find any other significant main effect or interaction, even with the attention scores ($p > .05$). The lack of attention-related effects was likely due to the major effect of age on the temporal variability in this experiment, $F(1, 63) = 38.69, p < .0001, \eta^2_p = 0.19$. As illustrated Figure 45, the 5-6-year-olds' temporal reproduction were particularly variable in Experiment 2 ($M = 4.51$), being more variable than the 7-8-year-olds' ($M = 2.70$), $t(41) = 2.54, p = .02$, and the adults' temporal reproduction ($M = .77$), $t(44) = 6.17, p < .0001$. In addition, while most studies found a close time sensitivity between the 7-8 year-olds and the adults (Droit-Volet, 2013, 2016), in our experiment, the temporal performance remained more variable in the 7-8-year-olds than in the adults, $t(42) = 6.17, p < .001$, suggesting that the task using SOA was particularly difficult for the young children.

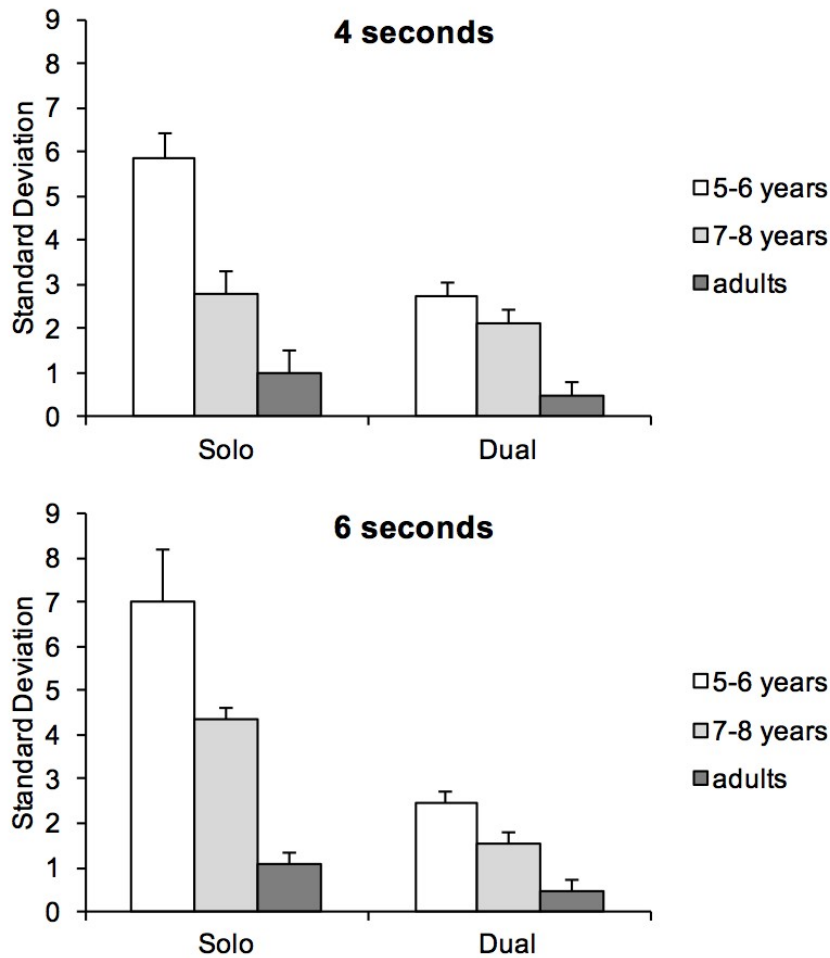


Figure 45. Standard deviation (SD) of reproduced duration with age groups (5-6, 7-8 and adults), for the conditions of timing (solo, dual) and target durations (6, 12s).

Impact of the concurrent durations variables on timing. We then analyzed the effect on timing of different characteristics of the concurrent duration - overlap (16 vs. 33%), presentation order of the target duration (first vs. second), and concurrent duration (short (-2 s) or longer (+2 s) than the target duration) - for both target durations (4 and 6 s). An initial ANCOVA was conducted on the time error with 4 factors and the neuropsychological scores as covariate. This ANCOVA showed two significant 4-way interactions that were difficult to interpret (overlap \times target order \times target duration \times selective attention, $F(1, 63) = 15.90, p < .001, \eta^2_p = 0.20$; overlap \times target order \times target duration \times age, $F(2, 63) = 3.30, p = .04, \eta^2_p = 0.09$). To further understand our results, we thus decided to proceed step by step, by running an ANOVA for each age group taken separately, and then to examine the correlations with the cognitive scores (Figure 46).

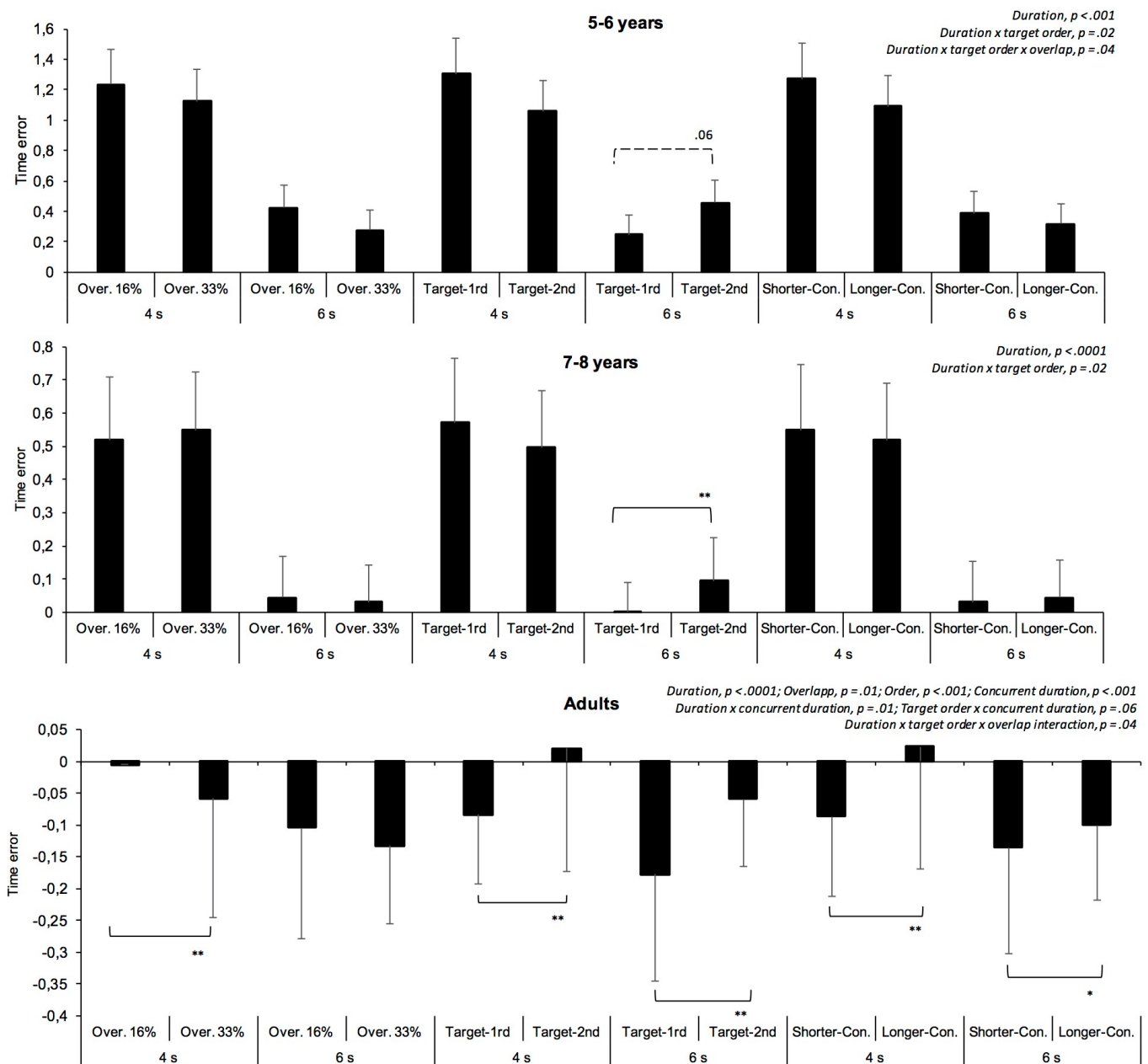


Figure 46. Summarizing graphic of the mean reproduced Temporal Error for each age group according to the each condition of overlap (16, 33%), appearance of the target duration (1st, 2nd) and additional duration (longer, shorter).

In the adults group, the ANOVA found a significant 4-way interaction, $F(1, 25) = 4.41$, $p = .046$, $\eta^2_p = 0.15$, with a significant effect of all characteristics of the multi-timing task (target duration, $F(1, 25) = 18.36$, $\eta^2_p = 0.42$; overlap, $F(1, 25) = 8.15$, $\eta^2_p = 0.25$; target order, $F(1, 25) = 22.99$, $\eta^2_p = 0.479$; concurrent duration, $F(1, 25) = 30.16$, $\eta^2_p = 0.55$, all $p < .01$), and a

significant target duration \times concurrent duration, $F(1, 25) = 10.65, p = .003, \eta^2_p = 0.42$. The target order \times concurrent duration interaction just failed to reach significance, $F(1, 25) = 4.06, p = .06, \eta^2_p = 0.14$. Therefore, in the dual timing condition, the target duration was judged longer (less underestimated) with a small (16%) than a larger (33%) overlap between the concurrent durations. It was also judged longer when the concurrent duration was longer and when the target duration was presented second, after rather than before the concurrent duration. Moreover, the first estimates were judged less accurately in the dual-timing condition than in the single timing target duration (averaged over duration, $t(25) = 2.77, p = .01$). In conclusion, an additional amount of time was added to time estimates when a second duration was simultaneously presented, and the proportion of the temporal extension depends of temporal context as discussed later.

In children, there was a major effect of the target duration (5-6 years, $F(1, 17) = 28.08, \eta^2_p = 0.62$; 7-8 years, $F(1, 24) = 36.91, \eta^2_p = 0.61$), and the target duration interacted with the target duration order (5-6 years, $F(1, 17) = 6.73, \eta^2_p = 0.28$; 7-8 years, $F(1, 24) = 5.51, \eta^2_p = 0.19, p < .05$). The other characteristics of the concurrent duration were not significant ($p < .05$). In fact, in the dual timing condition, a greater lengthening effect only tended to occur in children when the 6-s target duration was presented second, after the concurrent duration (7-8 years, $t(24) = 2.726, p = .01$, 5-6 years, $t(17) = 1.96, p = .066$). However, whatever the target order presentation in the multi-timing condition, the lengthening effect always occurred compared to the single timing condition, for both the target duration presented first (averaged over duration) (7-8 years, 0.27 vs. -0.23, $t(24) = 2.17, p = .04$, 5-6 years, 0.77 vs. -.88, $t(17) = 2.79, p = .01$) and second (7-8 years, 0.30 vs. -0.23 $t(24) = 2.26, p = .03$, 5-6 years, 0.76 vs. -0.88, $t(17) = 2.78, p = .01$). In addition, in the 5-6 year-olds, this lengthening effect of the second duration when the overlap between the two durations to be processed in parallel (the SOA) was short (16 % compared to 33 %) (thus increasing the total time of stimuli presentations), and especially in the case of the short target duration of 4 s, as indicated the significant order \times overlap \times duration target interaction, $F(1, 17) = 5.02, p = .04, \eta^2_p = 0.23$.

Table 10 showed the correlation between the age (in months), the z-scores of attention and working memory and the differences in TE between each characteristics of the multiple tasks for the dual timing condition: dif(16%, 33% overlap), dif(target 1rd, 2nd), dif(shorter, longer concurrent duration). It appeared that the additional lengthening effect as a function of the multi-timing condition was systematically linked to individual attention capacities. Indeed, the lengthening effect greater for the small overlap (16%) (greater SOA) than for the greater

overlap (33%) between durations increased for the participants with poorer attention capacities, at least for the longer target duration of 6 s ($r = .27, p < .05$). The lengthening of time estimates induced by the presentation of the target duration (e.g., after the concurrent duration) or by the longer concurrent duration was also significantly correlated with attention capacities ($r = -.27, r = .47, r = -.25$). However, the direction of the correlation differed as a function of the target duration, being positive for 6 s ($r = .47$), and negative for 4 s ($r = -.27, r = -.25$). In the case of attention test used in our study, a positive correlation indicated an increase of the lengthening effect with the decrease of attention capacities and a negative correlation a decrease of the lengthening effect with the decrease of attention capacities. For the short target duration of 4 s, the age and the working memory also contributed to explain a proportion of variance in the difference indexes (Dif(target 1rd, 2nd), $r = .37, r = .31, p < .05$, respectively; Dif(Shorter, Longer Con.) $r = .30, r = .28, p < .05$). As discussed later, this suggests that other dimensions than attention contributed to explain the value of temporal reproductions in the case of the short target duration. This may explain that the lengthening effect decreased when the participants' attention capacities decreased because the younger children with limited motor or cognitive capacities initially produced long durations for the 4 s duration in a temporal reproduction task (for the same results see e.g., Droit-Volet, Wearden & Zelanti, 2015; Hallez et al., 2018).

Table 10. *Correlations between the age, the attention and working memory scores and the difference in time error between different characteristics of multi-timing in the dual timing condition.*

	Age	Attention	Working memory
4 s - Dif(16%, 33% overlap)	.01	-.15	-.01
6 s - Dif(16%, 33% overlap)	-.10	.27*	-.18
4 s - Dif(target 1rd, 2nd)	.37**	-.27*	.31*
6 s - Dif(target 1rd, 2nd)	-.07	.47**	-.18
4 s - Dif(Shorter, Longer Con.)	.30*	-.25*	.28*
6 s - Dif(Shorter, Longer Con.)	.16	-.08	.13

* $p < .05$, ** $p < .01$

General discussion

In our study, the children and the adults had to simultaneously process several stimulus durations. The stimulus to be judged was unpredictable such as the participants had to pay

attention to all temporal stimuli. The number, the color and the spatial localization of the target stimulus was also unpredictable to avoid attention effects (see Kim, Tsai, Ojemann & Verghese, 2017). In addition, the children only responded for one duration (target) to avoid the competition between outputs for decision and motor programs during temporal reproduction. In the first experiment, we used stimulus durations with the same onset but different offsets to limit the number of varying information to be processed by young children. In the second experiment, we used a more controlling methodology with both different onsets and offsets, allowing us to control both the overlap between the durations (SOA), the presentation order of the target duration and the length of the concurrent duration.

In our two experiments, we found results entirely consistent with those found in developmental studies using a temporal reproduction task (Droit-Volet et al., 2015; Szelag, Kowalska, Rymarczyk & Pöppel, 2002). Indeed, in the single temporal reproduction task, the younger children were less accurate and more variable in their reproduction, although they were capable of temporal discrimination. Beyond these classical developmental findings, our results showed for the first time that the young children, from the age of 5 years, were able to process several durations simultaneously, at least two or three durations. Indeed, their judgments of duration in a multi-timing task remained orderly as in adults. The fact that the temporal discrimination was preserved when multiple durations were processed in parallel in all age groups, and whatever the level of cognitive capacities, suggests that timing durations simultaneously is an early ability. This provides additional evidence for an innate processing of event durations (Droit-Volet, 2016; Droit-Volet & Coull, 2016; Coull & Droit-Volet, 2018).

Our results showed that all the participants were able to time different durations simultaneously, but not independently. A clear temporal interference effect was indeed found in our experiments on the multi-timing. This is consistently with the results of other studies showing that the multiplication of durations to be timed in parallel induced errors in temporal judgment (Brown & West, 1990; Cheng et al., 2014; Klapproth, 2011; Morgan, Giora & Solomon, 2008). These errors resulted in a lengthening of time estimates and not a shortening as for the interference effects with non-temporal information. The difference in the temporal and the non-temporal interference effects on time judgment suggests that the processing of different durations did not compete for attention resources as for the processing of non-temporal information (Hallez & Droit-Volet, 2017). However, even in the case of simultaneous processing of several durations, the importance of interference effects depended on individual cognitive capacities in terms of attention: The lower the attention capacities, the higher the

temporal interference effect was. By contrast, the temporal interference effects were not linked to capacities of short-term memory, working memory and information processing speed, although these capacities, namely working memory, explained the age-related differences in time precision (time variability) in most studies using a single timing task (for a review see Droit-Volet, 2013, 2016). The early ability to time durations simultaneously with temporal interference effects related to attention raises a discussion on the nature of the clock system underlying the representation of time.

Some researchers (Cheng, Yang, Ding & Fan, 2014; Johnston, Bruno & Ayhan, 2011; Johnston, Arnold & Nishida, 2006) assume that individuals use different internal clocks (pacemaker-accumulator systems) for the processing of durations presented in parallel, one for each stimulus duration (Eisler, 1981; Meck & Church, 1984, p. 2). Therefore, each pacemaker generates pulses that increment their own accumulator (Figure 47A). In this case, the pacemaker-accumulator systems are independent and no temporal interference is expected, apart perhaps at memory or decision level. This model is not in accordance with our results showing temporal interference effects in the multi-timing task. In addition, our results showing a decrease of time estimates with the increase of the overlap (30% overlap) between the durations allows us to reject the multiple pacemakers model. Indeed, this shortening with a larger overlap between the durations can only be explained by a single pacemaker that generates pulses shared between multiple accumulators (Van Rijn & Taagten, 2008). With a single pacemaker, there are indeed less pulses that increment each accumulator when two durations are presented concomitantly.

In the opposite direction, other researchers claim that a single pacemaker and a single accumulator (e.g., a master clock) are used to process multiple durations (Figure 47B). This master clock operates continuously the timing, and a series of temporal segments are stored in memory into sequential timing (Bryce & Bratzke, 2016; Church, 1984). In this condition, the first time estimates in the dual-timing condition must be close to that in the solo-timing condition, because the timing is similar. If the first estimate is too long, the second estimate must be also too long, because, in this case, the estimation of the second duration depends on that of the first duration. However, our results showed a lower accuracy of the first presented target duration in the dual-timing condition compared to the single-timing condition. Furthermore, no significant effect of the length of the concurrent duration was observed, at least in the children. In addition, as stated van Rijn and Taatgen (2008, p 368), with “only a single pacemaker and a single accumulator, there is no reason to assume any attention or dual tasking

cost apart from possible dual-tasking penalties in the memory and decision process”. In accordance with this assumption, our results showed that the temporal interference effects were related to attention but not to memory mechanisms.

Therefore, Van Rijn and Taagten (2008) concluded that the best mechanism to account for temporal performance in the multi-timing task is a single pacemaker with multiple accumulators (Figure 47C). They mainly based their conclusion on their findings about the SOA effect on time estimates, i.e., shorter time estimates (or no difference in time estimates) with the decrease of SOA (longer overlap in our study: 33% overlap). Our data replicated this finding by showing shorter time estimates with the longer overlap (33%) between the concurrent durations in the adults, and the effect did reach significance in the children. In addition, our results showed that this shortening effect was directly linked to attention (Table 10). To sum up, the temporal interference effects obtained in our study provide evidence against multiple independent clocks, and in support of a single mechanism that “strategically uses the output of a single time source for parallel timing” (van Rijn & Taatgen, 2008, p. 373). Therefore, this strategically use would depend on development of attention and executive functions.

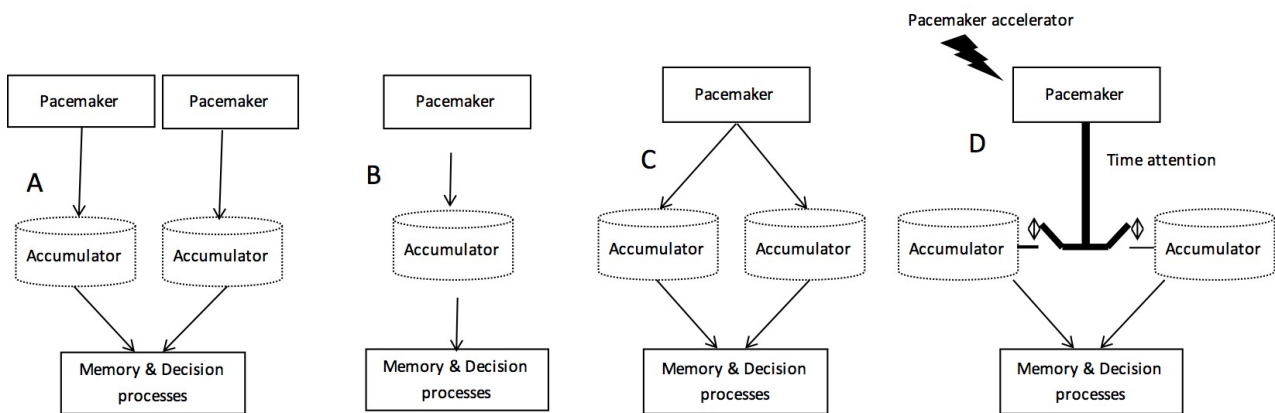


Figure 47. Illustration of the internal clocks adapted from van Rijn & Taagten, 2008 with (A) an internal clock with a single pacemaker and a single accumulator, (B) multiple dependent accumulators, (C) multiple independent accumulators and (D) the model we proposed with multiple independent accumulators.

Nonetheless, van Rijn and Taagten’s model is based on the judgment of two durations processed in parallel and does not consider the increase of the lengthening of time estimates with the number of durations presented simultaneously, but also the increase of time distortions

in children with lower attention capacities. To account for these results, we can suggest to add to their model two mechanisms: a “time accelerator” and a “time attention” mechanism (Figure 47D). The “time accelerator” would increase the rate of time generator (pacemaker) (i.e., accelerate the pulses emission) when several durations have to be timed simultaneously. Its aim would be to limit the temporal impairment induced by sharing attention between several temporal information. This would explain the increase of time estimates observed in our study with the increase of number of durations even when their onsets were synchronous. This increase of pacemaker’s pace would prove to be a very adaptive parameter, increasing its efficiency to compensate for the deficits of attention allocated to time processed caused by the temporal context. The pulses rate would thus be faster in a multi-timing task than in a single timing task. This would explain the important overestimation of time in younger children in the multi-timing task compared to the single timing task, regardless of different characteristics of concurrent durations.

The temporal performance in the multi-timing condition would nevertheless not be limited to this “time accelerator” process. If this was the case, we should not be able to find longer time estimates in children when the target duration appeared first in the dual timing compared to the solo timing. Indeed, when faced with the first duration, the participants did not know in advance that a second duration was coming. They discovered the multi-timing situation only when the second square has appeared. We can thus assume the existence of another “time attention” mechanism which supplies the parallel accumulators each given the current value of their matched duration. Therefore, the internal clock speeds up in order to increase its sensitivity to face the attention deficit generated by the multi-timing context. Then, when the first duration come to an end, if the participants’ attention capacities are limited, the attention switch does not open immediately at the end of the stimulus duration, such that some pulses (time units) dedicated to the second duration would incidentally fall into the wrong accumulator (that of the other duration). For the participants with low attention capacities, there are thus more switching errors, i.e. temporal interference.

We assume a “time accelerator” and a “time attention” process that both produce longer time estimates, thus resulting from the faster clock rate and the accumulator-switching errors. However, when durations are presented simultaneously, it is also normal that the pulses sharing generates a shortening of time estimates which increases of the overlap between concurrent durations. The longer time estimates either caused by the “time accelerator” (for the accumulator paired with the second duration) or by the licking of these pulses (for the

accumulator paired with the first duration) is indeed reduced when both durations have to be processed simultaneously as further pulses are required. Our model thus allows us to explain the variation of temporal performance as a function of temporal context with one single pacemaker-like system (clock system) that serves different accumulators by an unique attention switch mechanism.

Both our data and our model therefore highlight the critical role of selective attention for multi-timing. Several developmental studies have already established the close relationship between time distortions and individual attention capacities. It has been demonstrated that young children with lower attention abilities are more subject to time distortion (for a review see Droit-Volet, 2018; Coull & Droit-Volet, 2018). Nonetheless, limited attention capacities have been linked to time contraction in a single timing task, or a dual-task with non-temporal information (Hallez & Droit-Volet, 2017). To our knowledge, our study is the first one that demonstrates a link between attention and time dilatation. Limited attention capacities in individuals therefore allow to predict time distortions but their direction toward a shortening or lengthening depends on context and nature of information to be processed, i.e., temporal or non-temporal.

Other experiments must be conducted to test our model and to further understand the development of simultaneous timing of durations as a function of context encountered. In this case, it would be interesting to test the multi-timing in other tasks than that of temporal reproduction used in our experiments. Indeed, the participants' performance in the temporal reproduction task indicated a violation of the scalar property of time as illustrated Vierord's law found in our results. In addition, as suggested above, in this task, other mechanisms related to motor abilities and motor inhibition could interfere with young children's temporal performance (Droit-Volet, 2010). Other experiments would also help us to better understand the puzzling results indicating a higher temporal variability with the dual-timing compared to the single timing in Experiment 1, and a lower temporal variability in Experiment 2. This suggests that the most proportion of noise in time judgment do not come from the temporal encoding *per se* of several durations, but rather from changes in their concurrent presentation, that blurs the signal, namely the SOA, as well as the different time onsets that affect the distance between the target duration. Now, it is clearly stated that the judgment of duration further rely on experienced duration when signal is getting fuzzier (Jazayeri & Shadlen, 2010; Körding & Wolpert, 2004; Petzschner & Glasauer, 2011). Therefore, the role of prior experience must be also investigated in the multi-timing condition.

In summary, our study reveals that young children, like adults, are able to time different durations simultaneously. However, in children, as in adults, the time estimates were judged longer in the multi-timing than in the single timing condition, and this lengthening effect increases with the number of durations to be timed in parallel. Our results showed that this temporal interference effect in the multi-timing was related to attention. Indeed, the interference effect increased when the individual attention capacities were poorer. Therefore, the simultaneous processing of durations improves during the development with the general development of attention functions. This allows us to propose a model with a single timer connected to multiple accumulators via an unique switching mechanism whom functioning improves with the cognitive development.

I – 5. Etude de la contraction temporelle causée par un distracteur en situation de bissection temporelle chez des enfants âgés de 5 à 8 ans.

Time contraction caused by a distractor in young children depending on the temporal placement of the non-temporal information.

Données préliminaires

Time contraction caused by a distractor in young children

Données préliminaires

The purpose of this study was to examine the extent to which inter-individual differences in attention abilities reflect the magnitude of the temporal shortening effect produced by an attention distractors. Children aged from 5 to 8 years were given a temporal bisection task with distractors, that either did or did not appear during the presentation of the stimulus duration to be estimated. Two duration conditions were used: a short (400-1500ms) and a longer duration condition (600-2400ms). In addition, each participant's capacities in terms of memory (short-term and working memory) and attention (selective attention and inhibition) were assessed using different neuropsychological tests. The results showed a shortening effect for the distractor trials compared to the no-distractor trials. However, no significant interaction was found between the age and the distraction condition for both the Bisection Point and the Weber Ratio, suggesting no age-related difference in time distortions produced by an attention distractor. This lack of significant age x distractor interaction can be due to the distractor that would produce a brief closure of the attentional switch similar across ages from 5 to 8 years. However, before being able to conclude another age group with older children or/and adults must be tested. In this chapter, we will thus only present the procedure used and our initial finding.

Introduction

As explained in introduction, it is important to examine the effect of each attention dimension on time judgments. We have conducted two studies using the dual-task paradigm in which the age-related differences in temporal performance depends on the individual resources. We thus decided to conduct a new study using attention distractors that request attention mechanisms related to inhibition rather than to working memory or selective attention, although these different cognitive mechanism may be intertwined. Therefore, in this study, children aged from 5 to 8 years were given a bisection task with distractors that occurred or not during the stimulus duration to be estimated. In addition, their attention capacities in terms of selective attention or inhibition were tested as well as their working memory capacities.

Method

Participants

The participant sample consisted of 95 children, twenty-four 5-year-olds (10 girls and 10 boys; mean age = 5.58 years, $SD = 0.25$), twenty-five 6-year-olds (13 girls and 12 boys; mean age = 6.42 years, $SD = 0.25$), twenty-four 7-year-olds (10 girls and 14 boys; mean age = 7.50 years, $SD = 0.33$) and twenty-six 8-year-olds (16 girls and 10 boys; mean age = 7.74, $SD = 0.26$). The children were recruited from different nursery and primary schools, all located in the municipality of Issoire, France. The children's legal guardian signed written informed consent for their participation in this experiment. This study was carried out according to ethical standards of the French law: in accordance with the principles of 1964 Helsinki's declaration with a procedure approved by the academy committee of the French National Education Ministry and the ethic committee of research IRB-UCA

Material

In a quiet and neutral room of their schools, children were tested individually using a computer balinea o.book 5,1. Experimental events and data recording were controlled by E-prime 2.1 software (Psychology Software Tools, Pittsburgh). The stimulus used for the bisection task was a blue filled circle, 4.5 cm in diameter, presented in the center of the computer screen. During the training phase, post-response feedback was given in the form of a picture of SpongeBob who was either smiling (after correct responses) or crying (after incorrect ones). SpongeBob picture was also presented in the center of the computer screen and displayed for 2 seconds. The children answered orally to the temporal bisection task and the experimenter pressed the corresponding keyboard key response ("S" for "short" and "L" for "long"). The

distractor took the form of a 4-cm diameter circle and was randomly selected among 10 different complex rosettes (Figure 48). The spatial location of the distractor was made random with the constraint of being presented at 4 cm of the temporal stimulus (blue circle). The moment of appearance of the distractor was randomly drawn according to a temporal window [50; $d - 50$ ms], where d is the duration of the temporal stimulus, with the constraint to present at least 2 times the distractor in each of the 3 thirds of the duration of the stimulus.

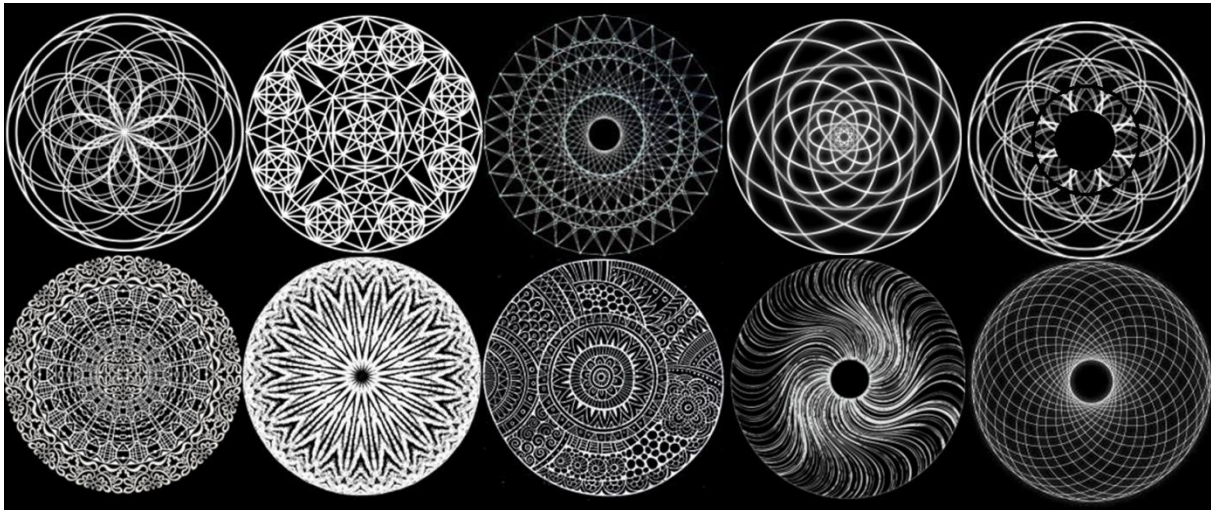


Figure 48. Illustration of the complex circles used as distractor

Procedure

Temporal task. All children performed two temporal bisection tasks, one for the short duration condition and the other for the longer duration condition. The presentation order was counterbalanced across participants, with one task per day. For the short duration, the short standard duration was 400ms and the long standard duration was 1500ms. The comparison were 400, 675, 950, 1225 and 1500ms. For the longer durations, the short and the long standard duration was 600ms and 2400ms, respectively, and the comparison durations: 600, 1050, 1500, 1950 and 2400ms.

For each temporal bisection task, the children performed 3 successive phases: a pre-training phase, a training phase and a testing phase. In the pre-training phase, they were presented twice with the “long” and the “short” standard duration. The experimenter told them “Look, this is the short circle. It stays on the screen for a short time” for the short standard duration, and “Look, it’s the long circle. It stays on the screen for a long time” for the long one.

In the training phase, the children were given a block of 8 trials, four trials for each standard duration, with a random presentation. Each trial began with the word "ready" after an

inter-trial interval randomly selected between 500 and 1000ms. When the child was judged ready, the experimenter pressed the spacebar to trigger the temporal stimulus presentation after a fixed time of 250ms. The children then answered “short” or “long” when they judged that it was the short or the long standard duration. The children received feedback: the picture of the smiling SpongeBob for a correct answer and that of the crying SpongeBob for an incorrect one. The children were given the testing phase after a successful training block, i.e., 75% of correct responses. The experiment stopped after 3 unsuccessful training blocs.

In the testing phase, the temporal task was the same than that used in the training phase except the comparison durations, the distractors, and the feedbacks that were no longer displayed. The experimenter said: “Great! Let’s continue playing, but watch out! Now small circles can come on the screen to distract you, but don’t pay attention to them”. The children performed 8 trials for each of the 5 comparison durations in the condition with and without distractor (80 trials), all presented in a random order.

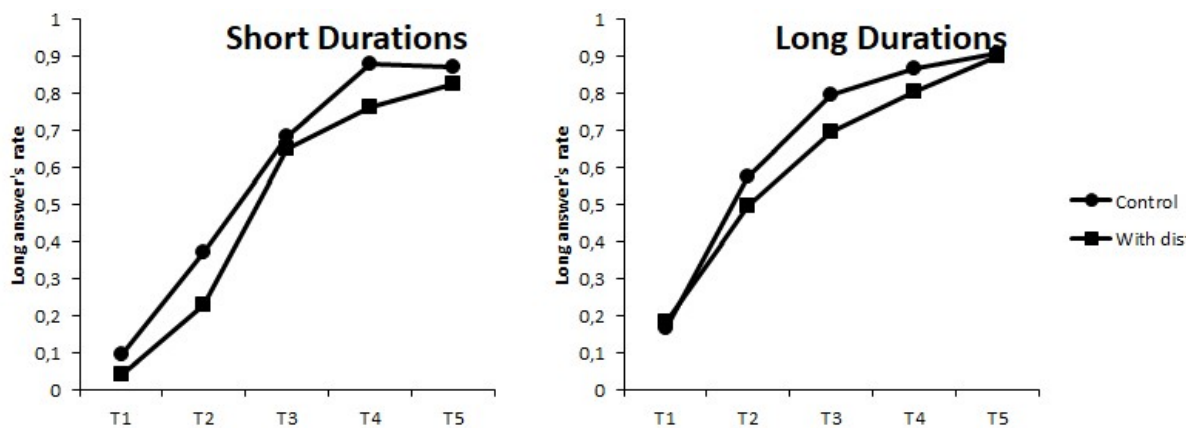
Neuropsychological tests. Subsequently, each child had to complete 3 neuropsychological tests randomly addressed. The first was the “Sky Search” subtest of the Test of Everyday Attention for Children allowing to assess the selective attention (Manly, Robertson, Anderson, & Nimmo-Smith, 1999, Manly et al., 2001). In this test, a large sheet of 130 pairs of 5 different spacecrafts was presented to the child who had to pair all of the identical spacecrafts as quickly as possible (score = required time / spacecraft found). The second was the Corsi-block tapping test (Corsi, 1972). In this test, the child immediately repeated in the same order (short-term memory), and the reverse order (working memory), the sequence of tapping blocks presented by the experimenter. There were 8 tapping sequences ranging from 2 to 9 blocks, with two trials per block sequence. The test stopped when the child failed both trials of the same sequence. The third test was the “Knock and Tap” subtest of the Nepsy (Korkman, 1997) assessing inhibition capacities. For the first sequence of this test, the child had to immediately perform the opposite of the experimenter's gesture (to tap if the experimenter knock and vice versa). For the second sequence, the task was more difficult, when the experimenter knock, the child had to put his fists in the palm of his hand, when he knocked, he/she was not supposed to do anything, and when he put the fist in the palm of his hand, he/she had to knock. Each phase consisted of 15 items/actions. The test stopped after four wrong actions.

Results

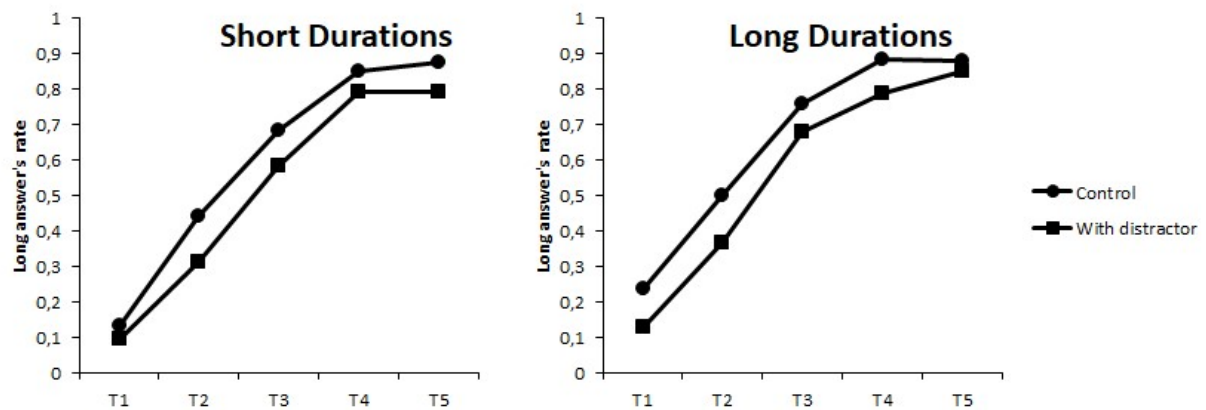
Temporal performances

Figure 49 shows the mean proportion of long responses during the testing phase plotted against comparison duration, for the distractor and the non-distractor trials, in the short and the long duration condition for each age group.. Inspection of Figure suggests a shifting of the bisection curves toward the left with the distractor compared to control trials, indicating a shortening effect.

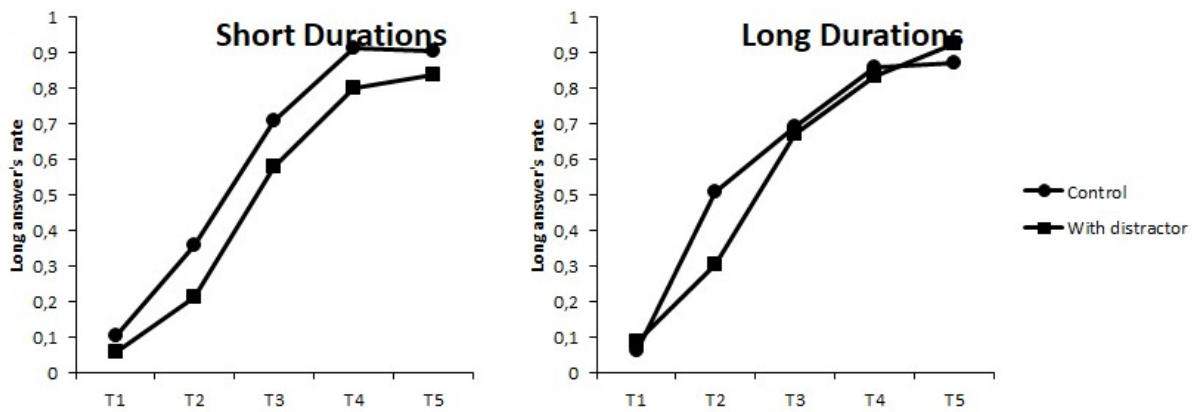
5 years



6 years



7 years



8 years

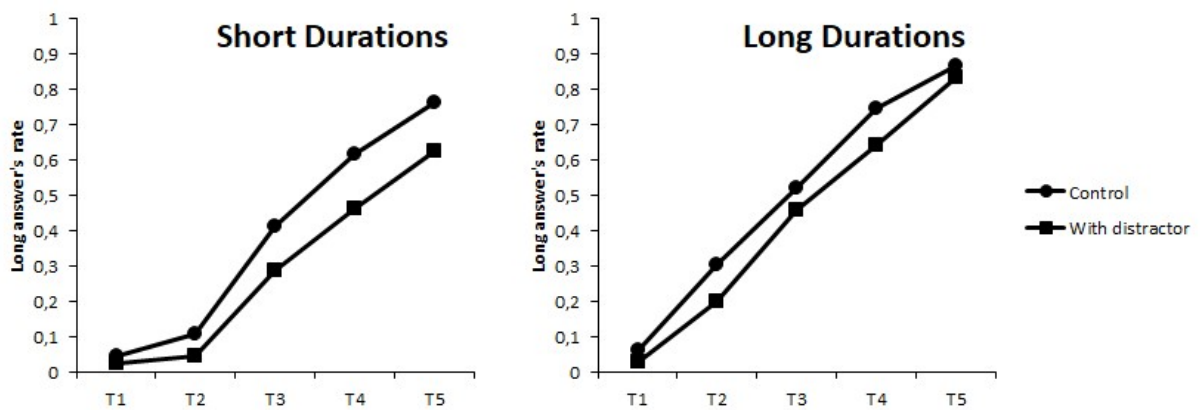


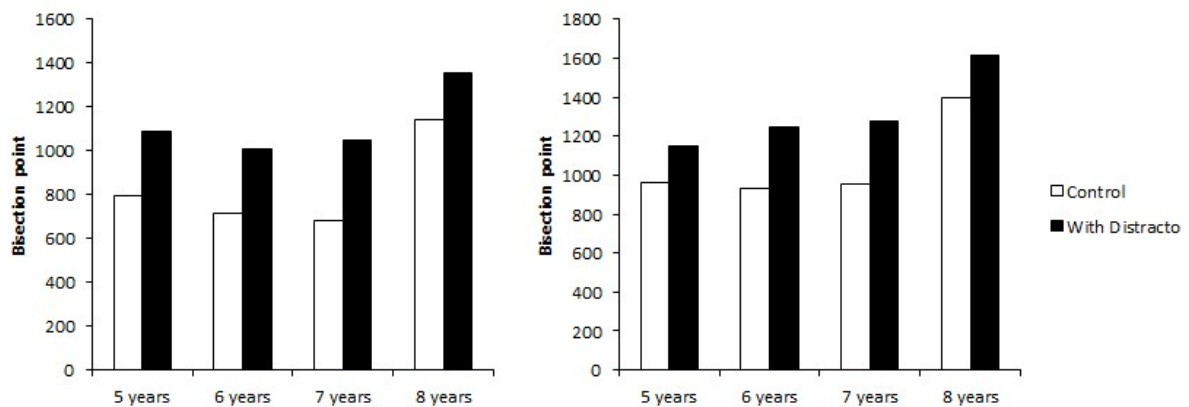
Figure 49. Proportion of long responses - $p(\text{long})$ - plotted against the stimulus durations for the trials with and without distractor in the short (400-1500ms) and the long (600-1950ms) duration condition for 5-, 6-, 7- and 8 years.

In further analyses this magnitude of this shortening effect and its variation across the age groups, we measured the Bisection Point (BP) and the Weber Ratio (WR) on each subject's curve in each distractor condition. The BP refers to the temporal stimulus giving rise to $p(\text{long}) = .50$. The WR is a measure of variance and represents the difference limen divided by BP. Although there are various ways of calculating it, the different methods led to very similar results (Wearden & Ferrara, 1995). We thus decided to use the Pseudo-Logistic Model (Killeen, Fetterman, & Bizo, 1997) as it has been widely used and provided very good fits to bisection data (Allan, 2002; Brown et al., 2011; Grommet et al., 2011). The PLM fitted well our data (mean $R^2 = 0.90$). Nonetheless, this fitting failed for 4 children, so that they results were excluded from the statistical analysis.

Figure 50A showed the BP thus obtained in each age group. An analysis of variance (ANOVA) was first performed on the bisection points with two within-subjects factor (duration, distractor condition) and a between-subject factor (age). This ANOVA showed a main effect of Duration, $F(1, 91) = 60.36, p < .001, \eta^2_p = .41, (1 - \beta) = 1$, indicating a higher BP for the long ($M = 1202.57$) than for the short duration condition ($M = 884.64$). The main effect of age also reached significance, $F(3, 91) = 27.28, p < .001, \eta^2_p = .49, (1 - \beta) = 1$. Additional independent t-test revealed that differences in the BP was between the 8-year-olds and the other children in all younger age groups (all $p < .0001$), no difference in BP being observed between the other groups. This suggests that the age groups used was enough discriminating to find developmental effects. The ANOVA also revealed a main effect of Distractor, $F(1, 91) = 46.71, p < .001, \eta^2_p = .35, (1 - \beta) = 1$, with a higher BP with than without (1231.21 vs. 957.60), consistent with shortening effect. However, the magnitude of this shortening effect produced by an distractor was similar across ages. Indeed, the interaction distractor * age did not reach significance, $F(3, 83) = 0.34, p = .79$. The other interactions also failed to reach significance (Duration * Age: $F(3, 83) = 0.75, p = 0.52$; Duration * Distractor: $F(1, 91) = 2.07, p = .15$, Duration * Distractor * Age: $F(3, 91) = 0.84, p = .47$).

An ANOVA was also conducted on the WR (Figure 50B). Surprisingly enough there was neither main effect of age, $F(3, 91) = 0.64, p = .59$, nor interaction involving the age (duration * age, $F(3, 85) = 0.29, p = .83$, distractor * age, $F(3, 91) = 1.27, p = .29$; Range * distractor * age interactions, $F(3, 91) = 0.30, p = .82$. There was also no significant effect of distractor, $F(1, 91) = 2.07, p = .15$. The duration * distractor interaction, $F(1,91) = 1.81, p = .18$, and the duration effect, $F(1,91) = 0.87, p = .34$, were also no significant.

A



B

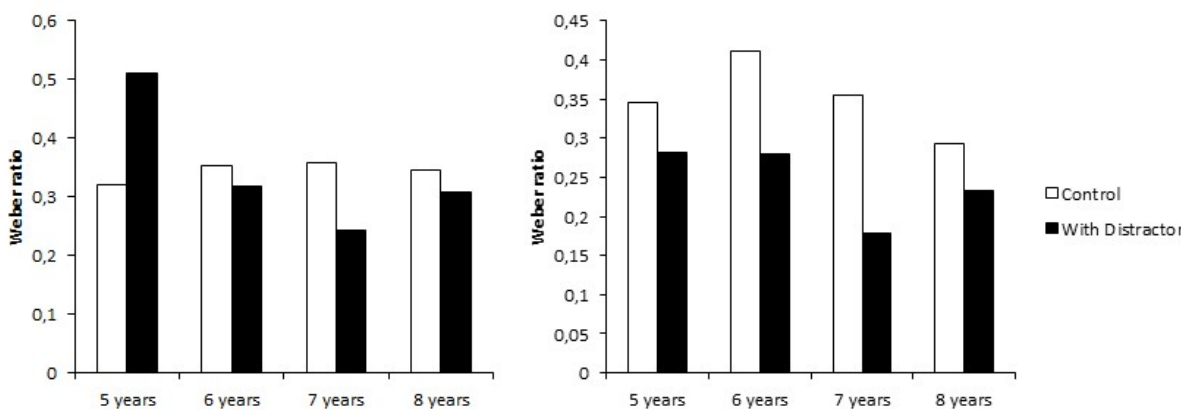


Figure 50. Mean (A) Bisection point and (B) Weber Ratio for each age (4, 6, 7 and 8 years old) and condition (with or without distractor).

Correlations between the underestimation of time and the cognitive abilities

Table 11 showed the children’s scores on the different neuropsychological tests. For each test, there was a significant effect of age: short-term memory, $F(1, 93) = 12.77, p = .001, \eta^2_p = .12, (1 - \beta) = .94$; working memory, $F(1, 87) = 8.10, p = .006, \eta^2_p = .09, (1 - \beta) = .80$; inhibition, $F(1, 93) = 5.05, p = .027, \eta^2_p = .05, (1 - \beta) = .60$; selective attention $F(1, 95) = 6.91, p = .01, \eta^2_p = .07, (1 - \beta) = .74$. Thereby, this suggests that the older the children were, the higher their scores on the different neuropsychological tests.

Table 11. Mean, Standard Deviation, minimum and maximum of the raw scores of different neuropsychological tests.

	5 years			6 years			7 years			8 years		
	M	SD	[Min, Max]	M	SD	[Min, Max]	M	SD	[Min, Max]	M	SD	[Min, Max]
Short-term memory	3.47	1.39	[1; 6]	4.21	1.86	[1; 8]	4.79	1.82	[2; 8]	4.65	0.93	[2; 6]
Working memory	3.00	1.80	[1; 8]	3.78	2.23	[2; 8]	4.57	1.83	[2; 8]	3.92	0.79	[2; 5]
Inhibition	24.28	8.24	[5; 30]	26.20	4.86	[15; 30]	28.29	3.00	[17; 30]	26.61	4.83	[16; 30]
Selective attention	12.74	5.80	[5; 25]	9.97	3.34	[6; 18]	8.70	3.08	[4; 18]	6.69	1.47	[4; 11]

Table 12 showed the correlations between the underestimation of time from control to distractor trials. As presented, none of our psychological dimension predicted the underestimation. An additional regression analysis was run on the total underestimation of time and our different cognitive abilities. The ANOVA showed a marginal effect of inhibition ($\beta = -.21, p = .09$) while other dimensions failed to reach significance (Age: $\beta = .06, p = .51$; Short-term memory: $\beta = -.07, p = .57$; Working memory: $\beta = -.21, p = .86$; Selective attention: $\beta = .02, p = .87$).

Table 12. Mean, Standard Deviation, minimum and maximum of the raw scores of different neuropsychological tests.

	Control – Distractor trials short durations	Control – Distractor trials long durations
Age in month	.09	-.05
Short Term Memory	.06	-.16
Working Memory	.12	-.05
Selective Attention	-.14	.07
Inhibition	.15	.10

* $p < .05$

** $p < .01$

Discussion

The effect of inhibition seems to be more intensely apparent than other neuropsychological variables on this underestimation between control and distractor-trials. Nevertheless, more subjects need to be integrated within this study to (1) obtain an effect of age on standard deviations, which is normally a typically obtained effect, and (2) validate the direct effect of inhibition on the underestimation due to the presence of a distractor.

Nevertheless, it seems quite likely that the inhibition is at the basis of this underestimation and that it reflects the action of a switch that closes when the task is temporal and opens when the task is non-temporal. This assumption is also based on the lack of effect of duration. This suggests a common process of interference that is constant and not relative to the duration.

In addition with our commitment to increase the sample by integrating adults on this study, we plan to launch a second study to determine the influence of the distractor positioning in the estimation of time. So, if the inhibition is really the master dimension of the switch mechanism, then we should not find an underestimation of time in the younger children when the distractor appears early, since the younger ones should not have the time to close this switch. Conversely, interference should be increasing with age depending on the placement of the distractor and this should correlate directly with inhibition.

AXE II – TEMPS ET CONTEXTE

II – 1. Expérience testant l’effet de la modalité sensorielle sur le jugement du temps dans une tâche de bissection temporelle.

Droit-Volet, S., & Hallez, Q. (2018). Differences in modal distortion in time perception due to working memory capacity: a response with a developmental study in children and adults. *Psychological research*, 1-10.

Introduction

At all ages, we are subject to time illusions, also known as time distortions, with time seeming to pass more quickly or slowly than in reality. However, time distortions are often larger in young children, suggesting that they may be more sensitive to time illusions. The aim of this study is to investigate why time distortions are greater in young children.

Among the time distortions, the most frequently studied are probably those due to the effect of sensory modality. Indeed, it has been widely demonstrated in adults that auditory stimuli are judged to last longer than visual stimuli of an identical duration when these two types of stimuli are presented in the same, but also in different sessions (Asaoka & Gyoba, 2015; Chen & Yeh, 2009; Goldstone & Goldfarb, 1964a,b; Goldstone & Lhamon, 1972, 1974; Grondin, Meilleur-Wells, Ouellette, & Macar, 1998; Lustig & Meck, 1998; Ortega, Lopez & Church, 2009; Penney, Gibbon, & Meck, 2000; Penney, 2003; Rammsayer, Bortner & Troche, 2015; Stauffer, Haldemann, Troche, & Rammsayer, 2012; Walker & Scott, 1981; Wearden, Edwards, Fakhri, & Percival, 1998; Wearden, Todd & Jones, 2006).

While this phenomenon seems to be well established, there is a debate about the mechanisms underlying the temporal representation of sensory stimuli (Buetti, 2011). In the framework of the Scalar Expectancy Theory (Gibbon, 1977; Church, 1984; Gibbon Church & Meck, 1984), based on the internal clock models (Creelman, 1963; Treisman, 1963), temporal estimates depend on the number of temporal units (pulses) accumulated during the encoding of time. The SET assumes that the internal clock is composed of (1) a pacemaker-like system that generates pulses, (2) a counter that accumulates these pulses, and (3) an attention-controlled switch that modulates the flow of pulses entering into the counter. Most authors thus defend the idea that modality differences in time judgment are due to differences in this clock system, with the clock running faster for auditory than for visual stimuli (e.g., Wearden et al., 1998; Penney et al., 2000). When the clock runs faster, more pulses are emitted and accumulated, and the duration is judged longer.

However, as discussed below, it remains unclear why the speed of the clock system would be faster in the auditory compared to the visual modality. In addition, increasing numbers of researchers argue that there are different modality-specific clock systems, while others claim that there is a single modality-independent system (Buetti, 2011; Stauffer et al., 2012). Nevertheless, they all agree that temporal resolution is finer for auditory than for visual stimuli and that this is related to the fact that the physiological processes are faster in the auditory than

in the visual sensory system. The latencies of neuronal responses are indeed much shorter in the primary auditory cortex than in the primary visual cortex (Recanzone, 2009). In the SET framework, this faster physiological activity for auditory than for visual stimuli would result in a faster pulse emission rate from the pacemaker of the internal clock. However, although also agreeing that this modality effect is located in the clock system, other researchers consider that it is to be found not at the level of the pacemaker, but at the level of the attention-controlled switch/accumulator, which is thought to operate more efficiently for the processing of auditory information than for that of visual information (Penney & Turret, 2005; Rousseau & Rousseau 1996). Attention would therefore be directed more efficiently towards the processing of time for auditory than for visual stimuli. It would also be sustained better throughout the stimulus presentation (Penney, 2003). In the SET, this leads to an earlier switch closure, with switch closure latencies being less variable and less interruption occurring during time processing. Consequently, fewer pulses would be lost during the temporal coding of auditory information, thus producing a lengthening effect in the auditory compared to the visual modality.

The role of attention-related processes in the modality effect on time perception is consistent with recent results suggesting that the modality effect is mediated by high-order cognitive processes, at least for durations greater than 500 ms (Rammsayer et al., 2015; Stauffer et al., 2012). As stated by Rammsayer et al. (2015), for long durations, the processing of time would depend on cognitive processes rather than sensory-specific timing mechanisms. More precisely, although both would operate for the timing of long durations, the influence of the sensory-specific mechanisms quickly decreases with increasing duration length.

Very few studies have investigated sensory modality effects on time judgment in typically developing children (for a review, see Droit-Volet, 2013, 2016; McCormack, 2015). The two studies conducted in young children with the auditory and the visual stimuli presented in the same session found time distortions in children aged from 4 to 9 years as well as in adults, and this for different ranges of durations going from a few hundred milliseconds to several seconds (Droit-Volet, Meck & Penney, 2007; Droit-Volet, Turret, & Wearden, 2004). However, two developmental changes were found. First, the size of the time distortion was greater in the younger children. Second, the time distortion in children appeared to be higher for the long durations (from 2.5 to 6 s) (Droit-Volet et al., 2007) than for the short durations (from 0.20 to 0.80 s) (Droit-Volet et al., 2004). For the long durations, the developmental differences in the sensory modality effect on time judgement is probably not due to age-related differences in the sensory mechanisms *per se*, as the sensory systems are fully matured at these

ages, although subtle changes occur in somatosensory cortex until 17 years (e.g., Atkison, 2000; Litovsky, 2015; Truett, Hume, Wood & Goff, 1984).

Instead, the developmental differences in the sensory modality effect on time judgement are more likely to result from children's cognitive capacities, which are limited in young children (Bjorklund & Causey, 2018; Garthercole, Pickering, Ambridge & Wearing, 2004; Rustic & Enns, 2015). Recently, Zélanti and Droit-Volet (2012) examined the processing of time in children in each sensory modality and tested in separate sessions. Their findings showed a higher temporal sensitivity in the auditory than in the visual modality, with temporal discrimination capacities increasing more quickly with age in the auditory modality. In addition, they assessed the children's cognitive capacities with different neuropsychological tests, and found that temporal performance was significantly correlated with the short-term memory capacities for the auditory modality and with attention capacities for the visual modality. They therefore concluded that the temporal processing of visual stimuli is more cognitively demanding in terms of attention.

In the case of visual stimuli, children do indeed have to direct attention to the physical source of presentation of visual information (i.e., computer screen) in order to detect the onset of the duration of the presented stimulus. In contrast, auditory stimuli are always heard, whatever the children's behavior, and their temporal processing therefore demand less attentional effort (Droit-Volet et al., 2014). The development of selective attention abilities may thus go a long way to explaining the age-related differences in the modality effect on time judgment. However, children also have to continue to allocate attention to ongoing temporal information, and to store and keep the information active in memory until its judgment. The development of short-term and working memory capacities may thus also contribute to temporal modality effects. The aim of the present study was to try to examine this question by assessing the individual differences in selective attention, short-term memory and working memory capacities in participants of different ages characterized by different levels of cognitive capacities. Information processing speed capacities were also assessed because the development of working memory involves changes in processing speed (Cowan et al., 1998).

The aim of this study was therefore to further investigate modality differences in the discrimination of durations in children and adults when visual and auditory stimulus durations are presented in the same session. Children aged 5 and 8 years, as well as adults, therefore performed a temporal bisection task in the seconds range with these two stimulus modalities. In addition, the participants' cognitive capacities in terms of memory and attention were

assessed using different standardized and validated neuropsychological tests. Our hypothesis was that the size of the modal time distortions would decrease with age in response to the increase in cognitive capacities.

Method

Participants

The final sample consisted of sixty-four participants, all recruited in the Auvergne region (France): twenty-five 5-year-olds (mean age = 5.67, SD = 0.33), nineteen 8-year-olds (mean age = 7.9, SD = 0.53), and twenty undergraduate psychology students from Clermont Auvergne University (mean age = 20.38, SD = 2.42). Five additional children were initially recruited (four 5-year-olds and one 8-year-old) but were excluded from the final sample because they always responded short or long, i.e., for all comparison durations presented both in the auditory or the visual modality. This experiment was conducted in accordance with the 1964 Helsinki declaration. All children were voluntary to participate in this study. The children's parents, and the students signed written informed consent to participate in this study, which was approved by the ethical standards of the French national research committee and the academy of the French National Education Ministry. The adults received course credits for their participants and the children a cartoon picture.

Material

The participants were seated in a quiet room in front of a computer that controlled the experimental events via E-prime. The children gave their responses orally, while the adults responded by pressing on the keys (d, k) on the computer keyboard. The auditory stimulus was a 500-Hz tone (60 dB) (SoundEdit software, synthetic piano time). The visual stimulus was a blue circle (6 cm in diameter) presented in the center of the computer screen. Furthermore, the participants received feedback for the short and the long standard duration in the form of a 500-ms picture: a cartoon picture that varied from trial to trial for a correct response (positive feedback), and an unhappy Calimero for an incorrect one (negative feedback).

Procedure

Bisection task: The stimulus durations used were 4 and 8 s for the short (*S*) and the long standard duration (*L*) and 4, 4.67, 5.33, 6.00, 6.67, 7.33 and 8 s for the comparison durations. The bisection task was composed of two phases: training and testing. In the same training phase (8 trials), the participants were initially presented with *S* and *L* twice that were presented in both

modalities, i.e. in the auditory and the visual modality (2 trials x 2 durations x 2 modalities). They were then trained to respond “Short” and “Long” for *S* and *L*, respectively, on 16 trials with 8 trials for each modality (i.e., 4 trials x 2 durations x 2 modalities). The trial order was random. A correct or incorrect response was followed by the corresponding feedback (positive vs. negative). A 500-ms interval separated each trial. Each trial began with the word “ready” and was initiated by the participant or, in the case of the children, by the experimenter when the participant was ready.

In the testing phase, the trials were the same as those used in training with the stimuli duration presented in both modalities, except for the comparison durations and the fact that no feedback was given for the durations different from *S* and *L*. The participants performed 140 trials composed of 10 blocks of 14 trials: i.e., 7 trials (for the 7 comparison durations) presented in both the auditory and the visual modality. The trials were presented randomly in each trial block. After a series of 4 and of 3 blocks, the participants were again presented with *S* and *L* in the two sensory modalities (8 trials).

Neuropsychological test: After the bisection task, the children performed a series of reliable and validated neuropsychological tests designed to assess their cognitive capacities in terms of memory, attention and processing speed. To assess their short-term and working memory, the forward and the backward Corsi test was used (Wechsler Memory Scale, Wechsler, 1998). In this test, the participants reproduced a block-tapping sequence in the same order as that produced by the experimenter (short-term memory) and in the reverse order (working memory). To better assess the children’s abilities to update information and maintain new information in working memory, we also measured the attention concentration index of the CMS (Children Memory Scale, Cohen, 1997). This index is based on the scores on two subtests. The first measures digit memory (forward and backward digit span) and the second (sequence subtest) the capacity to mentally manipulate a sequence of verbal material as quickly as possible. Selective attention was assessed using the map mission test of the TEA-CH (Manly et al., 1999). In this test, the participants circled a specific symbol on a detailed map with several symbols for 1 min. Finally, we calculated the processing speed index of the Wechsler Intelligence Scale. This index was obtained by adding together the scores on the coding and the symbol search subtests. In the coding subtest, the participants had to copy, as quickly as possible, symbols that were paired with shapes. In the symbol search subtest, they were presented with rows composed of different shapes (left column), with each row being associated

with target shapes (right column). Their task was thus to identify in a short, limited time whether or not the target shapes were present in the corresponding row of shapes.

Results

Temporal Performance

Proportion of long responses. Figure 51 shows the proportion of long responses [$p(\text{long})$] plotted against comparison durations for the auditory and the visual stimuli. In all age groups, there was a leftward shift of the psychophysical function for the auditory stimuli compared to the visual stimuli, indicating a distortion in time judgment when the durations were presented in two different modalities. However, this time distortion was higher in the youngest children aged 5 years and progressively decreased with increasing age. The ANOVA on $p(\text{long})$ with two within-subjects factors (modality, duration) and one between-subjects factor (age) confirmed this description of the results. There was indeed a main effect of modality, $F(1, 61) = 59.43, p = .0001, \eta^2_p = .49$, as well as a modality x age interaction, $F(2, 61) = 5.66, p = .006, \eta^2_p = .16$. There was no other significant effect (modality x duration, age x modality x duration, $p > .05$), except for a main effect of duration, $F(6, 366) = 362.29, p = .0001, \eta^2_p = .86$, and an age x duration interaction, $F(12, 366) = 16.88, p = .0001, \eta^2_p = .36$, that indicated that $p(\text{long})$ increased with the length of the stimulus durations, even though the slope of the psychophysical function increased with age as would be expected if there is a developmental improvement in time sensitivity (see results on the WR). The modality x age interaction indicated that the magnitude of the difference in $p(\text{long})$ between the auditory and the visual stimuli was higher in the 5-year-olds ($M = .20, SE = .03$) than in the adults ($M = .07, SE = .03$) (Bonferroni, $p < .05$), with the 8-year-olds obtaining intermediate scores that did not differ from those of the younger and older age groups ($M = .12, SE = .03, p > .05$).

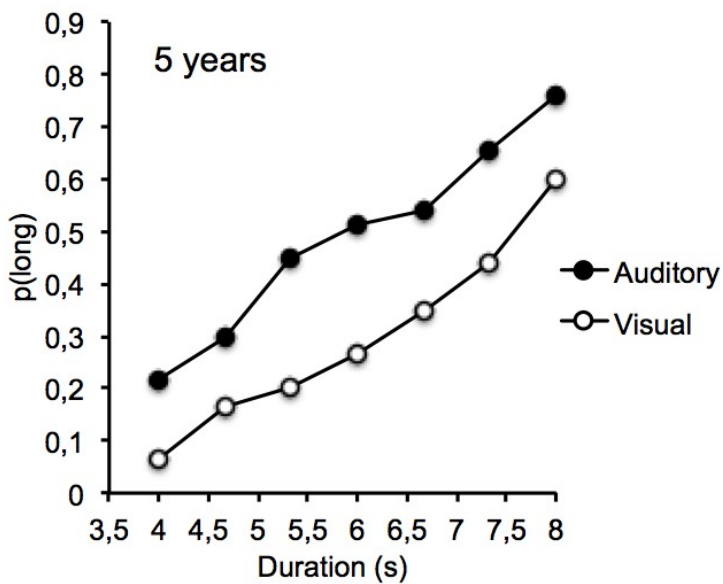
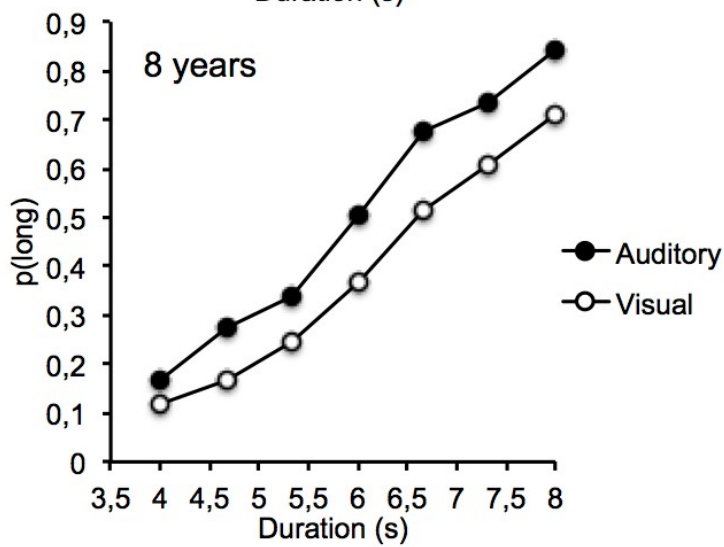
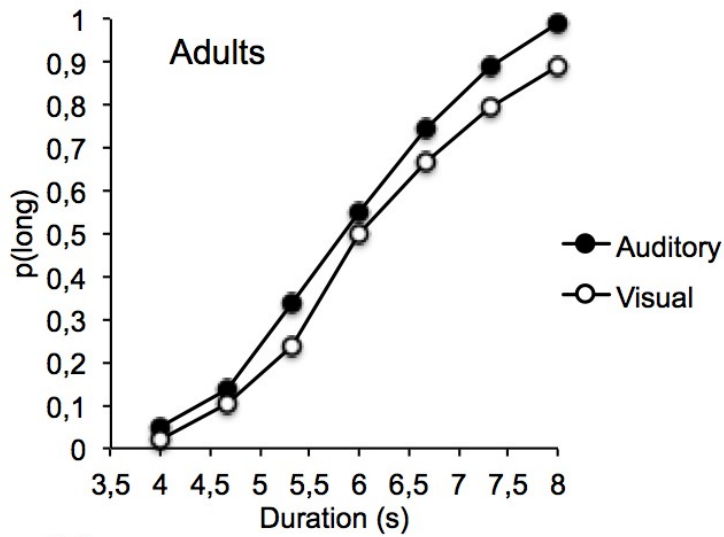


Figure 51. Proportion of long responses plotted against comparison durations for the auditory and the visual stimuli for the adults, the 8-year-olds and the 5-year-olds.

Bisection point. To further examine this modality-related time distortion, we measured the Bisection Point (BP), which is the stimulus duration (D) that gives rise to $p(\text{long}) = .50$. The BP was derived from the fitting of individual data to the pseudo-logistic function, which was good for most participants ($R^2 = .86$, $SE = .017$). However, this fitting was not significant for 5 children (four 5- and one 8-year-old), because they always responded short for the visual modality (all $p(\text{long}) < .45$). These participants were thus excluded from subsequent statistical analyses (Table 13). The ANOVA performed on the BP showed a significant interaction between modality and age, $F(2, 56) = 9.11$, $p = .0001$, $\eta^2_p = .25$, with a significant main effect of modality, $F(1, 56) = 68.81$, $p = .0001$, $\eta^2_p = .55$, and age, $F(2, 56) = 4.58$, $p = .01$, $\eta^2_p = .14$. As expected from the leftward shift of the bisection function, the BP was smaller for the auditory than for the visual stimuli (5.8 vs. 6.83) (Figure 52), and the difference in the BP between these two modalities was higher for the 5-year-olds ($M = 1.70$, $ES = .20$) than for the 8-year-olds ($M = .80$, $ES = .22$) and the adults ($M = .52$, $ES = .21$) (Bonferroni, both $p < .05$), while no difference was observed between these two older age groups ($p > .05$).

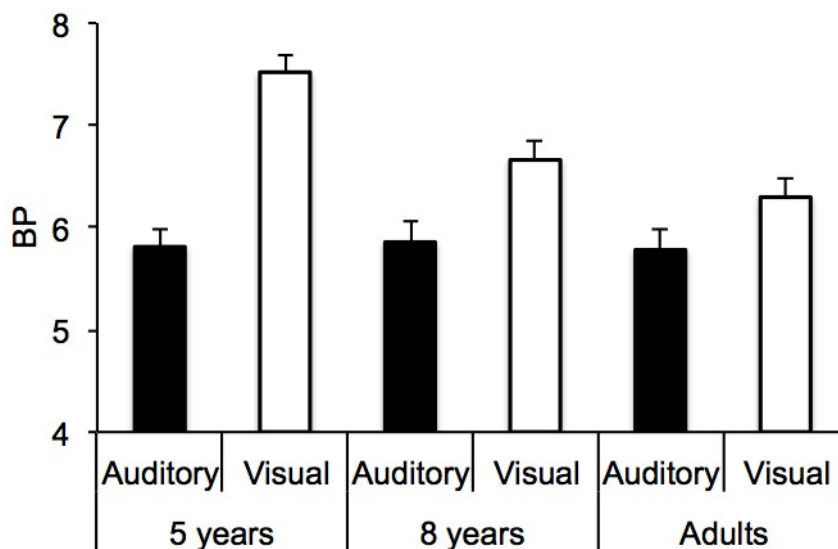


Figure 52. Bisection point for the auditory and the visual stimuli for the 5-year-olds, the 8-year-olds and the adults.

Weber Ratio. The Weber Ratio (WR) is an index of temporal variability in time judgment. This is the difference limen $[(D(p(\text{long}) = .75) - (D(p(\text{long}) = .25)/2)]$ divided by the BP. It was derived for the same pseudo-logistic function as that used for the BP. The statistical analysis showed neither a main effect of modality, $F(1, 2) = 1.98$, $p = .17$, nor an age x modality

interaction, $F(2, 56) = 0.70, p = .50$ (Table 13). The post-hoc analyses confirmed the absence of a modality effect in each age group taken separately (all $p > .05$). There was only a significant main effect of age, $F(2, 56) = 13.41, p = .0001, \eta^2_p = .32$. The WR was indeed higher (lower sensitivity) for the 5-year-olds ($M = .39, SE = .04$) and the 8-year-olds ($M = .28, SE = .04$) than for the adults ($M = .12, SE = .04$) (Bonferroni, $p < .05$), with no difference being found between the two child groups. In sum, the presentation of stimuli of different modalities in the same bisection task produced time distortions without affecting the variability of time judgment.

Table 13. Mean and standard error of Bisection Point and Weber Ratio for the auditory and the visual duration for the 5-year-olds, the 8-year-olds and the adults.

	Bisection Point				Weber Ratio			
	Auditory		Visual		Auditory		Visual	
	M	SE	M	SE	M	SE	M	SE
5 years	5.81	.19	7.52	.17	.38	.03	.42	.06
8 years	5.86	.20	6.66	.19	.23	.03	.33	.06
Adults	5.78	.19	6.30	.18	.12	.03	.12	.06

Correlation between temporal performance and neuropsychological scores.

Table 14 shows the raw scores on the different neuropsychological tests for each age group. As might be expected, the statistical analysis confirmed the improvement of the different cognitive capacities with age: short-term memory, $F(2, 61) = 48.01, \eta^2_p = .61$, working memory, $F(2, 61) = 43.70, \eta^2_p = .59$, attention-concentration, $F(2, 61) = 285.17, \eta^2_p = .90$; selective attention, $F(1, 61) = 396.04, \eta^2_p = .93$; processing speed, $F(2, 61) = 238.14, \eta^2_p = .89$, all $p = .0001$, with differences being found between all the age groups (Bonferroni, $p < .05$), except between the 5- and the 8-year-olds for the scores on the information processing speed test ($p > .05$).

Table 14. Raw scores on neuropsychological tests in children and adults

	5 years		8 years		Adults	
	M	SD	M	SD	M	SD
Short-term memory	4.80	1.53	6.53	1.65	8.95	0.95
Working memory	3.76	1.62	5.21	1.69	8.05	1.28
Attention concentration	16.40	9.07	54.37	13.12	88.70	7.91
Selective Attention	10.84	4.70	21.63	4.51	58.50	7.81
Processing speed	46.96	23.57	51.37	11.02	147.50	9.28

We then examined the correlations between the z-scores for these different cognitive tests, age and temporal performance, i.e. the difference between the auditory and the visual BP and the mean WR (as there was no modality effect on the WR) (Table 15). Table 15 reveals that the temporal performance in the bisection task with different modal stimuli was closely related to general cognitive capacities. We therefore ran a hierarchical regression analysis, with the z-scores for each neuropsychological test being successively entered into the mathematical equation in order to identify the best predictor of temporal performance.

Table 15. *Correlations between the age, the z-scores on neuropsychological scores, the difference in the auditory and visual Bisection Point (BP) and the mean Weber Ratio (WR).*

	<i>Dif.(Auditory, Visual) BP</i>	<i>Mean WR</i>
Age	-.37**	-.52**
Short-term memory	-.44**	-.50**
Working memory	-.39**	-.58**
Attention concentration	-.54**	-.62**
Selective Attention	-.40**	-.57**
Processing speed	-.42**	-.64**

Table 16 shows the results of this analysis for the difference in the BP between the auditory and the visual modality. Age appeared to be a significant predictor of individual differences in the magnitude of modality-related distortions. However, age lost its predictive power when cognitive scores were entered into the models. Although the models with the different cognitive scores were always significant, the most reliable factor influencing differences in modal distortion appeared to be the attention-concentration scores ($\beta = -0.85$, $p = .002$). Changing the order in which the factors were entered into the models did not change the results. Therefore, the greater the attention-concentration capacities were, the smaller the time distortion was.

The results in Table 17 are less original, as several studies have examined the relationship between the WR value and the different neuropsychological scores (for a recent review, see Droit-Volet, 2013, 2016). Nevertheless, these replicated the results found in previous studies showing that age *per se* was not a significant predictor of differences in the variability of time judgment, unlike the cognitive factors that are associated with age, namely working memory capacities (Model 3, $\beta = -0.42$, $p = .04$). However, when the information processing speed scores were entered into the equation (Model 6 and Model 1, analyses B), processing speed proved to be the best predictor ($\beta = -0.97$, $p = .0001$, Model 6), with attention-concentration just failing to reach significance ($\beta = -0.43$, $p = .056$, Model 6) (for the same

results, see Droit-Volet & Zélanti, 2013). Therefore, the age-related increase in time sensitivity in the bisection task used in our study was linked to the increase in the efficiency of cognitive processing of temporal information.

Table 16. *Hierarchical regression analysis on the difference between the auditory and the visual Bisection Point.*

	B	SE B	β	R ²
Model 1				
1. Age	-0.005	0.001	-0.37	0.14**
Model 2				
1. Age	-0.001	0.002	-0.09	
2. Short-term memory	-0.406	0.195	-0.37*	
<i>Overall significance</i>				0.20**
Model 3				
1. Age	-0.001	0.003	-0.06	
2. Short-term memory	-0.356	0.24	-0.33	
3. Working memory	-0.085	0.234	-0.08	
<i>Overall significance</i>				0.20**
Model 4				
1. Age	0.002	0.005	0.18	
2. Short-term memory	-0.329	0.244	-0.30	
3. Working memory	-0.042	0.243	-0.04	
4. Selective attention	-0.313	0.429	-0.30	
<i>Overall significance</i>				0.21**
Model 5				
1. Age	0.003	0.005	0.22	
2. Short-term memory	-0.278	0.224	-0.26	
3. Working memory	0.151	0.23	0.14	
4. Selective attention	0.239	0.427	0.23	
5. Attention concentration	-0.896	0.27	-0.85**	
<i>Overall significance</i>				0.34**
Model 6				
1. Age	0.005	0.005	0.38	
2. Short-term memory	-0.237	0.228	-0.22	
3. Working memory	0.146	0.23	0.14	
4. Selective attention	0.348	0.441	0.34	
5. Attention concentration	-0.89	0.27	-0.85**	
6. Processing speed	-0.326	0.326	-0.31	
<i>Overall significance</i>				0.36**

Table 17. Hierarchical regression analysis on the mean Weber ratio.

<i>Analyses A</i>	B	SE B	β	R ²
Model 1				
1. Age	-0.001	0.001	-0.52	0.27**
Model 2				
1. Age	-0.001	0.001	-0.34*	
2. Short-term memory	-0.051	0.035	-0.24	
<i>Overall significance</i>				0.30**
Model 3				
1. Age	-0.001	0.001	-0.20	
2. Short-term memory	-0.001	0.04	-0.01	
3. Working memory	-0.085	0.04	-0.42*	
<i>Overall significance</i>				0.35**
Model 4				
1. Age	0.001	0.001	0.19	
2. Short-term memory	0.007	0.042	0.03	
3. Working memory	-0.072	0.042	-0.35	
4. Selective attention	-0.098	0.074	-0.49	
<i>Overall significance</i>				0.37**
Model 5				
1. Age	0.001	0.001	0.21	
2. Short-term memory	0.012	0.041	0.06	
3. Working memory	-0.052	0.042	-0.26	
4. Selective attention	-0.042	0.078	-0.21	
5. Attention concentration	-0.091	0.049	-0.45 ^a	
<i>Overall significance</i>				0.41**
Model 6				
1. Age	0.002	0.001	0.70*	
2. Short-term memory	0.036	0.038	0.17	
3. Working memory	-0.055	0.038	-0.27	
4. Selective attention	0.023	0.073	0.12	
5. Attention concentration	-0.087	0.05	-0.43 ^b	
6. Processing speed	-0.195	0.054	-0.97**	
<i>Overall significance</i>				0.53**
<small>^ap = .071, ^bp = .056</small>				
<i>Analyses B</i>	B	SE B	β	R ²
Model 1				
1. Age	-0.001	0.001	-0.52	0.27**
Model 2				
1. Age	-0.001	0.001	-0.47	
2. Processing speed	-0.216	0.052	-1.074**	
<i>Overall significance</i>				0.44**

Discussion

The results of the present study confirmed that the time dilation for auditory stimuli compared to visual stimuli is a robust phenomenon that is observed in adults as well as in children of different ages. Our study also showed that this time dilation is higher in younger children. It thus replicated the results found in children in bisection in the milliseconds (200/800 ms) (Droit-Volet et al., 2004) and seconds range (2/6 s) (Droit-Volet et al., 2007).

However, the originality of our study lies in the adoption of a “predictive approach” (Wearden, 2016) allowing us to determine whether the individual differences in cognitive capacities significantly predict the size of the modal distortion in time judgment. Two main

hypotheses have been put forward to explain the modal time distortion: the “clock” hypothesis and the “cognitive” hypothesis. The first hypothesis posits that this time dilation occurs because the internal clock runs faster for the timing of auditory than of visual stimuli. The second hypothesis posits that this time dilation is related to cognitive capacities, i.e., to a more efficient executive control of the processing of durations in the auditory than in the visual modality. These two hypotheses are difficult to test because both predict that auditory stimuli will be processed faster than visual stimuli (Stauffer et al., 2012). Whatever its origin, cortical processing is indeed always faster for auditory than for visual stimuli, as indicated by the faster reaction times for auditory than for visual stimuli (e.g., Jain et al., 2015), or by the difference in the early negative component of the event-related potentials (ERP) (e.g., Truett et al., 1984). However, this question can in part be resolved within the framework of a developmental model, given that the sensory systems are matured at 5 years, whereas the executive control skills, which depend on the slow maturation of the prefrontal cortex, are not fully developed at this age (Casey et al., 2005; Gathercole et al., 2004).

Our results revealed that the age-related differences in temporal performance in the present bisection task were closely linked to the development of cognitive capacities. Indeed, age ceased to be a significant predictor of developmental differences in the variability of time judgments (Weber ratio) when the cognitive scores were entered into the hierarchical regression analysis. The best predictors were the scores on the neuropsychological tests of working memory and information processing speed. Time sensitivity thus improves across ages as the cognitive processing of temporal information becomes more efficient. This result confirms those found in developmental neuropsychological studies in humans showing the close link between the improvement in timing abilities and the development of general cognitive capacities (e.g., Droit-Volet & Zélanti, 2013; Zelanti & Droit-Volet, 2011; Hallez & Droit-Volet, 2017). This is also entirely consistent with brain development in children, which is characterized by a slow maturation of the prefrontal cortex, i.e. the structure that underpins the executive control function (Sowell et al., 2001, 2003; Tsujimoto, 2008). For example, it has been suggested that temporal judgments in the explicit timing task are lower in children who exhibit reduced activation of their prefrontal cortex (right-dorsolateral prefrontal cortex), as in the case of attention-deficit and hyperactivity disorders (ADHD) (for a meta-analysis of fMRI studies, see Hart, Radua, Mataix-Cols & Rubia, 2012). The sensitivity to durations (> 500 ms) and its improvement through childhood thus depend on the development of working memory capacities and information processing speed.

We may nevertheless discuss the idea that working memory scores, and especially information processing speed scores, indirectly reflect the internal clock speed in young children, which is slower and has a lower temporal resolution (Droit-Volet & Zélanti, 2013; Droit-Volet, 2016, 2017). Indeed, according to models of the neural oscillators and their synchronization, there is a close correspondence between interval timing and working memory, suggesting that timing might be a memory-based process (Gu, van Rijn, & Meck, 2015; Roux & Uhlaas, 2014). Nevertheless, in a task in which the judgment of time was implicit and required little attention, Droit-Volet and Coull (2016) recently found that the temporal performance did not change with age and was not dependent on developmental differences in cognitive capacities, i.e. working memory capacities. Therefore, timing cannot be reduced to working memory processes or vice versa.

In our bisection task, it was not only sensitivity to time that depended on individual cognitive capacities. This was also true for the size of the temporal distortion under the effect of sensory modalities. Indeed, our regression analysis demonstrated that cognitive capacities explained a great proportion of the variance in the magnitude of the modal effect. Age, which would reflect factors other than the cognitive factors tested (e.g., a clock-related one), did not remain a significant predictor. This supports Rammsayer et al.'s (2015) statement that, for long durations (> 500 ms), the processing of time depends on cognitive processes rather than sensory-specific timing mechanisms. It also supports recent works carried out by Ogden and her collaborators on adults showing the critical role of executive processes and the updating of resources in human timing, likely due to “the monitoring of the accumulation of pulses” (Ogden et al., 2011, p 353) (Ogden et al., 2011, 2017; Ogden, Wearden & Montgomery, 2014). In particular, our results suggest that the cognitive operations involved in the mode-related sensory distortions were not related to selective attention but rather to working memory. This finding is in accordance with those obtained by Zélanti and Droit-Volet (2012) in children when the auditory and the visual modalities were tested in separate bisection tasks. Indeed, as in our study, they found that the scores on different temporal selective attention tests were not significantly correlated with the BP values, except for the short durations (< 1 s) in the visual modality. Consequently, the ability to selectively direct attention to the stimulus to be timed, which would act on the latency of the switch closure of the internal clock, is not the major factor explaining the individual differences in the modal effects obtained in our study. This does not mean that this mechanism is not involved in the differences between the timing of auditory and visual stimuli. However, its influence is not sufficiently important for it to be significant at the

behavioral level during the judgment of long durations (> 1 s).

In our study, the best predictor of differences in the size of the modal distortion of time was the scores on the working memory tests, especially those on the attention-concentration index of the CMS (Cohen, 1997). Although this index is “labeled as attention”, it is composed of tests that assess working memory (forward and backward digit span) and other “cognitive constructs (e.g., sequencing)” (Johnstone, Erdal, & Stadler, 1995). It thus measures several components of working memory (Baddeley & Hitch, 1974; Baddeley, 2000), namely the ability to sustain the allocation of attention to ongoing temporal information, but also to store and update temporal information in memory until its judgment. This suggests that the magnitude of the modal effect in time judgment is explained by executive skills involving memory storage processes, but also other processes such as the updating of information in memory and the maintenance of attention on the processing of the continuous flow of temporal information. However, the present study, which was based on standardized and validated neuropsychological tests, did not allow us to identify the exact contribution of different working memory operations in the processing of time. It only demonstrated that a set of working memory components are involved in the temporal modality effect, since selective attention and short-term memory capacities are not functions that can in themselves account for modality effects. Future studies using specific cognitive tests will be performed to resolve this question. In sum, the temporal illusion linked to sensory modality effects is greater in individuals with poor executive skills, and therefore in children. In other words, it depends on cognitive processes rather than sensory-specific timing processes.

II – 2. Etude du contexte temporel sur le jugement du temps chez les enfants et les adultes.

Hallez, Q., Damsma, A., Rhodes, D., van Rijn, H., & Droit-Volet, S. (2019). The dynamic effect of context on interval timing in children and adults. *Acta psychologica, 192*, 87-93.

Introduction

We live in a dynamic world with a plurality of temporal events and some of them that might fluctuate in their temporal properties, going faster or slower than usual. Given that time is a fundamental dimension of perception, action and cognition, we can assume that humans continuously adjust their behaviour to these changing temporal properties of our physical environment (Di Luca & Rhodes, 2016; Rhodes, 2018). The acquisition of the duration associated to an event therefore depends on the temporal context of learning (Rattat & Tartas, 2017). This paper tests the degree to which our prior knowledge about the temporal properties of the world is learnt and used at different developmental ages.

It is well documented in studies with human adults that temporal context influences the estimation of different magnitudes, including temporal rhythm or duration (Adams & Mamassian 2004; Battaglia, Jacobs & Aslin, 2003; Damsma, van der Mijn & van Rijn, 2018; Ernst & Banks, 2002; Jazayeri & Shadlen, 2010; Körding, Beierholm, Ma, Quartz, Tenenbaum & Shams, 2007; McAuley & Jones, 2003; McAuley, Jones, Holub, Johnston & Miller, 2006; Mamassian, Landy & Maloney, 2002; Miyazaki, Nozaki & Nakajima, 2005; Petzschner, Maier & Glasauer, 2012; Shi & Burr, 2016; Stocker & Simoncelli, 2006; Verstynen & Sabes, 2011). This phenomenon is illustrated by the central tendency effect described by Hollingworth (1910), and known in the psychology of time as Vierordt's (1868) law. According to Vierordt's law, in a task in which a range of time intervals have to be reproduced, participants tend to overestimate the shortest durations and underestimate the longest durations (Lejeune & Wearden, 2009). This bias in time estimates demonstrates that the judgment of durations is not absolute, but relative to the centre of the distribution of tested durations. The judgment of a given duration therefore depends on the previous encountered durations.

According to the Bayesian theory of perceptual inference for time, the currently perceived interval (the likelihood) is weighted with previous experience (the prior) to come to a subjective estimation of duration (the posterior). So, in a temporal task with a sequence of trials, there would be an "online prior" where the prior is updated on a trial-by-trial basis, with a greater influence on the current estimate of more recent trials (Dyjas, Bausenhardt & Ulrich, 2012; Di Luca & Rhodes, 2016; Lapid, Ulrich & Rammsayer, 2008; Taatgen & Van Rijn, 2011; van Rijn, 2016). In addition, the Bayesian view predicts that the noisier the time estimates are, the more participants will rely on prior knowledge. As explained by Jazayeri and Shadlen (2010, p. 1020), "the brain takes into account knowledge of temporal uncertainty and adapts its time

keeping mechanisms to temporal statistics in the environment”. Indeed, given that the standard deviation of temporal judgment increases with the length of durations to be estimated, as indicated the scalar property of timing (for a review see Wearden, 2016), it has been found that the central tendency effect is stronger for longer stimulus durations (Cicchini, Arrighi, Cecchetti & Burr, 2012; Jazayeri & Shadlen, 2010).

The scalar variability of timing has been verified in young children in different tasks (for recent reviews see Droit-Volet, 2013, 2016; Coull & Droit-Volet, 2018). In addition, the variability in estimates has been systematically shown to be higher in young children than in adults. We can therefore assume that the uncertainty in time judgments is higher in younger children, and as such, they might rely on prior experience to a greater extent than adults do. The few developmental studies on temporal reproduction showed a stronger temporal bias in children, with a higher over- and underestimation of short and long durations, respectively (Crowder & Hohle, 1970; Droit-Volet, Wearden & Zélanti, 2015; Szelag, Kowalska, Rymarczyk & Pöppel, 2002). This typical temporal bias has been explained by the motor component of this task (Droit-Volet, 2010). The higher overestimation of short durations in young children compared to adults would be due to their motor responses that took more time to complete, while the higher underestimation of long durations might be due to their motor impulsivity. In line with these findings, some authors have warned against using this temporal task in young children (Droit-Volet, 2010; Indraccolo, Spence, Vatakis & Harrar, 2016). However, although the contribution of motor action in age-related differences in temporal reproduction cannot be excluded, we can also assume a stronger effect of prior knowledge on temporal reproduction in young children than in adults.

A recent study using the temporal reproduction task has been conducted in autistic and typically developed children aged from 6 to 14 years (Karaminis et al., 2016). The results replicated the central tendency effect in all age groups, with a stronger effect for younger participants. In addition, Bayesian modelling of the data suggested a higher reliance on the prior in young children than in adults. The autistic children showed a lower sensitivity to time, but did not rely more on prior knowledge than age-matched typical children to compensate for their temporal error. However, as reported the authors, unexpectedly, the context dependent effect was not consistent across age groups, being absent in children older than 10 years and adults (p. 3). This is likely due to the fact that younger children underestimated all durations, thereby reducing the context effect to which they may be subject (Hallez & Droit-Volet, 2017; Karaminis et al., 2016).

The aim of the present study was to replicate and extend these results on the effect of temporal context on temporal reproduction performance in children as young as 5 years old. Indeed, the originality of our study lays on the examination of the influence of temporal performance in children and adults. The *global* context (i.e., the range of presented intervals) was not the only focus however, as we also investigated the *local* context (i.e., the direct effect of recent trials), a distinction that has not yet been investigated from a developmental perspective. In the present study, children aged 5, 6 and 7 years, as well as adults, performed a "ready-set-go" reproduction task in which we manipulated the temporal context by using two different ranges of durations: a short and a longer range. To assess the effect of this global context manipulation, one duration in the two temporal ranges overlapped. We hypothesized an effect of temporal context on temporal performance for both children and adults, with the overlapping duration judged longer in the long than in the short context condition. In addition, because of the lower temporal sensitivity in young children, we expected that the effect of recent prior trials would be higher in children than in adults.

Methods

Participants

A total of 24 five-year-olds (11 females), 31 six-year-olds (16 females), and 25 seven-year-olds (10 females) and 33 adults (27 females, mean age = 20.43, $SD = 3.94$) took part in this experiment. Children were recruited from different nursery and primary schools, whereas adults were Psychology students of the University Clermont Auvergne, all located in the municipality of Clermont-Ferrand, France. Children's parents as well as adult participants signed written informed consent for their participation in this experiment, which was carried out according to the principles of 1964 Helsinki's declaration and approved by the academy committee of the French National Education Ministry, and the ethics committee of research IRB-UCA, according to ethical standards of the French law.

Apparatus and stimuli

In a quiet room, participants were seated in front of a cathode screen on which all stimuli were presented. The screen was linked to a MSI Apach Pro computer that launched all experimental events and recorded responses using Psychtoolbox-3 (Brainard, 1997; Kleiner et al., 2007) in Matlab. During an entire experimental block, a 0.8° fixation cross was presented

at the centre of the screen (Figure 53). In each trial, a *warning*, *ready* and *set* stimulus were presented. The warning stimulus consisted of a 2.0° diameter black circle with the label 'ready', and appeared on the left of the fixation cross at a random distance between 4.0° and 8.1°. The ready and set stimuli consisted of a white 2.0° diameter circle. The ready circle was presented on the right of the fixation cross at a random distance between 4.0° and 8.1°. The set circle was always located 4.8° above the fixation cross.

Procedure

All participants performed a ready-set-go reproduction task in two temporal contexts: one with short durations and the other with long durations. The presentation order of this context condition was counterbalanced across participants. The fulfilment of each of the two conditions was done on two distinct days. The 0.9 s interval duration was presented in each contextual condition, in order to examine whether the temporal reproduction of this target duration was affected by the temporal context. In the “short” context condition, the interval durations were 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 and 0.9 s, and the “long” context condition 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3 s. In each condition, the participants were given 4 blocks of 20 trials (a total of 80 trials), that is 8 trials per interval duration. The presentation order of the interval durations was random. Participants were given a demonstration before each temporal condition composed of 10 trials (5 demonstrations and 5 practice trials), in which each duration of the context conditions was presented twice.

Each trial started with a 1 s fixation cross (Figure 53). Then, the black *warning* circle was presented to indicate that a new trial had started. This circle stayed on the screen during the rest of the trial until the participant made a response. After a random interval between .25 and .85 s, the white *ready* circle was presented for 0.1 s, marking the onset of the interval. Next, the offset of the interval was indicated by the presentation of the white *set* circle for 0.1 s. The task of the participants was to immediately reproduce this interval after the presentation of the set circle by pressing spacebar to indicate the offset.

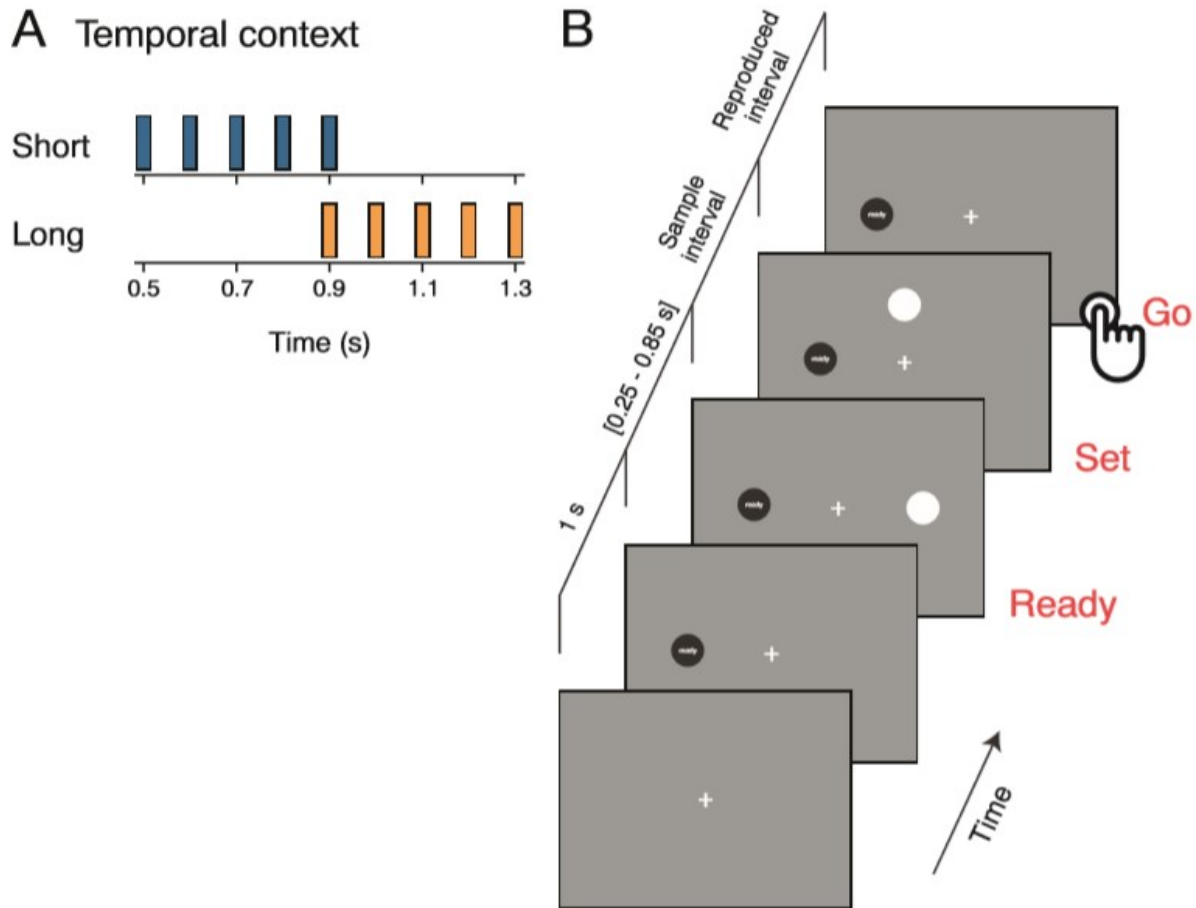


Figure 53. Ready-set-go procedure: (a) temporal context, (b) procedure.

Data analysis

A complete overview of the analyses and results can be found at osf.io/k3znf. For data analysis, we excluded reproductions lower than 0.1 s and higher than 2.0 s, leading to the exclusion of 6.0% of the total data (12.4, 8.3, 4.5 and 0.4% of the trials for the 5-, 6-, 7-year-olds and adults, respectively). We modeled the data using Linear Mixed Models (LMMs) using the *lme4* package in R (Bates, Maechler, Bolker & Walker, 2014). To test the overall effect of fixed factors, we did model comparisons using likelihood ratio tests. If a fixed factor improved the model fit, it was included. To make the interpretation of the effect of objective duration more straightforward, we centered this continuous factor by subtracting the middle interval (i.e., 0.9 s) from all values. *Subject* was always included as a random intercept term. Next, we sequentially added random slopes for the significant fixed factors to the best model and compared the more complex model with the simpler model using a likelihood ratio test. Random slope terms were included if they improved the model. Post-hoc multiple comparisons were

computed using the *glht* function from the *multcomp* package (Hothorn et al., 2013) and the *lsmeans* function from the *lsmeans* package in R (Lenth, 2016). To quantify the evidence in favor of the null hypotheses (i.e. there is no effect of the particular fixed factor), we calculated Bayes factors using the *lmBF* function from the *BayesFactor* package in R (Morey, Rouder & Jamil, 2014). We will denote the evidence for the null hypothesis (H_0) over the alternative hypothesis (H_1) as BF_{01} .

Results

Mean in temporal reproduction

Figure 54A shows the mean reproduction of interval durations for the different age groups. As can be seen in Figure 54, the children overall showed a smaller slope and a larger underestimation of longer intervals. We modelled the data starting with an LMM predicting reproduction, with subject as a random intercept term. We found adding centered objective duration improved the model fit ($\chi^2(1) = 558.43, p < 0.001, BF_{01} < 0.01$), showing that overall there was a positive, linear increase of reproductions with objective duration ($\beta = 0.25, t = 23.89, p < 0.001$). However, adding age group and the interaction between age group and objective duration to the model also improved the model fit ($\chi^2(3) = 38.72, p < 0.001, BF_{01} < 0.01$ and $\chi^2(3) = 1110.90, p < 0.001, BF_{01} < 0.01$, respectively), indicating that there was a difference between the age groups in the intercept and slope of the reproductions. Post-hoc multiple comparison showed that the intercept (i.e., the reproduction of 0.9 s estimated by the model) was higher for the adults compared to the 6-year-olds and 7-year-olds ($ps < 0.001$). In addition, the intercept of the 5-year-olds was higher than that of the 7-year-olds ($p < 0.001$). There were no other intercept differences between the age groups ($ps > 0.078$). A second post-hoc test showed that the slope was larger for the adults compared to the three children groups ($ps < 0.001$), but there were no differences between the children groups ($ps > 0.495$).

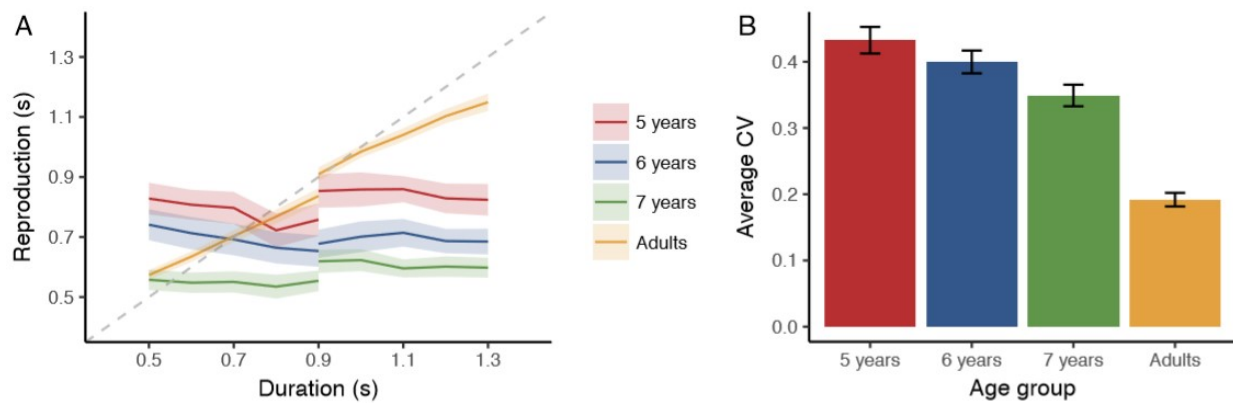


Figure 54. Average reproductions of the durations (A) and CV value (B) for the different age groups. Error bars represent the standard error of the mean.

Variance in temporal reproduction

We used the coefficient of variation (CV) as measure of the variability in temporal reproductions. To this end, we calculated the CV per subject for each objective duration, as the standard deviation of the average reproduction divided by the average reproduction. Figure 54B shows the average CV per age group. An LMM predicting CV showed that age group improved the fit significantly ($\chi^2(3) = 96.76, p < 0.001, BF_{01} < 0.01$). A post-hoc Tukey's HSD test showed that relative to all children groups, the adults had a smaller CV ($ps < 0.001$). In addition, the 7-year-olds had a significantly smaller CV than the 5 year olds ($\beta = -0.08, z = -3.48, p = 0.003$). All other comparisons were non-significant ($ps > 0.110$). Thus, in summary, our results indicate that the CV decreased with age.

Global context effect

To test whether temporal reproductions were influenced by the global context manipulation, we compared the reproductions of the short and the long context for the overlapping duration (i.e., 0.9 s). Figure 55 shows the average difference between the short and the long context at this interval duration for the different age groups. We found that, overall, the temporal context predicted the reproductions of the overlapping interval significantly ($\chi^2(1) = 31.42, p < 0.001, BF_{01} < 0.01$). Adding age group to the model improved the fit ($\chi^2(3) = 33.66, p < 0.001, BF_{01} < 0.01$), indicating the reproduction differed significantly between age groups. Post-hoc comparisons showed that the reproductions at the overlapping interval were significantly longer for the long context compared to the short context for the 5-year-olds ($\beta = 0.09, t = 2.15, p = 0.033$) and the adults ($\beta = 0.07, t = 1.99, p = 0.049$). There was no significant difference for the 6- and the 7-year-olds ($ps > 0.130$). Crucially, however, model

comparison showed that the effect of context did not differ significantly between age groups ($\chi^2(1) = 4.26, p = 0.235, BF_{01} = 67.15$).

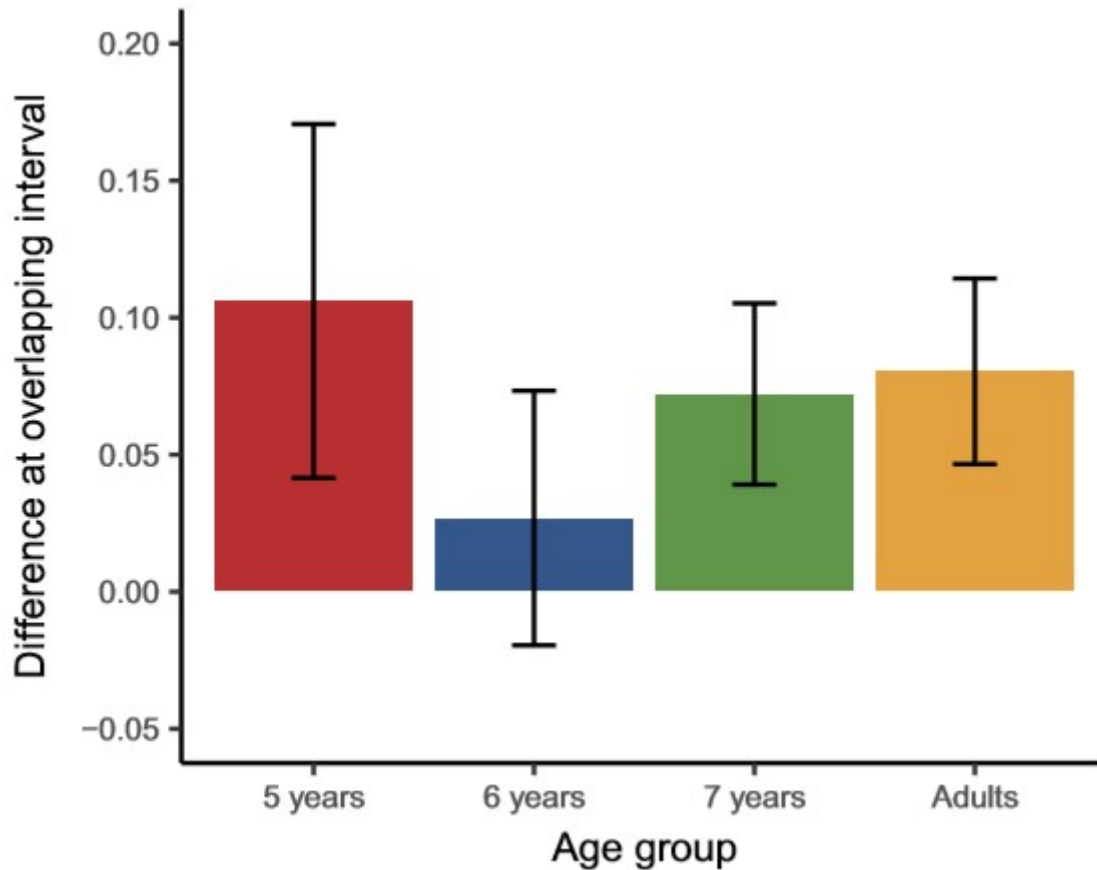


Figure 55. Average difference of the 0.9 s reproduction between the short and the long context for the different age groups. Error bars represent the standard error.

Local context effects

Objective previous durations:

To quantify the influence of previous presented durations on the current reproduction, we started with the model established previously, including reproduction as the dependent variable and objective duration, age group and context as fixed factors. In addition, the interaction between age group and context and age group and objective duration were included. To this model, we sequentially added objective previous durations (N-1, N-2, N-3, etc.). We found that N-1 and N-2 had a significant influence on the current reproduction ($\chi^2(1) = 37.15, p < 0.001, BF_{01} < 0.01$ and $\chi^2(1) = 4.56, p = 0.033, BF_{01} = 0.76$ respectively). However, N-3 did not improve the model fit ($\chi^2(1) = 0.28, p = 0.594, BF_{01} = 7.54$), so no previous durations

beyond N-2 were included in the model.

Figure 56A shows the weight of the previous four objective trials on the current reproduction for the different age groups. Because only N-1 and N-2 were shown to be significant predictors in the model, we tested whether the weight of these factors differed between the age groups. We found that this was the case for N-1 ($\chi^2(3) = 8.58, p = 0.035, BF_{01} = 17.19$), although the Bayes factor suggests that there was more evidence for the absence of this difference. Post-hoc multiple comparisons showed that the effect of objective N-1 was stronger for 5-year-olds than for adults ($\beta = -0.16, z = -3.05, p = 0.012$). No other contrasts reached significance ($ps > 0.228$). There was no difference between age groups for N-2 ($\chi^2(3) = 6.98, p = 0.073, BF_{01} = 181.36$). In summary, reproductions were significantly influenced by previously presented intervals. In addition, this N-1 effect was stronger for the younger children compared to adults.

Subjective previous durations

Whereas participants might be influenced by recent *objective durations*, it is also possible that they rely on their subjective experience of this objective duration, i.e., their own temporal production (e.g., Schlichting et al., 2018). To test this idea, we again started with the previously established model mentioned in section 3.4.1, and sequentially added previous *subjective durations* (in trial N-1, N-2, N-3, etc.), that is, previous reproductions, to the model. We found that all previous subjective durations up to N-7 contributed significantly to the current reproduction ($\chi^2s(1) > 18.30, ps < 0.001, BF_{s01} < 0.01$). We decided that the effect of previous trials beyond N-7 could not be established reliably, because only less than half of the data could be used for these models.

Figure 56B shows the beta weights for the four most recent previous subjective durations for the different age groups. For presentation purposes, we decided to only show the weights up to N-4, nevertheless, a figure showing the weights up to N-7 can be found at <https://osf.io/k3znf/>. We found that weights of N-3 and N-6 differed significantly between the different age groups ($\chi^2(3) = 11.66, p = 0.009, BF_{01} = 30.21$ and $\chi^2(3) = 8.94, p = 0.030, BF_{01} > 100$). However, after adding the random slopes of duration, range, N-1 and N-2, post-hoc multiple comparisons showed that there were no significant differences between the age groups in the effect of N-3 ($ps > 0.276$). However, the effect of N-6 was larger for 6-year-olds than for 5-year-olds ($\beta = 0.08, z = 2.60, p = 0.045$). There were no other differences ($ps > 0.393$).

Although the participants in all age groups might rely on previous subjective durations, this effect could potentially reflect performance drift over the experiment. For example, in certain phases of the experiment, a participant might be less willing to make longer responses compared to other phases. To disentangle the influence of the previous subjective duration from this local performance drift, we calculated the relative error of the reproduction in each trial (error = [reproduced duration - objective duration]/objective duration) (see Schlichting et al., 2018). In the case of performance drift, we would expect that a previous negative error (that is, a too short reproduction) in the previous trial would also lead to negative error in the current trial. In contrast, if the current reproduction depends on the actual previous subjective experience, we would expect that the relative error would reflect the duration of the previous reproduction (that is, a more positive error if the previous reproduction was long and a more negative error if the previous reproduction was long).

Starting with a model with relative error as the dependent variable, the same fixed factors used in section 3.4.1 and subject as a random factor, we alternately added previous reproductions (N-1, N-2, N-3, etc.) and relative error in the previous trials to the model. We found that both the previous reproductions and the previous relative errors up to N-7 improved the model ($ps < 0.004$), indicating that some of the sequential effects can be explained by performance drift, but there was still a significant influence of the actual previous subjective duration.

Figures 56C and 56D show the influence of the relative error and the subjective duration in the four most recent trials on the current reproduction. To test whether the weights differed between the age groups, we sequentially and alternately added the interaction terms of the previous subjective durations and age group, and of previous relative error and age group, to the model. We found that for the effect of previous subjective duration was different for N-1 and N-3 ($\chi^2s(3) > 8.28$, $ps < 0.041$, $BF_{s01} < 3.64$). In addition, the effect of the previous error in N-1 and N-6 differed between age groups ($\chi^2s(3) > 8.71$, $ps < 0.044$, $BF_{s01} < 1.49$). Post-hoc multiple comparisons showed that the effect of subjective N-1 was lower for adults than for 5- and 7-year-olds ($ps < 0.035$). For subjective N-3, no contrast reached significance ($ps > 0.208$). Post-hoc comparisons of the effect of relative error in N-1 showed that the effect was lower for 5-year-olds compared to 6-year-olds and adults ($ps < 0.034$). The contrasts also suggested a higher weight for adults compared to 6 and 7-year-olds, but these effects were borderline significant ($ps < 0.091$). No contrast reached significance for the relative error in N-6 ($ps > 0.192$).

To summarize, we found that previous subjective durations influenced the current reproduction, but found no apparent differences between age groups in this respect. However, when we disentangled the influence of previous subjective duration and performance drift, we found adults had a higher influence of performance drift compared to the children. This pattern is reversed when we looked at the weight of previous subjective duration: the children (at least 5 and 7-year-olds) relied more on the previous subjective duration than the adults.

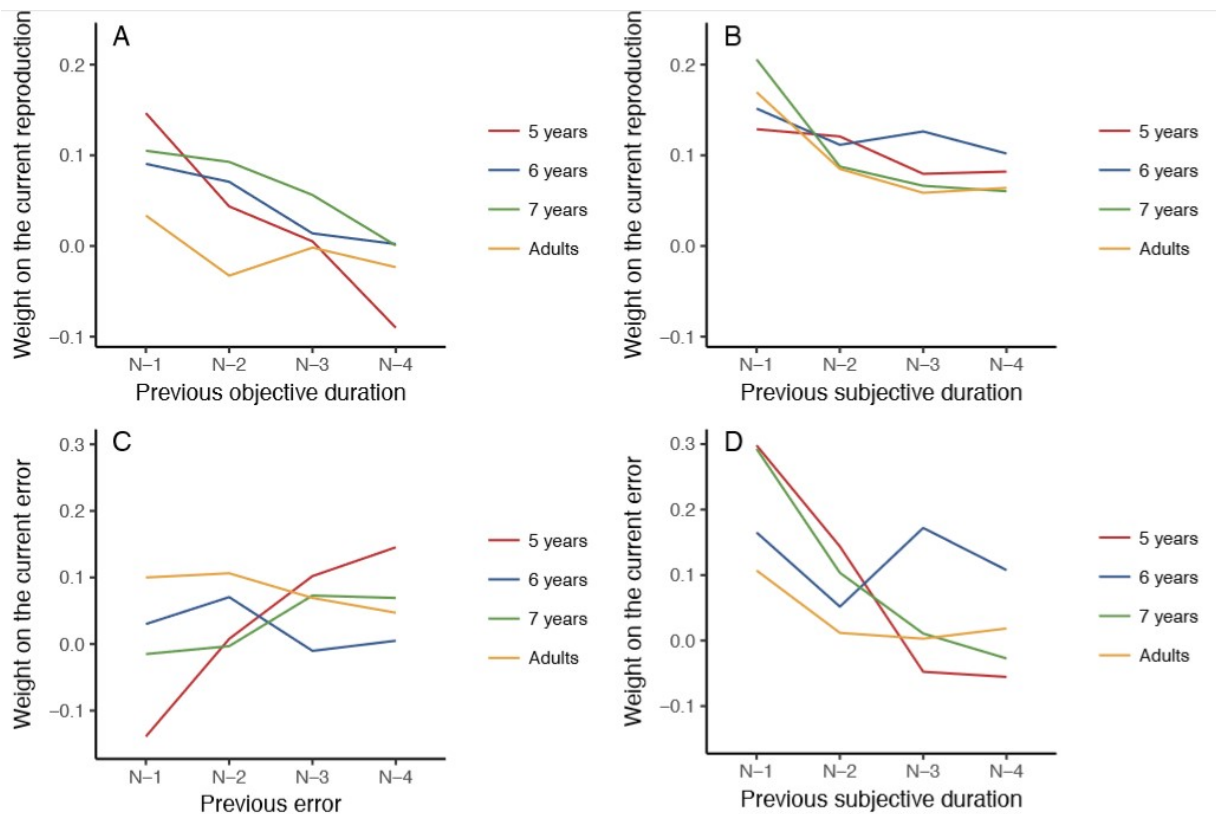


Figure 56. The weight of previous durations as quantified by the beta estimates of our linear mixed models. Figure A shows the effect of previous *objective* duration on the current reproduction, whereas figure B shows the effect of previous *subjective* duration on the current reproduction. To disentangle performance drift from the effect of previous subjective duration, Figure C and D shows the weights of the previous relative error and previous reproduction on the current relative error, respectively

Discussion

In our study, children from 5 to 7 years old and adults performed a ready-set-go reproduction task with two different duration distributions. Our results showed an

underestimation of reproduced durations as the length of durations increased, especially in young children. This replicated the results found in most studies in children that employ temporal reproduction task (e.g., Droit-Volet et al., 2015; Karaminis et al., 2016; Szelag et al., 2002). This temporal underestimation suggests that factors related to motor impulsivity have likely affected the children's temporal reproductions (Droit-Volet, 2010). This is consistent with the results in rhythmic time interval tasks showing that young children have difficulty in reproducing time intervals far from their Spontaneous Motor Tempo (McAuley et al., 2006; Monier & Droit-Volet, 2016). Children indeed have reduced self-control capacities, and as such, it is difficult for them to inhibit initial response (e.g. the dominant response) (Fox, Henderson, Marshall, Nichols & Ghera, 2005; Klenberg, Korkman & Lahti-Nuuttila, 2001). This consistent underestimation of long duration might limit the validity of Bayesian modelling, because it is difficult to distinguish between effects coming from the motor component and those resulting from the temporal prior.

Nevertheless, the underestimation bias obtained in our study could be considered in our regression analyses of the age-related differences in the effect of temporal context on performance. The decreased slope of reproductions for children compared to adults provides evidence for a stronger central tendency effect in children. This is in concert with recent studies showing that central tendency effects progressively decrease with age (Sciutti, Burr, Saracco, Sandini & Gori, 2014; Karaminis et al., 2016). Furthermore, we found that the variance in temporal reproduction (as quantified by the coefficient of variation) was higher in all children compared the adults and in the 5-year-olds compared to the 7-year-olds. A higher central tendency effect was thus observed in participants with a lower sensitivity to time. These findings are in line with the idea that the noisier the internal representation of the interval, the larger the central tendency effect will be (Jazayeri & Shadlen, 2010; Acerbi, Wolpert & Vijayakumar, 2012).

In addition, our study suggests that this central tendency effect is due to a greater use of prior presented durations in the experimental session. Indeed, our results showed an effect of global context on temporal reproductions in all age groups: the overlapping duration (0.9 s) was systematically judged longer in the long than in the short context condition. However, despite the noisier reproductions and flatter slopes in the youngest children, we did not find any statistical difference in this global context effect between the age groups. In contrast, our results on the local (trial-by-trial) context effect revealed that the duration presented in the most recent trials had a greater impact on the reproduction of a given duration in the children than in the

adults. However, our results revealed that only the most recently presented durations (N-1 and N-2) influenced the participants' time judgments. In sum, the temporal impact of objective duration presented in the previous trial was stronger for 5-year-olds than for adults. If we consider the Bayesian framework, we could thus conclude that, because of a highly noisy percept, the subjective estimation of the younger children is tilted toward previous experiences (the prior) more than it is tilted toward the perceived interval (the likelihood).

As a novel way of looking at the influence of subjective experience, we have not only tested the effect of the objective durations presented on current time judgment, but also that of previous subjective durations, i.e., the participants' own temporal reproduction. We distinguished this effect from general drifts in performance by examining the unique contribution of previous individual reproductions and the previous errors on the current reproduction. We found that both of these factors had a continuing impact (at least up to N-7). However, for the most recent previous trial (i.e., N-1), we found that the effect of both the subjective duration and relative error differed between the age groups. Consistently with the objective duration effect, the children (5 and 7 years) relied more on their previous subjective duration than the adults. Contrariwise, the influence of previous relative error was higher for the adults than for the children, indicating that the reproductions of adults were subject to more reliable performance drifts. These novel findings suggest that, compared to adults, children rely more on the temporal context than on the evaluation of their misjudgement. This is in line with the idea that humans possess early abilities for statistical learning (Karaminis et al., 2016), since children continuously integrate priors into their current production. These abilities have already been observed in infants and newborns (Kirkham et al., 2007, 2002; Bulf et al., 2011). In contrast, learning from produced errors would emerge in great part later during childhood, explaining the higher performance drift in adults with the development of executive functions, that is, when children become able to evaluate their performance and their evolution during learning. Indeed, among the different aspects of executive functions that develop through childhood, one could notably cite that of error evaluation (Kirkham, Cruess & Diamond, 2003), allowing children to apply knowledge to their own behaviour.

In summary, our results demonstrated that the central tendency effect in temporal reproduction is stronger in children than in adults, and that children's current temporal reproductions rely more on durations presented in recent trials. This finding can be linked to the children's noisier representation of time. Consistent with Bayesian theory, a noisy timing system led participants to further base their estimation on the previous experiences rather than

on the perceived stimulus. However, the influence of relative error (subjective produced duration) was higher for the adults than for the children. This new finding suggests that, unlike adults, children rely to a greater extent on the temporal context than on the evaluation of their misjudgement. Future studies might further investigate whether the influence of context in temporal judgment in children generalizes to different contexts and temporal tasks.

II – 3. Étude sur l’effet du contexte social sur les jugements du temps chez l’enfant âgé de 4 à 7 ans.

Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2018). Young children embody the time of others in their time judgments: The role of the theory of mind. *Infant and Child Development*, e2101.

Introduction

Social interaction is anchored in time (Schirmer, Meck, & Penney, 2016). The variations in our time judgments as a function of social contexts thus reflect our fundamental ability to take account of other people and their states. The aim of our study was to examine the ability of young children to embody other people's body states in their temporal judgments and the role of the acquisition of an explicit theory of mind (ToM).

There is now a broad consensus on the fact that our brain functions as an internal clock that allows us to judge durations accurately (Allman, Penney, & Meck, 2016; Merchant, Harrington, & Meck, 2013). However, in our everyday life, we often experience temporal distortions, with the result that time is judged shorter or longer than it really is, causing it to be underestimated or overestimated. Based on the theories of embodied cognition (Barsalou, 1999, 2008, 2010; Niedenthal, 2007; Niedenthal, Barsalou, Winkielman, Krauth-Gruber, & Ric, 2005), the theory of grounded time explains that our time judgments are based on our own internal state, either emotional or sensory motor, experienced during the processing of time (Droit-Volet, 2014; Effron, Niedenthal, Gil, & Droit-Volet, 2006; Droit-Volet & Gil, 2009; Wittmann, 2009, 2013). This has been widely demonstrated in studies showing how time judgments vary with experienced emotion (Droit-Volet, 2018; Droit-Volet, Fayolle, Lamotte, & Gil, 2013; Droit-Volet & Meck, 2007; Lake, Labar, & Meck, 2016).

In a social context, however, it has been demonstrated that not only our own internal states but also the perception of other people's states influence time judgments. In adults, a series of studies has shown the effects of the perception of others' movements on the judgment of time (Nather & Bueno, 2008; Nather, Bueno, Bigand, & Droit-Volet, 2011). In one of these studies, Nather et al. (2011) asked the participants to judge the presentation duration of two pictures of a ballerina (Edgar Degas' sculpture) performing a high-intensity body movement (posture of the great arabesque) or a low-intensity body movement (resting posture). The results showed that the participants judged the presentation duration of the ballerina to be longer with the posture that required more movements. These results would be thus due to the participants' embodiment of the other's posture, which in turn caused the memory reactivation of sensory-motor knowledge associated with the body postures elicited by the body picture. The perception of the other person's movements would thus trigger an attenuated experience of the other person's movement in the perceiver. As Nather et al. (2011) explained, the lengthening effect observed with the great arabesque posture compared with the resting posture would thus result from the

increase in arousal associated with intense movements. Indeed, as suggested by the internal clock models, when the level of arousal increases, the internal clock speeds up, and the quantity of temporal units (pulses) involved in time representation increases (Droit-Volet & Meck, 2007; Droit-Volet & Wearden, 2002; Gil & Droit-Volet, 2012; Wittmann & Paulus, 2008). This is consistent with the results of numerous studies showing temporal lengthening effects when the nervous system is aroused (Buhusi & Meck, 2002; Fayolle, Gil, & Droit-Volet, 2015; Maricq, Roberts, & Church, 1981; Meck, 1983, 2005; Williamson, Cheng, Etcheagaray, & Meck, 2008). The perception of other people affects our time judgments not only when the latter make a visible movement but also when they exhibit a more internal characteristic such as the state of old age or the emotion felt. In a temporal bisection task, Chambon and colleagues showed that the subjects judged the presentation duration of pictures of older faces to be shorter than that of young faces (Chambon, Droit-Volet, & Niedenthal, 2008; Chambon, Gil, Niedenthal, & Droit-Volet, 2005). Because old age is associated with a general slowdown in cognitive and motor functions (Salthouse, 2016; Salthouse & Meinz, 1995), the authors explained this shortening effect in terms of the self-experience of slowness in the subjects who perceived an old person, thus slowing down the rate of the internal clock system.

Using the same bisection procedure, several researchers have shown that the facial expression perceived on the other person's face also affects the judgment of time. In particular, time is judged longer when the facial expression of a high-arousal emotion (e.g., anger) is seen. However, in the case of facial expressions, it is difficult to dissociate the effects due to the embodiment of the emotion perceived in the other person (emotion of anger felt in the presence of an angry person) from those due to an emotional reaction (emotion of fear felt in the presence of an angry person; Droit-Volet et al., 2013).

No study has yet examined the embodiment of other people's time in children's temporal productions. Developmental studies have suggested that young children under the age of 5 years do not integrate other people's intentions in their own behaviour in order to predict their actions or plan their reactions accordingly. This ability would require the capacity to infer other people's mental states, that is, a Theory of Mind (ToM) (Carlson, Koenig, & Harms, 2013; Frith & Frith, 1999; Saxe & Kanwisher, 2003). Within this perspective, other people's characteristics should not influence the judgment of time in young children, who have no ToM. The false belief task, also called the "Sally–Anne" test (see Section 2; Wimmer & Perner, 1983), has long been considered to be a viable indicator of the acquisition of a ToM (Wellman, 2002). It has therefore been shown that younger children aged less than 5 years fail this type of false belief

test and this has been explained in terms of their inability to adopt the other person's perspective (Perner, Mauer, & Hildenbrand, 2011; Wimmer & Perner, 1983; for a meta-analysis, see Wellman, Cross, & Watson, 2001). However, recent studies suggest the development of two distinct systems involved in the understanding of others: an early implicit system that is automatic but noisy and a second, explicit, system that emerges later—at about 5 years—and that is abstract, conscious, and more reliable (Apperly & Butterfill, 2009; Low, 2010; Schneider, Bayliss, Becker, & Dux, 2012). Children's success in the “Sally–Anne” test would thus be due to their acquisition of this conscious ToM as their executive functions develop (Wang, Low, Jing, & Qinghua, 2012). Consequently, on the basis of the hypothesis that there is an early implicit system for embodying the time of other people's states, we may assume that all young children, whether with or without ToM, would take account of other people's states in their temporal productions. However, the cognitive development of explicit representations and/or the awareness of other people's states in children (ToM) would increase the influence of perceived states on their temporal judgments.

The aim of this study was therefore to examine whether the characteristics of others (movement, movement with object, age, and emotion) influence the judgment of time in young children aged from 4 to 7 years, as has already been demonstrated in adults. In addition, the acquisition of an explicit ToM was assessed using the Sally–Anne test. In our study, children had to learn target durations (4 and 8 s) and reproduce these durations in response to stimuli representing silhouettes that differed in their state. This state was very visible (i.e., a movement that required a motor action [movement and movement with object]) or less visible (i.e., an emotion or the fact of being old). Our hypothesis was that young children would embody the other person's time, thus resulting in time distortions in their temporal reproduction. For example, durations should be judged shorter—underestimated—when the children were presented with a running man compared to a walking man (movement condition) or judged longer—overestimated—for an old man compared with a young man. However, children with an explicit ToM, who have a greater awareness of the other, should better embody the other person's time, thus resulting in the emergence of greater temporal distortions.

Method

Participants

Fifty-seven children (22 boys and 35 girls) aged from 4 to 7 years took part in this

experiment ($M = 6.05$ years, $SD = 0.92$). Of these, 27 children failed ($M = 5.56$ years, $SD = 0.91$) and 30 children succeeded ($M = 6.52$ years, $SD = 0.58$) in the ToM test (see Section 2.3). The children were recruited from various nursery and primary schools in Clermont-Ferrand, France. Their parents signed written informed consent for the children's participation in this experiment, which was carried out according to the principles of the Helsinki declaration and was approved by the inspector of the academy of the French Ministry of Education as required by French law.

Material

The children were seated in front of a computer in a quiet room at their school. The experimental events and responses were presented and recorded on a computer via a program written in Python and compiled in C. The children gave their responses with their preferred hand on the touch pad of the computer. The stimuli were presented on a 17-in. computer screen.

Figure 57 shows the different stimuli used in our study. In the reference phase, the stimulus was the dynamic picture of a man (black silhouette) who was walking from the left to right of the computer screen towards a location represented by a ball. In the testing phase, the stimuli were static pictures of a silhouette presented on the left of the computer screen. These silhouettes indicated different individual states as a function of the experimental conditions: (a) movement, (b) movement with object, (c) aging, and (d) emotion.

In addition, to assess the individual differences in the children's ability to attribute states to others in the age range tested, we used the standard explicit ToM test (i.e., the Sally–Anne test; Wimmer & Perner, 1983).

Procedure

The children performed the temporal reproduction task in different experimental conditions, as well as the Sally–Anne test. The presentation order was counterbalanced between subjects.

Temporal reproduction task :

Each child performed a temporal reproduction task with a 4-s target duration and an 8-s target duration. This temporal reproduction task was performed in five conditions as a function of the stimuli used in the testing phase: control, movement, movement with object,

aging, and emotion. The control condition was presented first, followed by the other conditions, which were presented randomly. The procedure was similar in the different conditions, except for the type of stimuli used in the testing phase. In addition, the temporal task was performed with the two target durations in each condition, and their presentation was counterbalanced between subjects.

In each condition, and for each target duration, the temporal task consisted of two phases: a reference phase and a testing phase. In the reference phase, the child was presented 5 times with the dynamic picture of a silhouette that walked (walking man) for the target duration (either 4 or 8 s) from left to right across the screen. The child therefore learned the length of time that the silhouette took to cross the screen.

Then, in the testing phase, the child did not see the silhouette moving from left to right. He or she only saw a static silhouette (stimulus) on the left of the screen (static picture), and his or her task was to click on the computer touch pad when he or she judged that the duration required to cross the screen from left to right was the same as the target duration (temporal reproduction). There were three trials per stimulus, and each trial was triggered when the child clicked on the computer touch pad.

For the testing phase, the stimulus used in the control condition was the static image of the walking silhouette (control stimulus) that had been used in the reference phase (walking silhouette). In the other conditions, two or three test stimuli were used as a function of condition (see Figure 57). The walking silhouette (control stimulus) was used in all the conditions. For the movement condition, the stimuli were the walking silhouette (control), the running silhouette, and the crawling silhouette. For the movement with object (“object-movement” condition), the stimuli were the walking silhouette (control stimuli), the silhouette carrying a heavy load and the silhouette on a bicycle. For the aging condition, the stimuli were the walking silhouette, once again, and the silhouette of an old man. For the emotion condition, a sad silhouette with the facial expression and bodily posture typical of emotion was used. For comparison purposes, a similar posture to that of the walking man was also used. However, in this case, it was presented with a happy face to highlight the emotion associated with the posture. In all conditions, each stimulus was presented 3 times and the children therefore performed six to nine trials per testing phase as a function of the conditions.

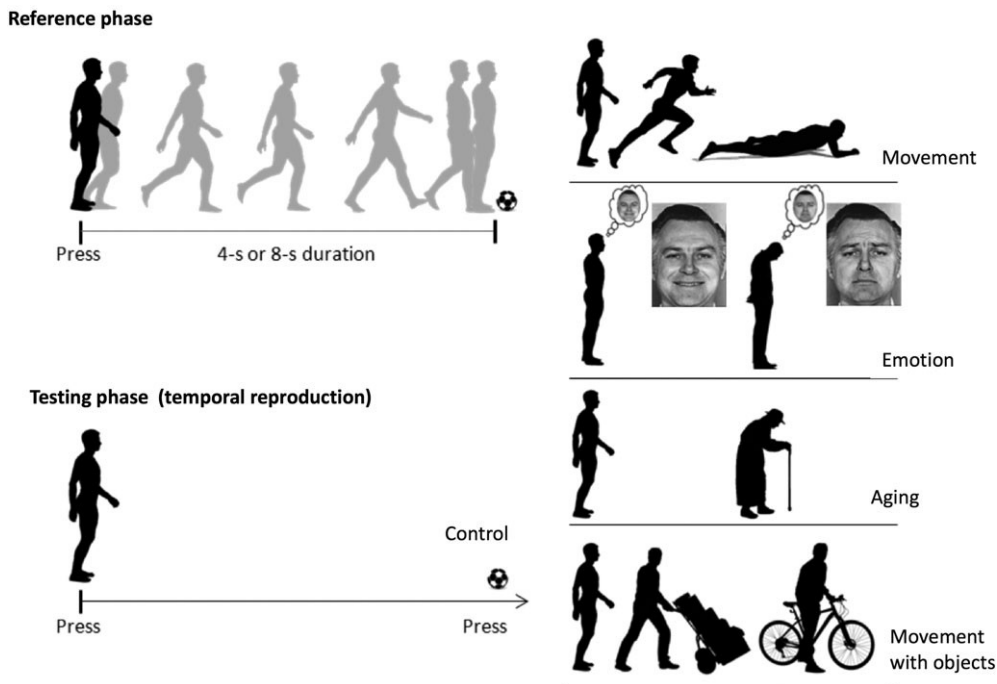


Figure 57. Illustration of the temporal reproduction task used in the reference phase and of the different silhouettes used in the experiment testing phase

Sally–Anne test:

The Sally–Anne test was the standard explicit test in which the child was told the story of Sally and Anne: Sally who puts her ball in her basket, and Anne who moves her ball into her own basket when Sally is leaving. The experimenter then asked the child where Sally will look for her ball. The children were thus categorized as “with explicit ToM” when they responded correctly (Sally's basket) to this test and “without explicit ToM” when they failed.

Results

Temporal standard errors (SEs) were calculated for each child in the temporal reproduction task: $(\text{reproduced duration} - \text{target duration}) / \text{target duration}$. A temporal SE close to zero indicates an accurate time judgment. A temporal SE greater than zero represents an overestimation of time, with the participants reproducing durations longer than the target duration. A temporal SE shorter than zero, when the participants pressed too soon, represents an underestimation of time. Initial analyses of variance (ANOVAs) were performed on the mean temporal SE for each condition with the children's age in months included as covariable. The main effect of age and the interactions involving this factor were never significant ($p > .05$). This

reveals that the differences in cognitive abilities associated with age did not significantly affect the magnitude of the temporal SE and its distortion in the different experimental conditions for the children in the age range from 4 to 7 years. Therefore, this factor was excluded from subsequent statistical analyses. The following statistical analyses (ANOVA) performed on the mean temporal SE for each condition consequently used three factors: two within-subjects factors (target duration and stimulus) and one between-subject factor (with vs. without ToM).

Control condition

Figure 58 shows the mean temporal SE produced for the walking silhouette (control stimulus) by the children “with” and “without” explicit ToM for the target durations of 4 and 8 s.

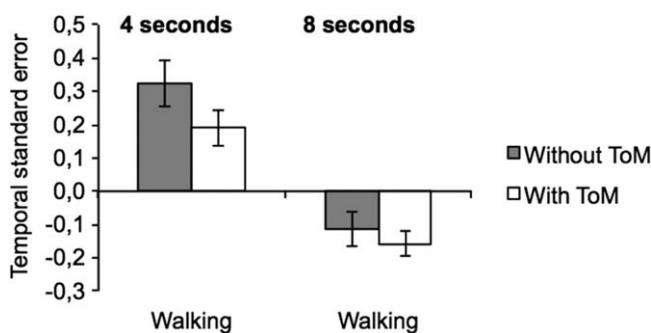


Figure 58. Mean temporal standard errors for children “with” or “without” theory of mind (ToM) in the control condition (a walking man) for the 4-s and 8-s target durations

The ANOVA on the temporal SE showed neither main effect of ToM, $F \leq 1, p > .10$, nor ToM \times Duration interaction, $F \leq 1, p > .10$. There was only a significant main effect of duration, $F(1, 55) = 29.03, p < .001, \eta^2_p = 0.35$, indicating that the 8-s duration ($M = -0.14, SE = 0.07$) was underestimated compared with the 4-s duration ($M = 0.26, SE = 0.087$). The t test comparing the temporal SE with zero indeed showed that the long duration tended to be underestimated, $t(56) = -2.19, p = .03$, and the short duration overestimated, $t(56) = 2.93, p = .005$. In sum, for the control stimuli (walking man), the temporal reproduction was similar between the children with or without explicit ToM.

Movement condition

Figure 59 shows the mean temporal SE for the three moving silhouettes: running, walking (control), and crawling.

The ANOVA performed on the temporal SE showed a significant main effect of

movement, $F(2, 110) = 46.39, p < .001, \eta^2_p = 0.46$. This indicates that the time reproductions varied as a function of perceived movement, being shorter for the running man ($M = -0.53, SE = 0.04$) than for the walking man ($M = -0.29, SE = 0.05$) and longer for the crawling man ($M = 0.01, SE = 0.08$) than for the walking man (all Bonferroni tests, $p < .05$). However, there was also a significant main effect of the ToM group, $F(1, 55) = 4.72, p = .034, \eta^2_p = .08$, and a significant Movement \times ToM interaction, $F(2, 110) = 9.30, p < .001, \eta^2_p = 0.15$, suggesting that the time distortions observed in response to “movement” changed with the acquisition of an explicit ToM. However, there was also a three-way interaction between Duration, Movement, and ToM, $F(2, 110) = 5.10, p = .008, \eta^2 = 0.09$, which subsumed a main effect of duration, $F(1, 55) = 63.89, p < 0.001, \eta^2 = 0.54$, as well as a Duration \times Movement interaction, $F(2, 110) = 5.97, p = .003, \eta^2 = 0.10$.

Although the long duration ($M = -0.49, SE = 0.04$) was more underestimated than the short duration ($M = -0.05, SE = 0.07$), we found the same significant effect of movement in the results of ANOVAs conducted on each duration taken separately: 4 s, $F(2, 110) = 48.89, p < .001, \eta^2_p = 0.47$; 8 s, $F(2, 110) = 22.06, p < .001, \eta^2 = 0.29$. This confirms that the target duration was always reproduced shorter for the running man than for the walking man and longer for the crawling man than for the walking man (Bonferroni, all $ps < .05$). However, for the short duration of 4 s, there was a significant Movement \times ToM interaction, $F(2, 110) = 13.77, p < .001, \eta^2_p = 0.20$, with a significant main effect of ToM, $F(1, 55) = 4.56, p = .037, \eta^2 = 0.08$, whereas this interaction, $F(2, 110) = 2.27, p = .108$, and the main effect of ToM, $F(1, 55) = 2.86, p = .097$, just failed to reach significance for the long duration of 8 s. This means that the magnitude of the time distortions when moving stimuli were perceived was higher in the children with ToM than in those without ToM in the short duration condition. However, this was not the case in the long condition, in which all durations were greatly underestimated

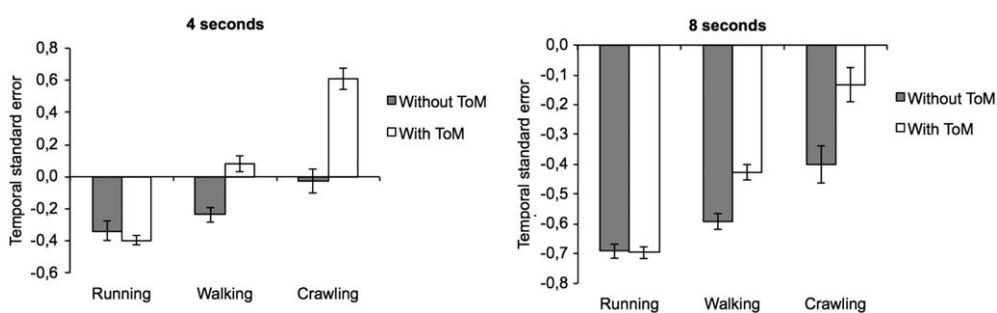


Figure 59. Mean temporal standard errors for children “with” or “without” theory of mind (ToM) in the movement condition (running, walking, and crawling) for the 4-s and 8-s target durations

Object movement condition

Figure 60 shows the mean temporal SE produced by the children with and without ToM for moving silhouettes with different objects: cycling, walking, and overburdened.

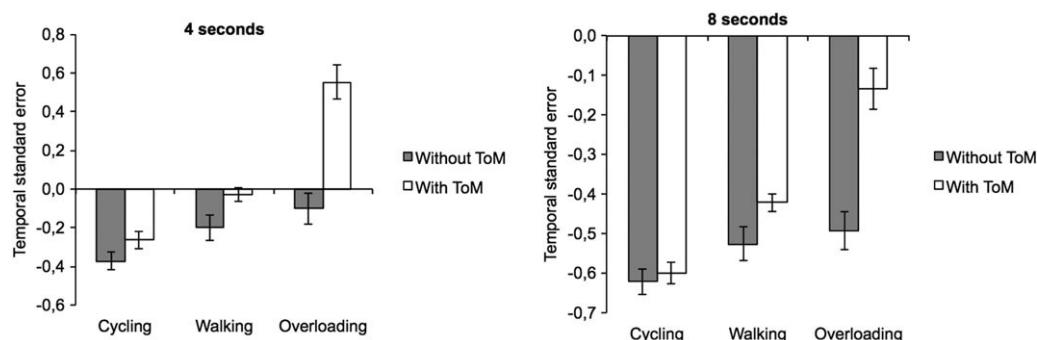


Figure 60. Mean temporal standard errors for children “with” or “without” theory of mind (ToM) in the object-movement condition (cycling, walking, and overburdened) for the 4-s and 8-s target durations

The ANOVA run on the temporal SE found a significant main effect of the object-movement factor, $F(2,110) = 36.26, p < .001, \eta^2_p = 0.397$, and a significant Object-movement \times ToM interaction, $F(2, 110) = 11.32, p < .001, \eta^2_p = 0.171$, with a significant main effect of ToM, $F(1, 55) = 4.56, p = .037, \eta^2_p = 0.08$. This indicates that time reproductions varied as a function of the “moving” silhouette in all children, being shorter for the cycling man ($M = -0.46, SE = 0.05$) than the walking man ($M = -0.30, SE = 0.05$) and longer for the overburdened man ($M = -0.04, SE = 0.08$) than for the walking man (Bonferroni tests, all $ps < .05$). However, the differences in the time distortions with the “object-movement” were higher in the children with ToM than in those without ToM as indicated by the significant Object-movement \times ToM interaction. The ANOVA also found a significant main effect of duration, $F(1, 55) = 46.24, p < .001, \eta^2 = 0.46$, and a significant Duration \times Object-movement interaction, $F(2, 110) = 3.54, p = .032, \eta^2_p = 0.06$. This indicates that the duration was judged longer for the overburdened man than for both the walking and the cycling man, even though the duration was always underestimated with the long duration of 8 s and tended to be overestimated with the short duration of 4 s, as indicated by the t tests run to analyse the difference between SE and zero, $t(56) = -4.11, p = .001$, and $t(56) = 1.91, p = .06$, respectively.

Aging condition

Figure 61 presents the temporal SE for the two age silhouettes (young and old) when the children were sorted by the ToM group. The ANOVAs run on this temporal index revealed a main effect of “aging”, $F(1, 55) = 8.21, p = .006, \eta^2 = 0.13$, with the duration being overestimated for the old silhouette ($M = 0.44, SE = 0.24$) compared with the “young” silhouette ($M = -0.21, SE = 0.05$). The Aging \times ToM interaction just failed to reach significance, $F(1, 55) = 3.14, p = .074$. There was no other significant effect ($ps > .05$), except a significant main effect of duration, $F(1, 55) = 19.06, p < .001, \eta^2 = 0.26$, confirming the underestimation of the long duration ($M = -0.16, SE = 0.09$) compared with the short one ($M = 0.40, SE = 0.19$). There was also a significant main effect of ToM, $F(1, 55) = 8.15, p = .006, \eta^2 = 0.13$. The children without ToM ($M = -0.25, SE = 0.19$) thus reproduced shorter durations than those without ToM ($M = 0.49, SE = 0.18$).

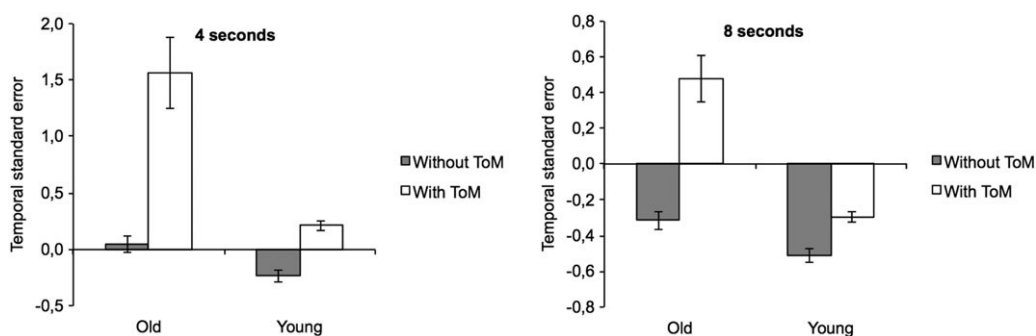


Figure 61. Mean temporal standard errors for children “with” or “without” theory of mind (ToM) in the aging condition (old and young) for the 4-s and 8-s target durations

Emotion condition

As can be observed in Figure 62, the ANOVA found a significant main effect of emotion, $F(1, 55) = 31.24, p < .001, \eta^2_p = 0.36$, indicating that sadness ($M = 0.20, SE = 0.11$) induced longer judgments than happiness ($M = -0.26, SE = 0.71$). However, there was also a significant Emotion \times ToM interaction, $F(1, 55) = 5.01, p = .029, \eta^2_p = 0.08$, with no main effect of ToM, $F(1, 55) = 0.50, p = .82$. The main effect of duration was always significant,

$F(1, 55) = 25.87, p < .001, \eta^2_p = 0.32$, while the interactions involving the duration factor did not reach significance (all $ps > .05$). The significant Emotion \times ToM interaction thus revealed that the difference in the temporal judgment between the emotional stimuli was higher in the children with ToM than those without ToM.

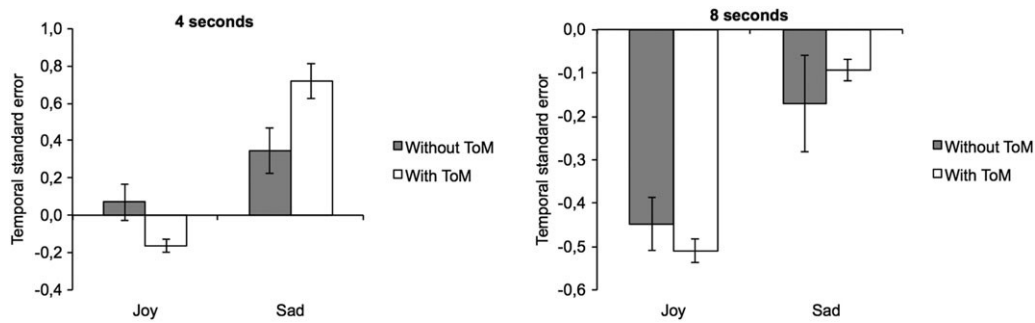


Figure 62. Mean temporal standard errors for children with or without theory of mind (ToM) for the emotion condition (joy and sad) for the 4-s and 8-s target durations

Discussion

In our study, the children's task was to learn target durations and to reproduce them in response to the presentation of static pictures of individuals whose posture or shape suggested different body states. The children were not explicitly instructed to take account of the characteristics of the individuals and did not see them moving. Despite this, all the children aged from 4 to 7 years produced different durations as a function of the pictures perceived. Indeed, their temporal reproduction was shorter for the picture of the running man than for that of the walking and crawling man (movement condition) and was also shorter for the picture of the cycling man than for that of the walking or overburdened man (object-movement condition). Their temporal reproduction was also longer for the picture of an old man than for that of a young man (aging condition), and for that of a sad man compared with that of a happy man (emotion condition), although the duration tended to be more greatly underestimated for the long duration of 8 s than for the short duration of 4 s.

These results demonstrate that the young children did not simply reproduce the duration of a picture but embedded the state of the individual perceived in this picture in their own time reproduction. Our results thus replicated in children the results found in adults in a temporal bisection task with pictures of ballerinas (Nather et al., 2011) or faces of elderly persons (Chambon et al., 2005; Chambon et al., 2008). In addition, our study showed that all the

children, even those without an explicit ToM (i.e., those who failed the Sally–Anne test), embodied the other person's state in their temporal judgments.

Our results thus demonstrate that the ability to embody another person's state in our own time judgments emerges early, and at least in children as young as 4 years. The integration of other people's states in our own time judgments would thus result from an implicit and automatic system that is functional at an early age. This supports the developmental theory defended by Droit-Volet according to which young children (before 6–7 years) do not have a continuous and abstract representation of time (Newtonian time) that is independent of its content (see also McCormack & Hoerl, 2017). Time is initially broken up into a plurality of diverse and heterogeneous times (multiple action time), that is, a series of event/action-specific durations and a series of durations associated with experienced/perceived events or actions (Droit-Volet, 2011; Droit-Volet & Rattat, 1999; Rattat & Droit-Volet, 2002). Consequently, when children have to judge the duration of an action produced by another, they automatically reactivate the duration of this action in memory together with the sensory-motor information associated with this action. This in turn produces distortions in time judgments with durations being reproduced shorter for fast actions (e.g., running man) than for slower actions (e.g., walking man). The automatic influence of the characteristics of action on time judgment is consistent with the idea that implicit timing would require “temporally structured sensorimotor information” (Magnani & Musetti, 2017, p. 4).

The originality of our study also lies in the finding of a significant interaction between the experimental conditions and the acquisition of an explicit ToM. Indeed, in our study, time distortions appeared to be more accentuated in the ToM group than in the no-ToM group. It could be suggested that this finding was due to the development of motor control (motor inhibition) rather than to the development of a ToM per se. Indeed, in some conditions (e.g., aging condition), the children with ToM tended to produce longer durations than those without ToM. Although this explanation cannot be totally excluded, it is unlikely because the temporal performance of the two ToM groups was similar in the control condition, on the one hand, and because the difference in condition-related time distortions between the two ToM groups was not observed in all experimental conditions.

It is more likely that the greater time distortion in the children with ToM is linked to their explicit knowledge of mind, which increases the awareness of the different states felt by others. The development of a consciousness of other people's mental states is obviously intrinsically related to the development of general cognitive functions, such as executive functions and language

(De Villiers & Pyers, 2002; Hale & Tager-Flusberg, 2003; Slade & Ruffman, 2005). However, the time distortions observed in our study cannot simply result from general development of cognitive functions. Indeed, our statistical analyses did not indicate any effect of age on time distortions in the age range tested between 4 and 7 years. The differences in cognitive capacities associated to age were thus not sufficient to significantly impact the magnitude of time distortions in our experimental conditions.

It is more likely that the consciousness of other people's mental states in children who have acquired a ToM would interfere with time distortions that are automatically triggered in the light of the other person's characteristics. As the consciousness of other people's mental states improves the understanding of other people, children with ToM would pay more attention to such persons' states (i.e., silhouettes). This would in turn increase the influence of these states on the children's time judgments (i.e., leading to greater time distortions). Consequently, our results are consistent with the idea that a cognitive system of explicit conceptual representation of the other would emerge as of the age of 5–6 years (Apperly & Butterfill, 2009; Schneider et al., 2012). This system would then impact the time distortions automatically induced by the perception of the other's body states by increasing or decreasing them.

In our study, children's time distortions were observed in response to a silhouette that moved from left to right for a given distance. In further experiments, it will be interesting to examine this type of time distortion in children in other situations. It would, for example, be interesting to examine these time distortions with other spatial directions (frontal or lateral; see Charras, Droit-Volet, Brechet, & Coull, 2017) or other cues in order to identify the critical information that either does or does not trigger the embodiment of other people's time in temporal judgment. Nevertheless, in our study, the children judged the time taken by the silhouette to traverse a distance. The time judgment was thus based on the time—space relation (i.e., the speed of travel). In our study, the time embodiment of the other's state thus also accounts for the interrelations of time and speed in the evaluation of action duration. Several studies have shown how the time judgments of both adults and young children are influenced by speed and movement (e.g., Casasanto & Boroditsky, 2008; Charras et al., 2017; De Hevia, Lee, & Streri, 2017). Our study therefore provides additional evidence of early interference in the judgment of magnitudes involving different dimensions (duration and speed) that seem to be related either to a unique generalized magnitude system, as suggested by Walsh (2003) in his theory of magnitude (ATOM), or to specific but interfering systems (for a discussion, see Lourenco & Longo, 2011). Cognitive development, which leads to the acquisition of explicit

representations, would therefore modify interdimensional interference effects by decreasing or increasing them, as found in our study.

In sum, our study demonstrates that young children, just like adults, embedded other people's states in their time judgments. As we have suggested, this seems to be due to an automatic mechanism that allows individuals to be attuned to others. However, the development of the awareness of other people's mental states would increase the embodiment of other's time because it conducts individuals to pay more attention to other people's states. In conclusion, automatic time distortion in a social context suggests that time processing lies at the core of social interaction.

AXE III : TEMPS ET MODÉLISATION

III – 1. Construction d'un nouveau mécanisme d'horloge interne développemental.

Hallez, Q., Mermillod, M., & Droit-Volet, S. (en preparation).

Introduction

Faced with the difficulty of understanding the processing of time by the brain, in 1990, Church and Broadbent proposed a connectionist model of internal clock which, if we really look at it, turns out to be one of the most finalized timing model existing today. Its main interest is that it allows the unification of neurological models (Miall, 1989) with pre-existing models of information processing (Gibbon, Church & Meck, 1984), based on the scalar expectancy theory (SET) developed by Gibbon (1977) and Church and Gibbon (1982), which is still one of the most widely used models. We can therefore question the little attention that this model received. This can however be explained by the authors, who have not sufficiently defended their model or tried to update it following the first criticisms. Like many researchers, they have been more concerned with findings than selling their work. However, the obstinacy and willingness to defend one's work are qualities that are nowadays essential to the air of scientific digital communication. Science becomes a communication work. With the arrival of the striatal beat frequency (SBF) model of Matthew Mattel and Warren Meck (2004), Church and Broadbent did not succeed or rather did not fight to defend their connectionist model. Therefore, researchers rarely cite this model and rather quote that of Mattel and Meck, even if the latter model is not unanimously approved (Ivry & Schlerf, 2008). Nevertheless, understanding each model requires modelling training and a real effort to understand the model and its utility for research activities.

Church and Broadbent's model is a connectionist version of the SET. The subjective estimation of time depends on the rhythmic activity of a bank of oscillators or a set of neurons that changes state frequently. At the beginning of a stimulus to be timed, t_0 , all the oscillators start in their negative phase and oscillate from negative to positive according to their period. In their model, Church and Broadbent arbitrarily integrate 11 oscillators whose rhythmic values are doubled to one another (eg, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8, 25.6, 51.2, 102.4 and 204.8 seconds) (Figure 63). The oscillators' states at t_1 (temporal interval end) are then decoded by a paired status indicator that would record the information in a binary way: with a negative value -1, or positive +1 depending on the phase of the oscillator. Thereby, all of the 11 indicators give a discrete value. Taken together, they constitute the storage vector (V_s) allowing indicating a certain combination corresponding to a given time. This information will then be evaluated by the working memory which will analyse the status indicators two by two by analysing whether the sign is identical or not. This final temporal information is based on the quasi-immediate estimation of time. Notwithstanding, the status indicator of the reference memory, that is

indicator paired with durations that are longer memorized, results from the recovery of the temporal information through a vector of recovery (Vr) of the reference times and the transformation of the storage vector in working memory in output vector (Vso). Finally, these last two vectors (Vr and Vst) will be judged by the comparator according to a decision criterion leading to the final judgment.

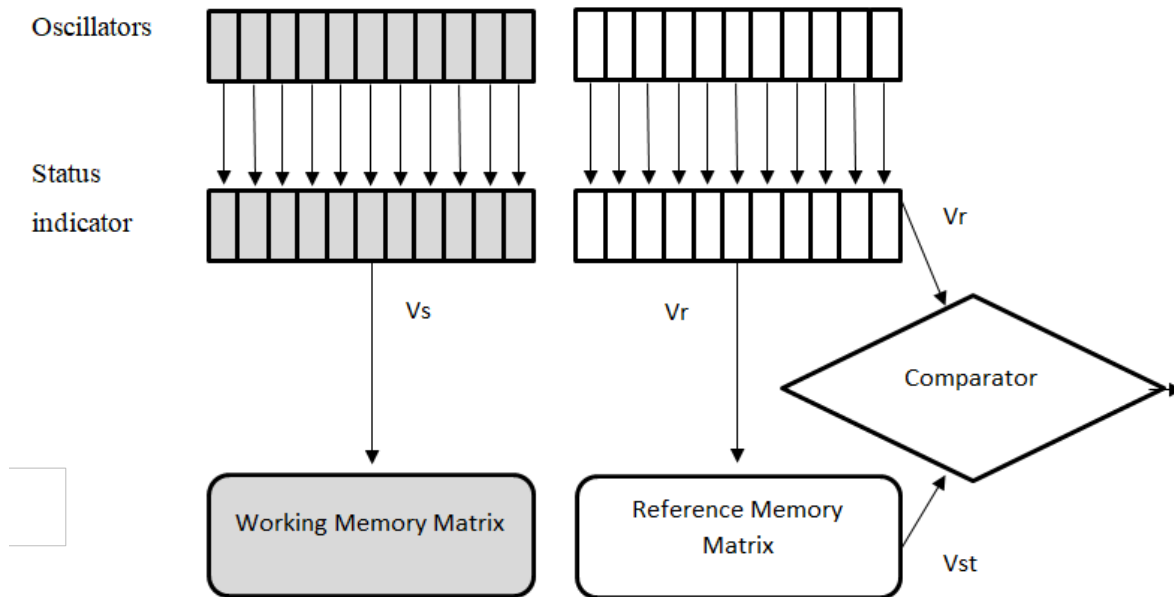


Figure 63. Connectionist model of the internal clock, according to Church and Broadbent, 1990. Vs = Storage vector; Vr = reference vector; Vst = Transformed storage vector.

The simulation of this model has accounted for a large part of temporal behavioral effects found in humans and animals (Wearden & Doherty, 1995; Wearden, 2016). In particular, this model simulates the property of scalar timing (i.e., longer durations associated with longer estimations and further temporal variability). However, the major problem of this model (as others) lies in the fact that the variance is injected directly into each of the inputs (e.g., oscillator) according to a coefficient of variation, c . In this way, temporal judgment necessarily responds to Weber's law with a standard deviation that increases at the same time as the mean. The scalar temporal variance is therefore not an emergent property of the model. Since the noise is artificially generated input, inevitably, it is found at the output. The challenge lies in the fact that the scalar property of time must be able to be explained mechanically by the model itself.

Furthermore, since the model is based solely on the similarity of the vectors, the researchers found that when the threshold is low, the model can suffer of ordinality; 15 seconds is thus perceived as further similar to 40 seconds than 30 seconds (Wearden & Doherty, 1995).

According to the BFS model (Matell & Meck, 2004), time estimates is also based on rhythmic pluriactivity of oscillators. A given time interval is encoded by a few of these oscillators, located in cortex, that are active both at the beginning and at the end of the target interval. It is the striatal neurons located in the striatum (subcortical structure) that act as coincidence detectors between the states of the different oscillators, since the latter receives all of the projection generated by these oscillators, that is, all the dopaminergic excitatory information, generated simultaneously by the cortex and the thalamus. Some time period, tI , which is usually very much longer than the inter-burst times of the neurons or the oscillator periods, is represented by the coincidence of oscillator states (or neural firing states). That is, tI is represented by the set of oscillators that happened to be in the same state (or firing) at tI (Figure 64). The input from the cortical “oscillators” could be more or less effective in making the spiny neuron fire, depending on synaptic connections. After a specific duration, tI , the synapses that were active at tI increased their weight, so the spiny neuron became more likely to fire at tI than other times.

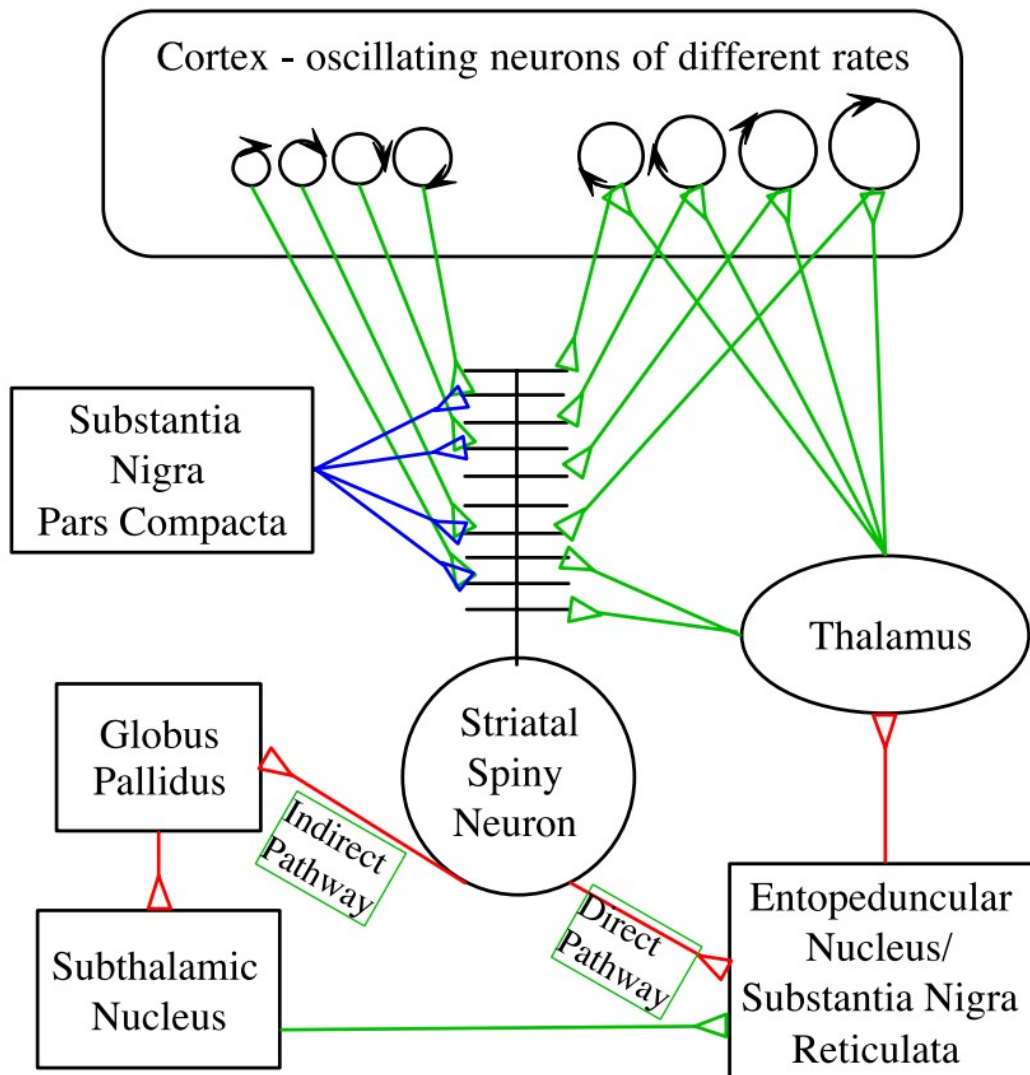


Figure 64. Matell and Meck's Striatal Beat Frequency model, extracted from Matell & Meck, 2000

As such Matell and Meck's model have a high degree of physiological plausibility, it is now one of the most popular model. However, it suffers from the problem of ordinality (Buhusi, Oprisan & Buhusi, 2018; Droit-Volet & Wearden, 2003). Indeed, the system cannot tell you whether t_1 is greater than t_2 as there is no predetermined order of neural patterns. Furthermore, in this model, the variance of oscillators is still not the result of the construct as it is directly inserted in the input.

In summary, according to these models, variability in our judgments of time as well as time distortions results of a clock we are endowed with but that that is defective. But then,

what is responsible for inter-individual differences in time judgment. It is now well established that young children are less accurate and more variable (lower time sensitivity) in their time estimates in many tasks of explicit time judgment: temporal bisection (e.g., Droit-Volet & Wearden, 2001), temporal generalization (e.g., Droit-Volet, Clément & Wearden, 2001) or temporal reproduction task (e.g., Hallez & Droit-Volet, 2017) (for a review see Droit-Volet, 2011). The question is: what causes the age-related increase in time sensitivity? If all the variability is due to the clock, then it implies that it evolves through the ages, that it matures, that it is plastic (Droit-Volet, 2016). Nevertheless, no study or simulation has already be able to test this hypothesis, despite of the attempts (Droit-Volet, 2017).

Nevertheless, more and more studies have shown the relationship between the development of time judgment and the development of cognitive abilities (Coull & Droit-Volet; 2018; Droit-Volet, 2013, 2016). Indeed, attention (Hallez & Droit-Volet, 2016, 2019), or/and working memory (Droit-Volet & Hallez, 2018; Droit-Volet & Zélanti, 2013b; Zélanti & Droit-Volet, 2011), as well as the speed of treatment (Droit-Volet & Zélanti, 2013a) explained a great proportion of differences across ages in time sensitivity and time distortions. In the framework of our developmental model of a plastic clock, it is the poorer cognitive abilities that make the functioning of the internal clock fallible.

Indeed, we can consider a “fallible” clock, but also specific cognitive processes that affect time judgment when they are limited, deficient. These two mechanisms (clock structure and cognition) at the sources of variances of time judgment are not exclusive. As further explained in the construction of our model, the purpose of this original study is to reunify those two assumptions by providing a new clock model based on physiological and cognitive criteria, namely (1) plasticity (by modulating Fahlman offset) (Fahlman, 1988), (2) attention (by modulating the amount of information that could be selected in the context by providing more or less values in the database), (3) experience of time (by modulating the number of epochs) and (4) retention skills (by modulating number of hidden neurons). These 4 criteria being determined throughout the age in month of participants but also their individual cognitive abilities (short-term memory, working memory, attention, processing-speed). To this aim, 3 models were used, in order to construct our final clock model. First, we created a Simple Recurrent Network (SRN) in order to replicate the oscillatory brain’s activity. The baseline constituting the temporal error will result from the error of the difference between the subjective estimate of the state of the oscillators and their real states. Then, this model will be launched multiple times, changing the above mentioned 4 internal clock criteria. Afterward, we used all

these simulations to model the influence of each of the parameters so that they constitute the input of our internal-clock model. The final model is based on real estimations made of 308 participants (children and adults) whom individual cognitive capacities were assessed by means of different neuropsychological tests. The aim of this final model is to detect, from neuropsychological test scores, the state of each of the parameters of the internal clock, making it possible to predict temporal estimation bias.

Virtually based internal clock system

Model construction and stimuli

Simple Recurrent Network (SRN):

The basic architecture of our internal clock system results of a Simple Recurrent Network (SRN) or Elman network (Elman, 1990; Mikolov, Joulin, Chopra, Mathieu & Ranzato, 2015). SRN is an artificial neural network consisting of three main structures called layers: an input layer (x), a hidden layer (h) and an output layer (y). In each of these structures, there are different units called neurons. These neurons interact with each of the neurons of the previous and/or prior structure non-linearly. It is called recurrent because the predictions that will be made for each t moment will suffer the weight of the preceding computation, thereby allowing reproducing a memory effect. Therefore, contrary to feedforward architecture that calculates from linear combinations of inputs, recurrent architectures such as SRN consists of an input layer that is conditioned by the previous state of the hidden layers (Elman, 1990; Mikolov et al., 2015). This is the reason why the SRN model is particularly used to expose temporal dynamic behavior. We thus designed this architecture following the scalar property of timing, that is, in order to found the typical increasing error with the increasing time.

Figure 65 presents a SRN model. x_t is thus the input vector for time t , h_t is the hidden layer vector at time t , And y_t is the output at t . The recurrent effect (e.g., memory effect) is represented by the copy of the hidden layer which will have a weight on the next computation. A, R, U are the different parameters at each layer, as further explained below.

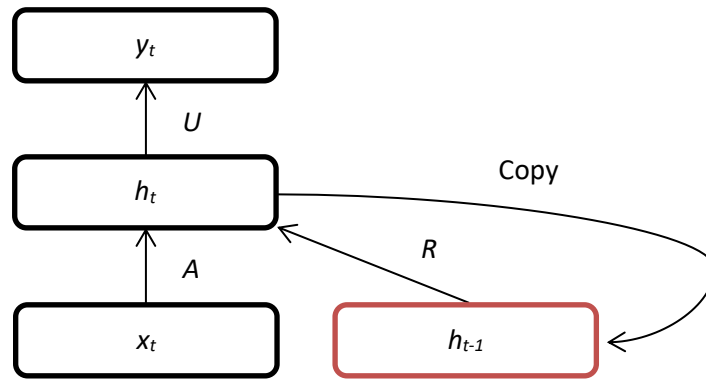


Figure 65. Simple Recurrent Model: x_t , input vector at the time, t ; h_t , hidden layer vector at time t ; y_t output vector, A , R , U parameters paired with each layer.

Mathematically, the hidden layer h_t is updated for each time t following the equation:

$$h_t = \sigma (Ax_t + Rh_{t-1})$$

where σ is the sigmoid activation function applied coordinate wise. A , R represents the weight corresponding to each of the variables. If A and U results from the calculation of the system, R is fixed with a weight of 1. Given the state of these hidden units the network then outputs the probability vector y_t of the next token, according to the following equation:

$$y_t = f(Uh_t)$$

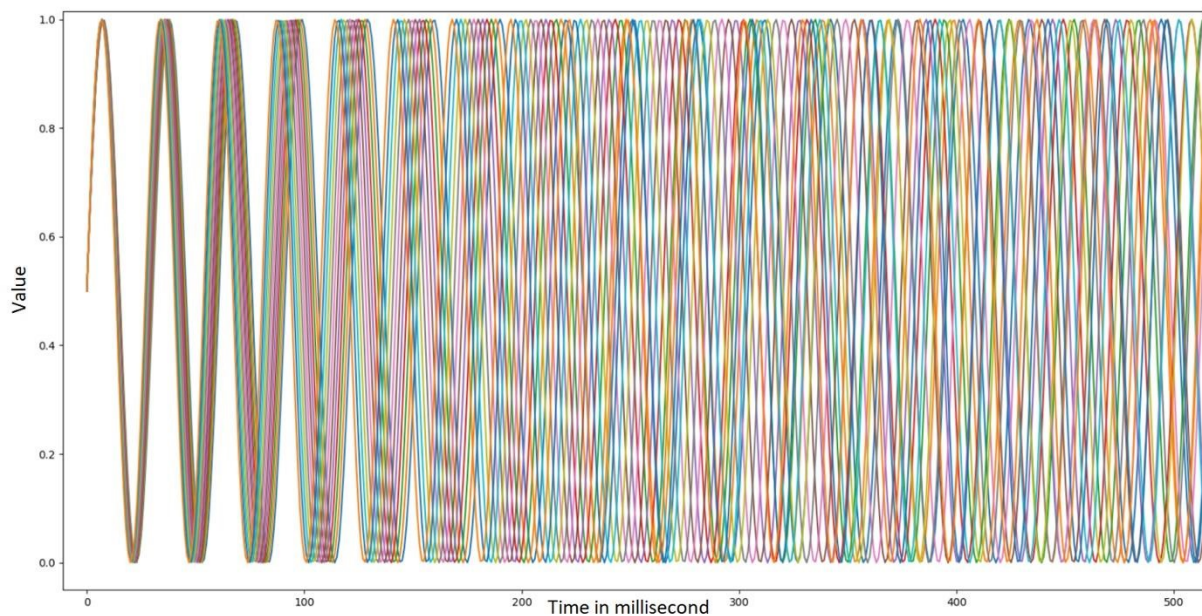
U is again the weight assigned by the program for each of the units constituting the hidden layer, and f the soft-max function. Nevertheless, the system does not find the weight of each of the neurons at one time. Calculation results from so-called gradient retro-propagation (Werbos, 1988; Williams & Zipser, 1995). It is therefore necessary to fixed the number of allowed gradient retro-propagation (epochs), which will then represent the threshold from which the program will stop the computation. Once the retro-propagation of the gradient is complete, we can then calculate the error between the output given by the network \vec{y} and the predicted vector \vec{t} of the output.

Internal clock substrate:

We arbitrarily integrated 13 entry neurons in the SRN, 12 being oscillators and 1 being a recursive input layer that is conditioned by the previous state of h_t . The oscillators of our model oscillate rhythmically taking continuous values from 0 to 1, representing neurons that fluctuate from negative to positive states every t millisecond. As proposed in the oscillation

models (Broadbent & Church, 1990; Matell & Meck, 2004), the selected neurons for the measurement of time are synchronized at the beginning of a stimulus to be timed. That being so, all of our 12 oscillators start at 0.5 for t_0 . In our model, we selected rhythms in order to have a slow desynchronization between oscillators so that they can calculate longer time without being resynchronized. As displayed by Figure 66A, the first oscillation frequency F_{o1} generates 136 cycles out of 4096 points while F_{12} makes 153 cycles. If we consider that there is 1 point every ms, we have roughly $136 / 4096 = 33.2$ Hz to $153 / 4.096 = 37.35$ Hz, with a step of 0.34583 Hz. From the spectral analysis (i.e., obtained by Fourier transformation) (Figure 66B), we can verify that $F_{o1} = 33.2$ Hz, $F_{o2} = 33.6$ Hz, $F_{o3} = 33.9$ Hz, $F_{o4} = 34.3$ Hz, $F_{o5} = 34.7$ Hz, $F_{o6} = 35.1$ Hz, $F_{o7} = 35.5$ Hz; $F_{o8} = 35.8$ Hz, $F_{o9} = 36.2$ Hz, $F_{o10} = 36.6$ Hz, $F_{o11} = 37$ Hz et $F_{o12} = 37.3$ Hz.

These hertz values were obviously not selected by chance since they correspond to the gamma oscillations of the brain that have been described as the basis of multiple cognitive activities (Başar, Başar-Eroglu, Karakaş & Schürmann, 2001), some oscillatory bands which were also found in sleep/wake cycles (Cheng, Williams, & Meck, 2008). Furthermore, we did not choose only integers, otherwise oscillators would transit simultaneously to 0 at 1 second as they begin at the same time.



B

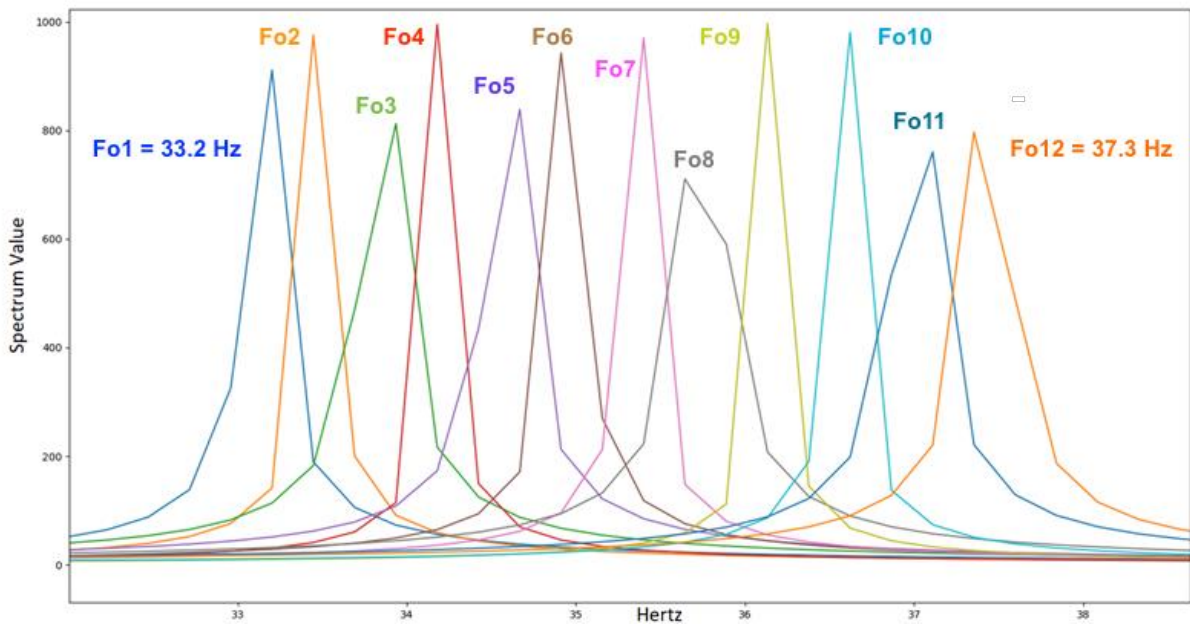


Figure 66. Representation of (A) oscillation's value for each oscillator, and (B) their relative spectrum value obtained by Fourier transformation.

The output of the model is therefore the prediction of the 12 oscillators state. The model also creates output of the recurrence, but its use is inherent to the model and its output value will not be used later. The synaptic weights were adjusted by means of the standard back-propagation algorithm. The learning rate was fixed to 0.1 and momentum to 0.9. In addition, for this simulation, we fixed the standard back-propagation (number of epochs) to 500, the learning base to a maximum of 4096 milliseconds and the fahlman offset to 0.1.

Computer simulation

In our model, predictions of oscillators' states were made for every $t_{\text{millisecond}}$. That being so, if a subject has to estimate exactly 2 seconds, then we are interested in the predictions based on the prediction of the oscillator's state at t_{2000} , where t is the cumulative average of the Euclidean distance averages of the objectives – subjective differences. Figure 67 shows the t values from 0 to 4096 ms for normal Euclidean distance (Figure 67A) and cumulated Euclidean distance (Figure 67B).

A



B

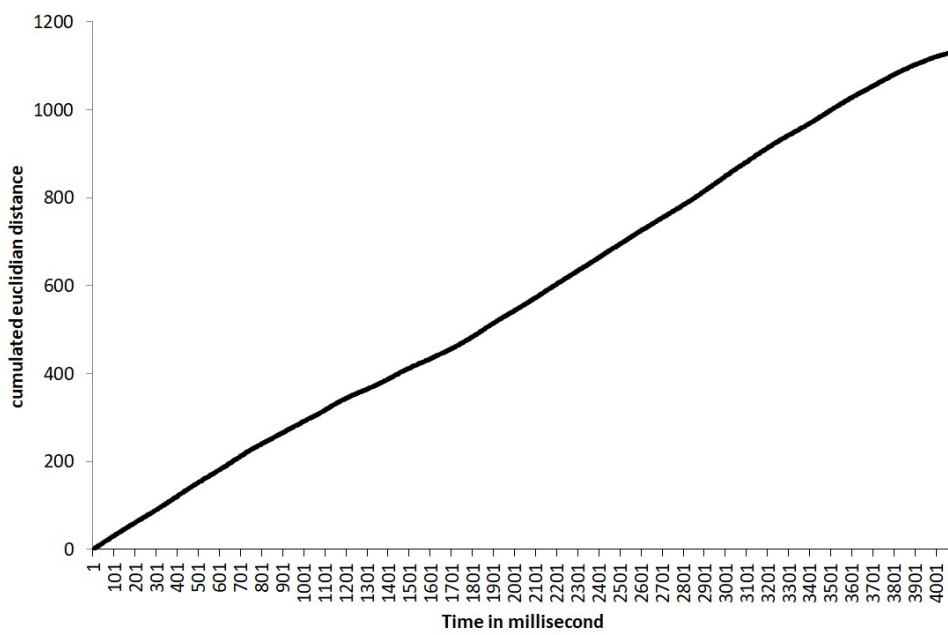


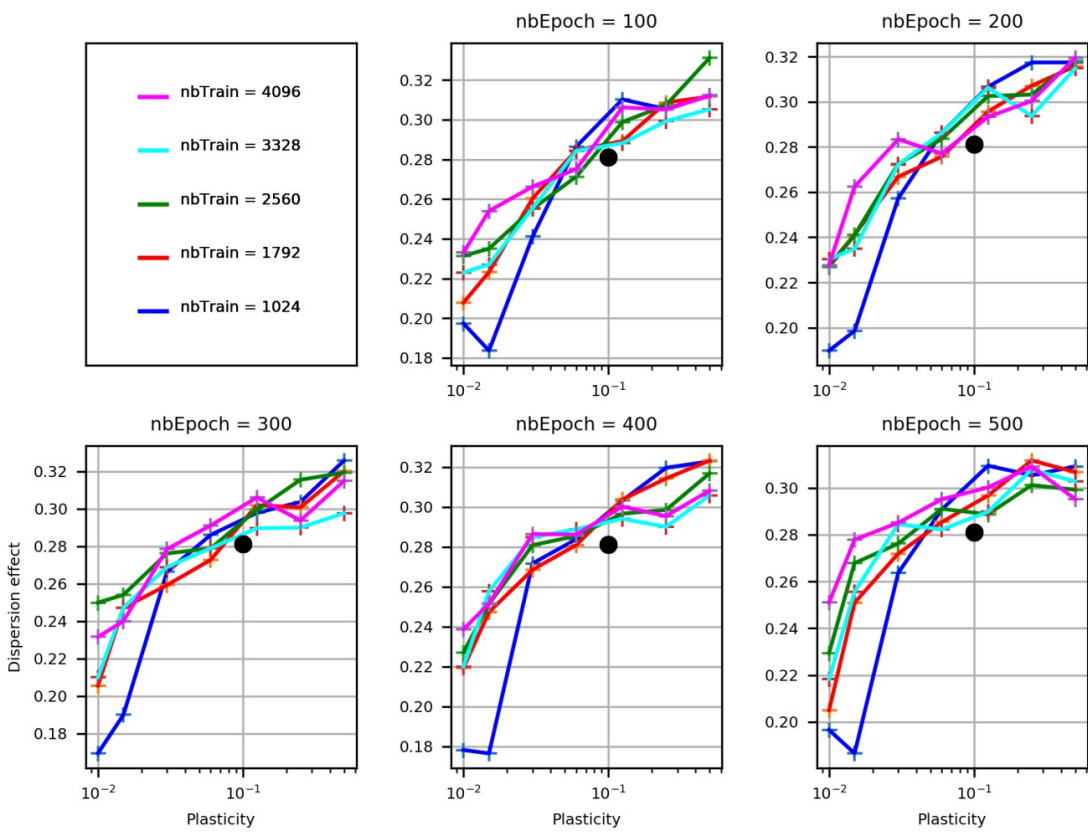
Figure 67. Illustration of the (A) Euclidean distance and (B) cumulated Euclidean distance for each millisecond's prediction.

Modulation of the sources of variance of the clock :

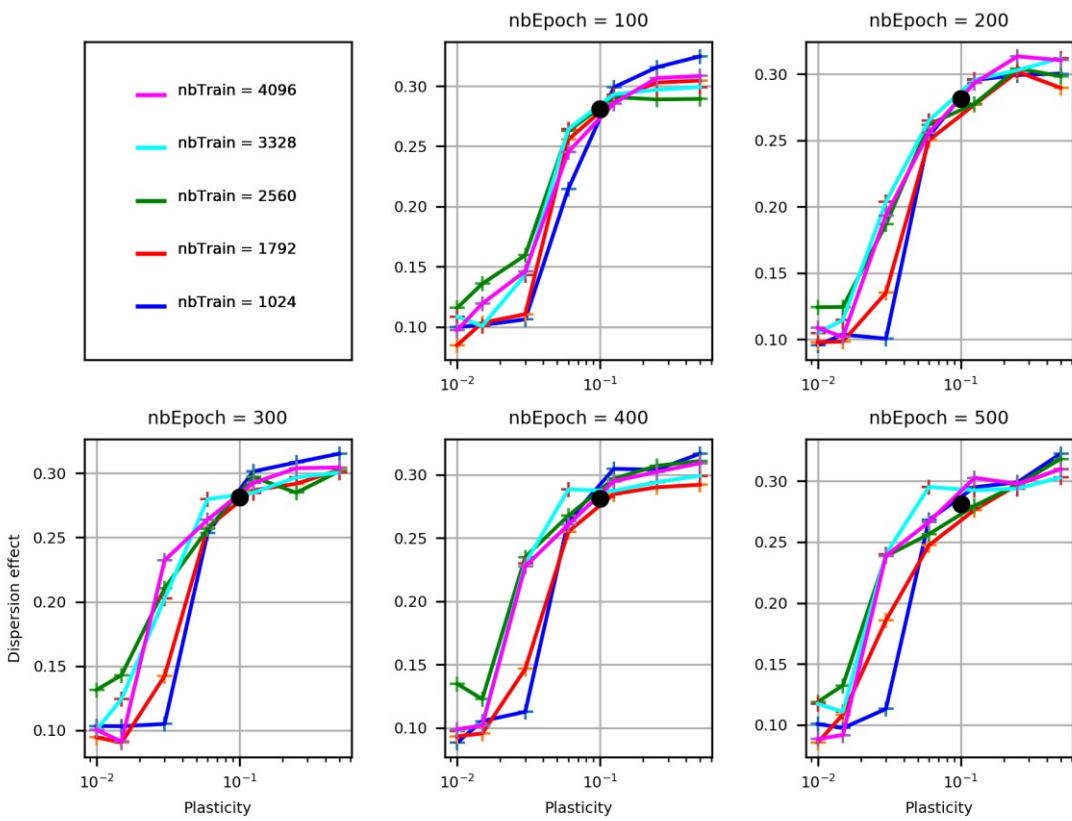
Our model was also aimed to take into account the developmental evolution of temporal productions, we have thus modulated a total of 4 criteria that may be responsible of children's higher temporal variability and time distortion namely: the plasticity, time experience, memory, and attention. Based on this model, first, we have modulated (1) the *plasticity of the system* by modulating the fahlman offset (Mermillod, Bonin, Méot, Ferrand & Paindavoine, 2012). Higher plasticity implies that the system learns faster but that it can also forget more frequently, generating critical errors in predictions. The modalities were Fahlman-offset = 0.01, 0.015, 0.03, 0.06, 0.1, 0.125, 0.25 and 0.5. Second, we have manipulated the *experience of time* by modulating the number of epochs. An epoch corresponds to the number of times the algorithm sees the complete dataset. So, whenever the algorithm has seen all the samples in the dataset, an epoch is over. This factor has been linked with the experience of time as less experience solicit more feedback and thereby more epochs. The selected epochs were 500, 400, 300, 200 and 100. Third, as memory is an important feature of time perception, we have modulated this *memory* criteria by increasing or decreasing the retention capacity via the change of the number of hidden layers. We choose 8, 16, 26, 32, 64 and 128 hidden layers in order to model this variable. Fourth, we also acted on the attention parameter of the system, by decreasing the number of information presented in the database relating to the evolution of oscillators states according to the progress of t . Indeed, lower attention should lead to a fuzzier representation of the context and therefore to a smaller amount of information content with respect to this context. The system could therefore know the evolution of oscillations up to 1.024, 1.792, 2.580, 3.328 or 4.096 seconds

With the aim of modeling each of these 4 variables as well as their relationships, we have launched the model 1200 times (8 plasticity \times 5 experience of time \times 6 memory \times 5 attention = 1200). For each of the 1200 simulations, the program generated different error curves. From each of these data, we have launched linear regressions, allowing us to obtain a temporal dispersion coefficient (e.g., reflecting an increase of the error with time). Figure 68 shows the matched dispersion coefficient for each parameter. Note that our 4 variables have implications at a qualitative level.

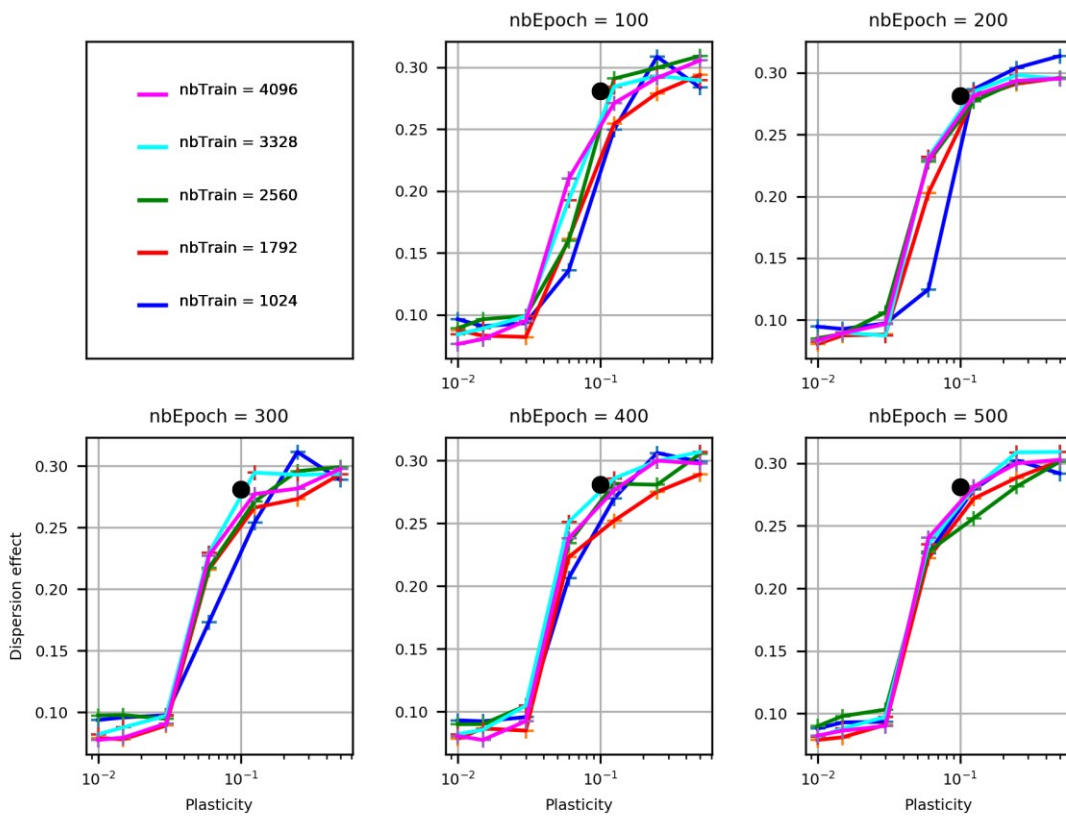
Nb Neurons = 8



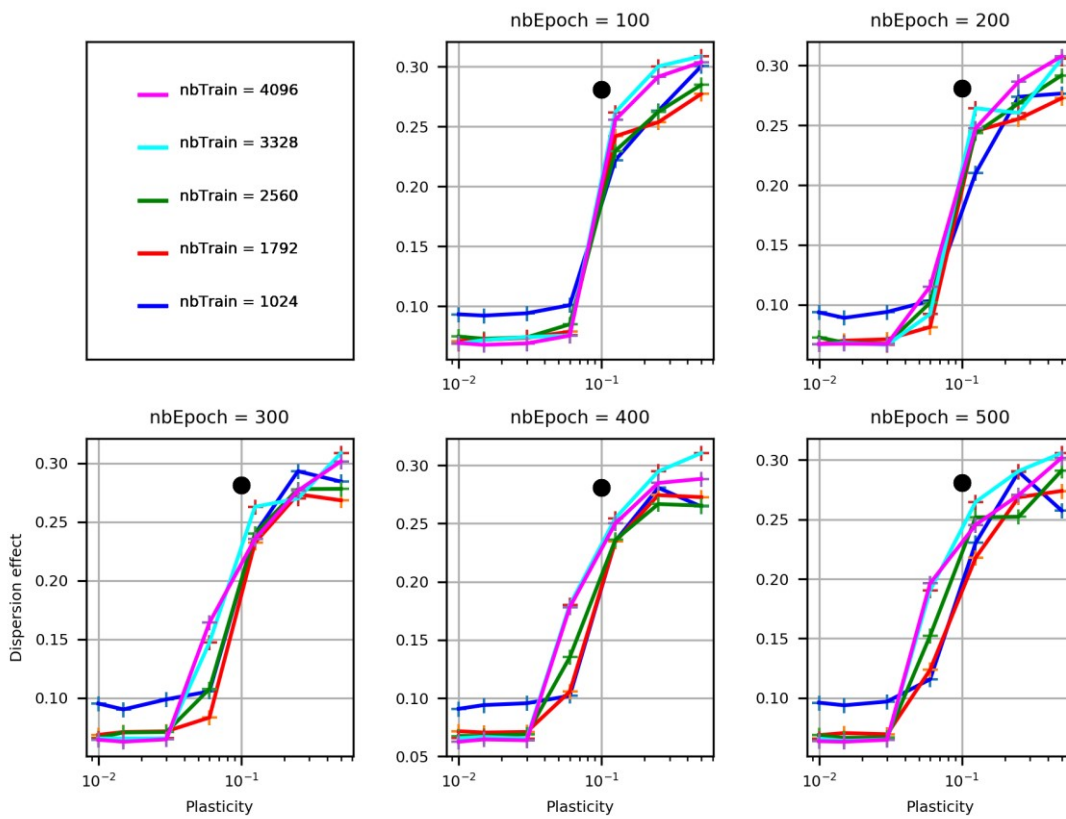
Nb Neurons = 16



Nb Neurons = 32



Nb Neurons = 64



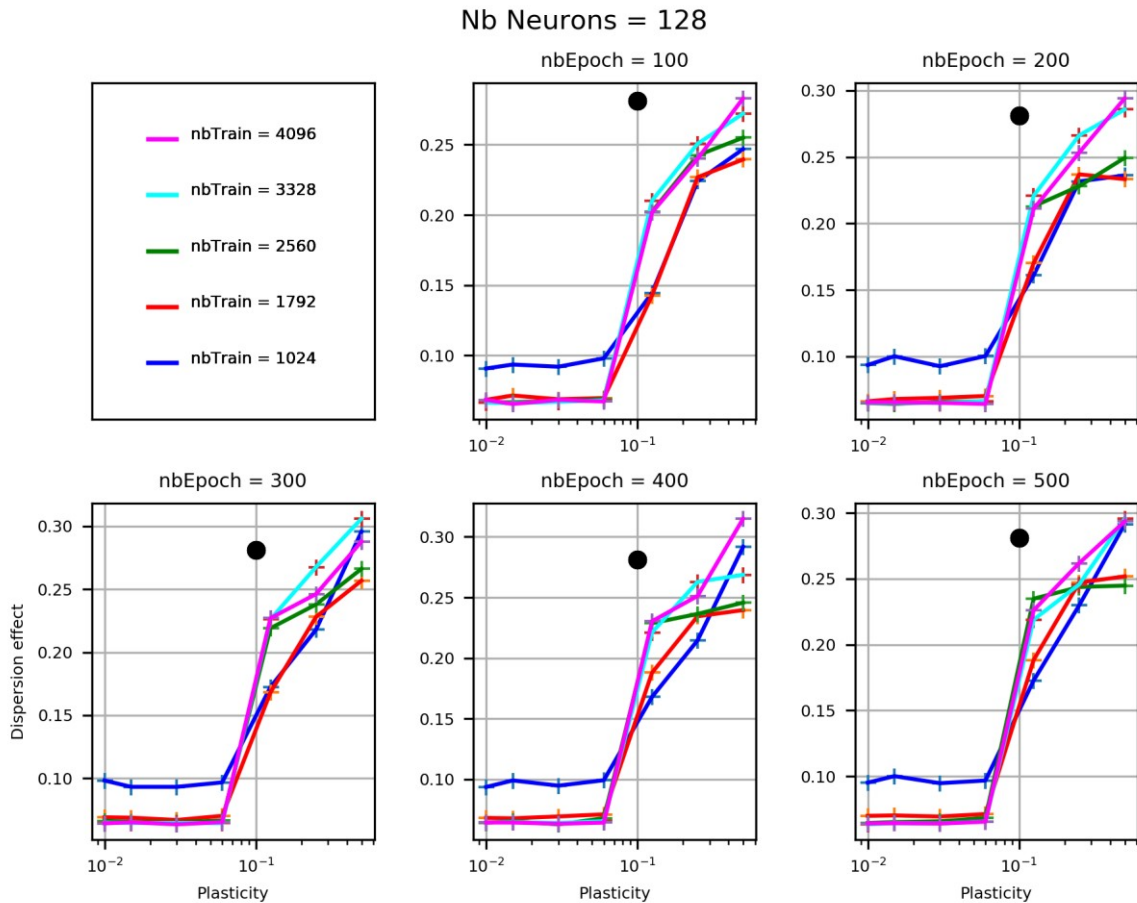


Figure 68. Illustration of temporal dispersion coefficient dispersion matched with all the modalities of our 4 variables (neurons, epochs, plasticity, informations within database). The black dot represents the matched dispersion coefficient of the model described in section 2.1.1.

Final internal clock, integrating the 4 criteria variables

So far, we have modulated 4 variables in the SRN in order to be able to test and model the effect they generated. The objective now is to gather these 4 variables within the same neural system. For the models that will follow we will use a Multi-Layer Perceptron (MLP). Therefore, the architecture will now pursue a feedforward mode of operation. That is, the h_{t-1} will no longer be integrated. Indeed, as the variables are based on the SRN results, there is no need to insert the effect a second time.

Model construction and Stimuli

All the calculated variables were normalized on a $[-1 ; +1]$ scale, and inserted as an input layer of a Multi-Layer Perceptron (MLP). Thereby, there were 4 input variables, namely number of epochs (which represents the effect of the experience of time), number of inserted

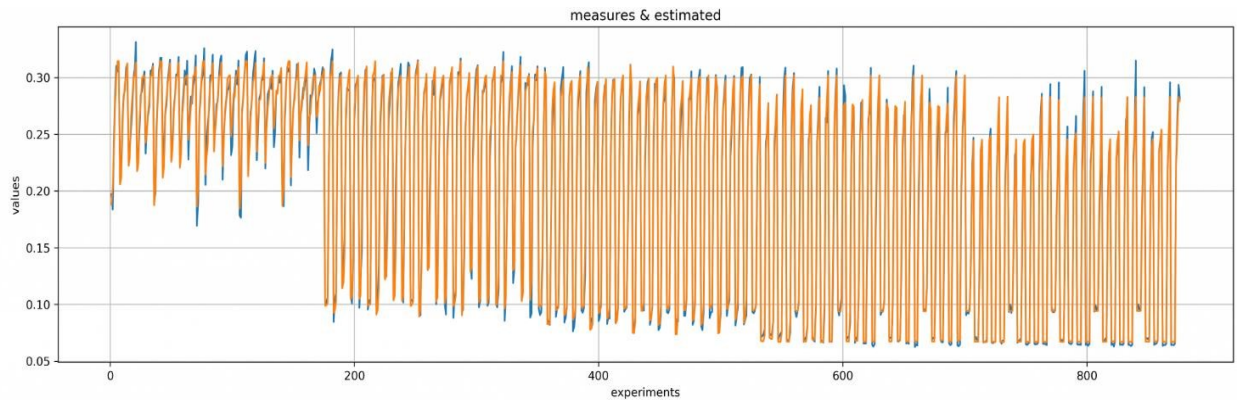
information in database (which reflects the effect of attention), plasticity (which is paired with the learning plasticity) and number of neurons (which is associated with storage capacity) constituting the hidden layer (h_t) of the previous SRN model, as well as a 5th entry corresponding to a bias. We used the “Regressor” object of the python’s neural network toolbox named “scikit-neuralnetwork” to constitute this bias. This object has a method that fits the neural network to the given continuous data as a non-linear regression problem. The output of the model was the same output as the first presented model, in order to see if the new MLP model directly integrating our variables can predict the SRN model.

Simulation

In order to find the best hidden architecture, we have ran the model from 8 to 29 neurons constituting the hidden layer. We also have combined the numbers of possible layers with all possible combinations in a regressive order of number of neurons to use a modeling aspect of the neural network and not a deep-learning one.

Our simulations have brought out a particular model; the one with 21 neurons made of two hidden layers (14 – 7). Figure 69 shows the differences in prediction made from the SRN model from that made of the new MLP model directly integrating our 4 criteria variables. This specific multi-layer perceptron is able to determine almost all the temporal dispersions of the SRN model ($R^2 = 0.99$; Least squares sum = 0.05). We can therefore conclude that our model, integrating our developmental variables, is very satisfying.

A



B

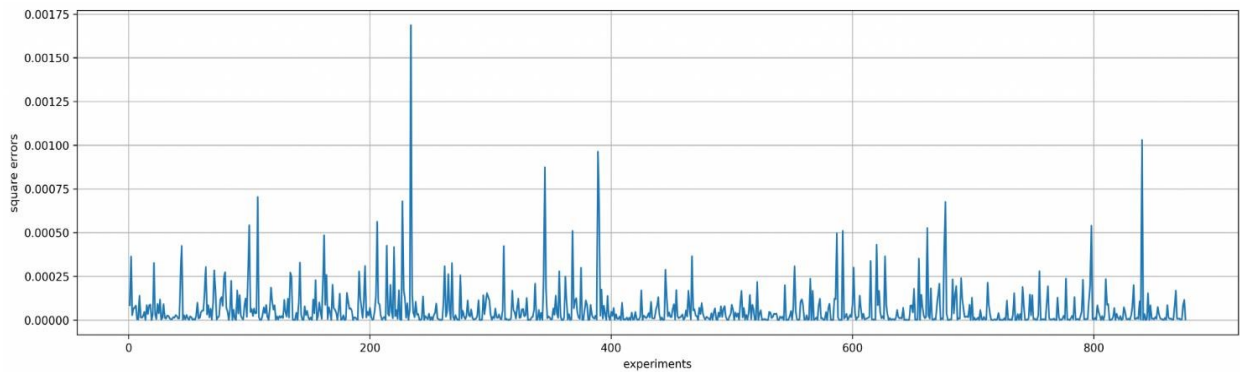


Figure 69. Illustration of data fit with (A) the Euclidean distance values observed from the SRN model in blue and estimated by the MLP model in orange with time t as well as (B) the paired square errors.

Real based internal clock

Model construction and stimuli.

Until now, we have worked on a coefficient of temporal dispersion found from the difference between the prediction of the state of the oscillators and their actual state. So far, this index coefficient does not simulate real time estimation data. Thereby, we confronted the previous model with real data, in order to analyse whether it can fit the estimation of a real human sample, across ages.

The data (time estimates) were temporal reproduction made by 192 children, aged from 5 to 8 years old ($M = 6.62$ years, $SD = 1.02$ years, [5.0 ; 8.0 years]) as well as 116 adults ($M = 21.00$, $SD = 4.17$, [17.9 ; 41.8]). These data were extracted from 3 different experiments where participants had to reproduce the duration of a light blue square, which lasted for 6 or 12 seconds. For each temporal reproduction, we calculated the absolute time error made by the

participants $((\text{Temporal Reproduction} - \text{Temporal Target}) / \text{Temporal Target})^2$ to avoid negative and positive values. Figure 70 shows the coefficient distortion paired with children and adults' productions.

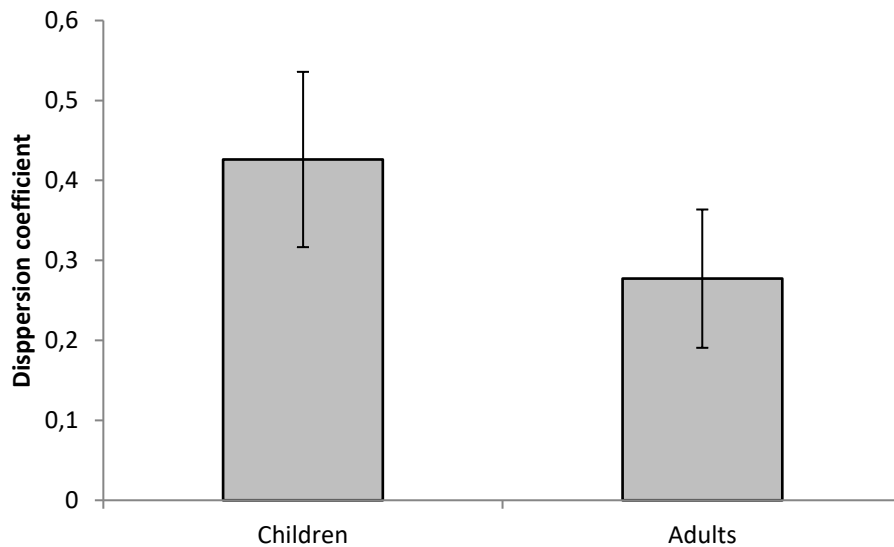


Figure 70. temporal estimation bias plotted against age in month

For each participant, we also had different neuropsychological scores assessing their capacities of attentional, short-term memory, working memory and processing speed capacities. These scores are respectively the results obtained by each participant in “Sky Search” of the Test of Everyday Attention for Children (Manly, Robertson, Anderson & Nimmo-Smith, 2006), the forward and backward scores of the corsi-block tapping task (Corsi, 1972) as well as the average of two IVT tests, namely code A and Symbol A of the Wechsler Intelligent Scale for Children (Wechsler, 2005) (for the details description of these tests, see Hallez & Droit-Volet, 2017, 2019). The data were extracted from these publications. Table 18 shows the mean and standard deviation of scores for the children and the adults.

Table 18. *Mean, Standard Deviation, minimum and maximum of raw scores of different neuropsychological tests.*

	Children			Adults		
	Mean	SD	[Min, Max]	Mean	SD	[Min, Max]
Short-term memory	5,55	1,91	[2;12]	8,91	1,83	[5;13]
Working memory	4,43	2,18	[0;9]	8,61	1,73	[4;12]
Selective Attention	19,23	16,94	[4;87]	3,81	1,49	[2,8]
Processing speed	44,28	26,28	[4;51]	59,2	8,87	[27,87]

We used these 4 cognitive variables (short-term memory, working-memory, selective attention and processing speed) as well as the age in month in an underlay of the model, in order to determine the state of the 4 variables of our internal clock (memory, experience of time, attention and plasticity). Thereby, 5 variables and a bias constituted the input layer. The 4 neuropsychological variables as well as the age in month standardized on a [-1 ; 1] scale, along with an input corresponding to a bias which had the same properties than previous model. Figure 71 presents the final architecture of the model. From the initial scores, the system looks for common explanatory weights to explain the different values of the clock variables (plasticity, epoch, learning and neurons) which themselves predicts the estimated distortion. Then, this value is denormalized (rescaled between the min and max of the output) in order to fit with the real temporal dispersion generated by children. In other words, once input variables are weighted, it fits in the same model as in model 2, which is itself built from model 1 (e.g., SRN construct), predicting a coefficient error which will be link with real temporal bias.

However, because children and adults could have a temporal bias lying between the fixed calculated parameters, our clock variables uses a 4d interpolator in order to find the most explanatory point on a continuous four-dimension space.

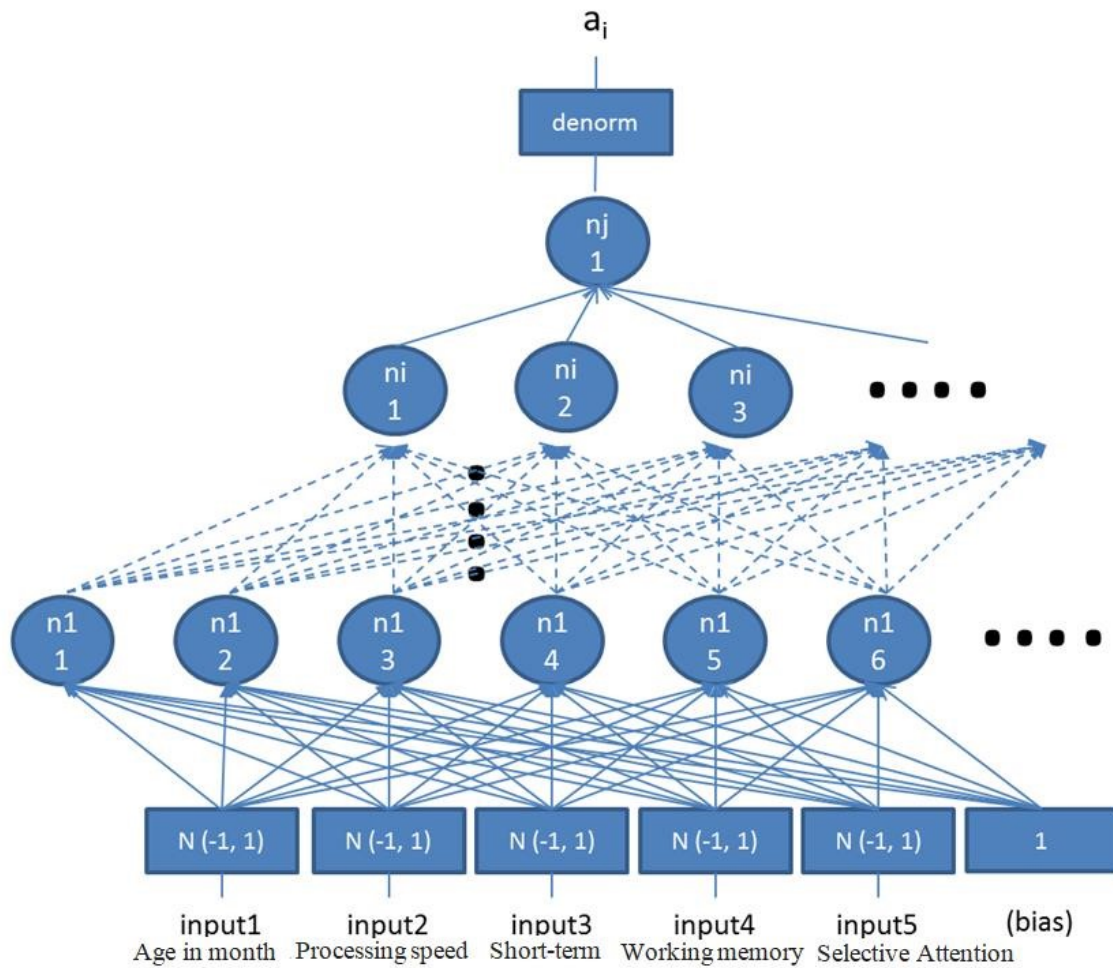


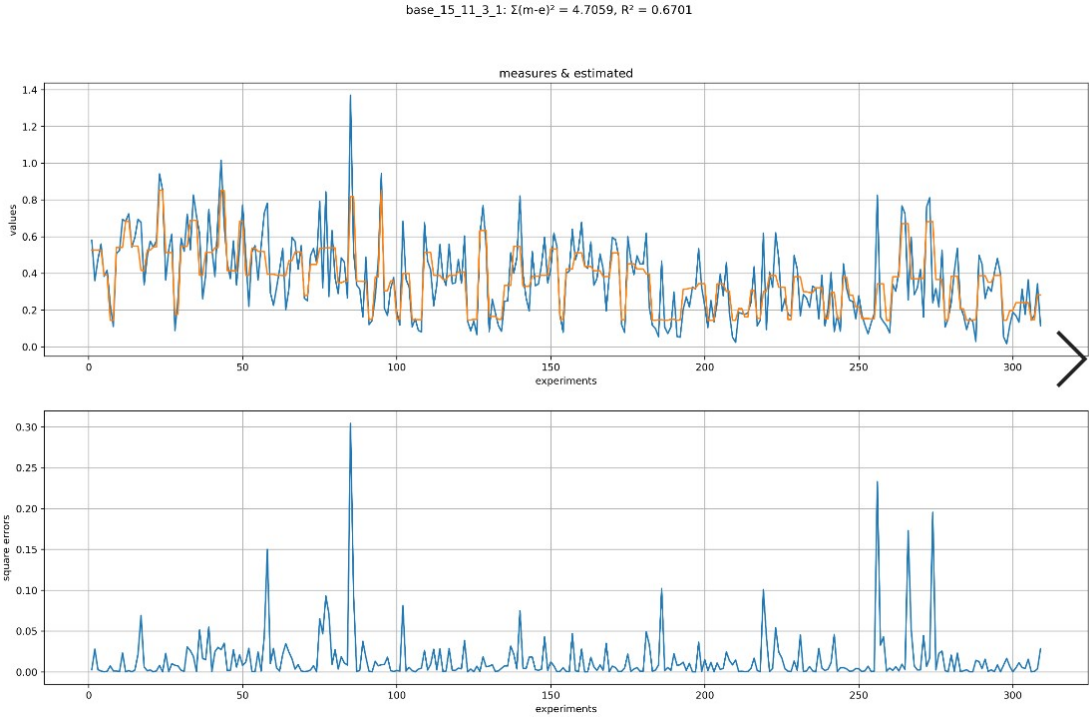
Figure 71. Final architecture of the internal clock system neural network. The neuropsychological tests as well as age in month situated as inputs predicts, through a hidden layer the state of the 4 criteria variables of the internal clock, which allows to predict the final temporal bias.

Computer Simulations

The later model was thus launched in order to predict real time estimation across ages. The same process as in the previous multilayer perceptron model was used to find the best hidden structure of the model, going from 8 to 30 neurons and combining the number of hidden layers. Two models came out of the lot among 626 computed cases. Figure 72A shows the predictions made by the model that consists of 29 neurons with 3 hidden layers (15 – 11 – 3). This model is presented because it obtained the highest level of coefficient of determination ($R^2 = .67$, Least sum squares = 4.70, LSD = 0.015, EM = 0.096, EQR = 0.63, EAR = .392). Nonetheless, the model with 24 neurons (15 – 9) is also interesting because it minimises all

errors ($R^2 = 0.65$, Least sum squares = 4.99, LSD = 0.016, EM = 0.095, EQR = 0.3, EAR = .342) (Figure 72B).

A



B

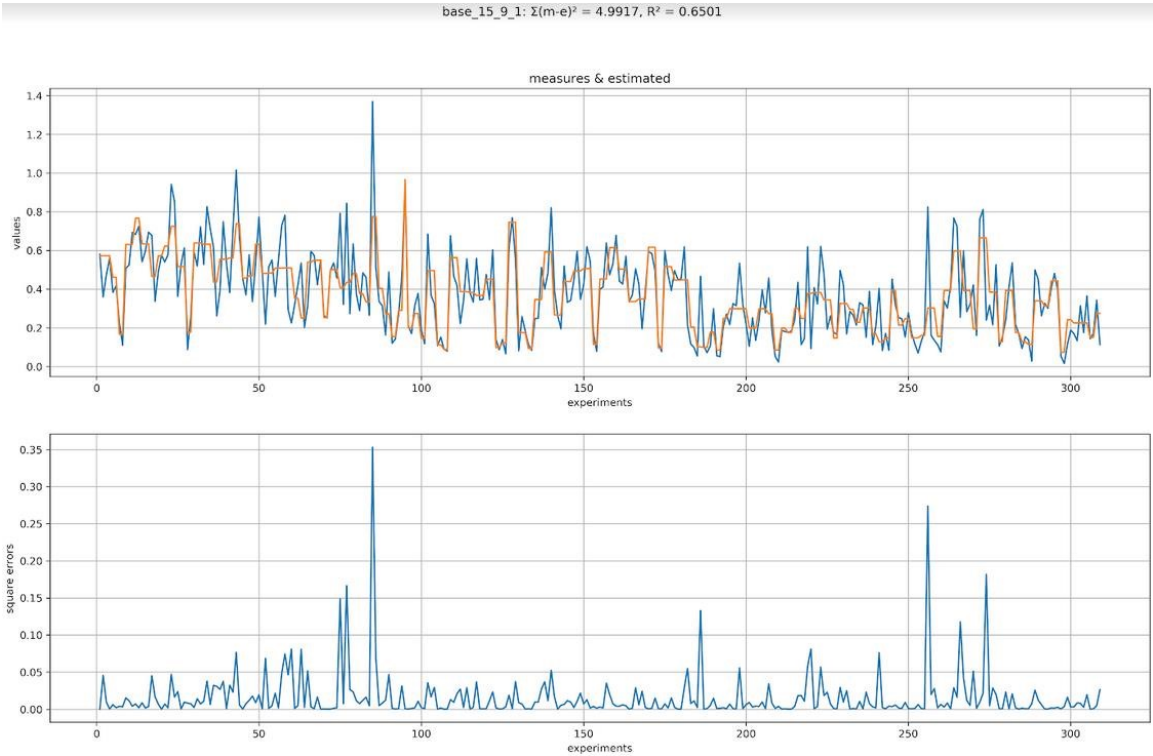


Figure 72. Illustration of the fitting of the data for (A) the model with 29 hidden neurons (three hidden layers 15 – 11 – 3) and (B) the model with 24 neurons (two hidden layers 15 – 9).

Finally, Table 2 shows the mean weight for each of the entry neurons for the latter model. It appears that the processing speed index was the most influential factor to determine the state of the 4 criteria of the clock variables. We can also see that, in a non-interfering timing context, the attention is the least influential predictor, although its influence remains important.

Table 19. *Mean weight of our psychological dimensions.*

Age in month	12.35
Processing speed	25.53
Short-term memory	15.61
Working memory	18.28
Selective Attention	6.52

Discussion

The aim of this article was to propose a new model of internal clock that we called the Cognitive Plastic Clock model (CPC model). This final model results from the combination of three successive models.

In the first place, an SRN system holding the value of each of the oscillations over time (input) makes a judgment on the state of these same oscillators after a certain time (output). The input information is thus transformed via a hidden layer, which constantly biases the prediction since it systematically takes into account the combination corresponding to the previous time. Thus, the prediction of the duration lays on the prediction error (cumulative Euclidean distance) between the real state of the oscillators and the prediction on this t time. Thereby, the model presents an increase in error with the passage of time. This model has been restarted a number of times by changing some parameters in the model, which results in a reduction of performance and is link to a cognitive capacity reduction. We modulated four main factors in order to test and model their impact on temporal performance. By changing the Fahlman offset index, we modulated the plasticity of the clock. A high plasticity setting allows the model to learn faster but can more frequently give rise to forgetfulness, resulting in critical

prediction errors. By modulating the amount of information held by the model in input, we also played on attention. Indeed, less attention generates a decrease in information that can be collected in the environment since the information cannot pass the conscious threshold. By changing the number of hidden layer neurons we have changed the retention capacity in memory. Finally, by changing the number of epochs, we played on the temporal experience. Indeed, increasing the number of epochs increases the number of feedbacks between objective and subjective duration. These four variables were thus integrated as input to a second MLP model that has been proven to predict more than 99% of the SRN system estimate. Finally, we confronted this model with real estimate made by a sample of 192 children aged from 5 to 8 as well as 116 adults. Nevertheless, it would not have been justified to allow the model to find, for each participant, the ideal parameters of the 4 variables of the internal clock. The estimations of these variables were the direct result of the individual scores of the neuropsychological participants in attention, short-term memory, working memory and processing speed, as well as the participant's age in months. This final model accounts for 65% (or 67%) of the output variance.

First of all, this model is totally viable neurobiologically since it is based on the rhythmic activity of a bank of oscillators, which corresponds to a biological reality. Indeed, the frequencies used in our model are going from 33 to approximately 37 Hz, which is similar to the pattern of neural gamma oscillation observed in humans (Hughes 2008). It is these same gamma oscillations that have been detected as fundamental in the level of awakening (Cheng, Williams & Meck, 2008). Also, similar oscillations have been found during visual treatment with either conscious or subliminal stimuli in the prefrontal cortex (Gregoriou, Gotts, Zhou & Desimone, 2009; Melloni, Molina, Pena, Torres, Singer & Rodriguez, 2007; Siegel, Donner, Oostenveld, Fries & Engel).

The main advantage of the model is that it allows to keep a certain magnitude of durations (e.g., ordinality), while the model of Mattel and Meck did not and that of Church and Broadbent partially did. Indeed, by learning the state of the oscillators through time in the first process, the model can find the magnitude of time from the pattern of oscillations. In other words, it knows that t_2 is longer than t_1 , because the oscillation pattern corresponds to a previous duration. It is this knowledge of temporal magnitudes that made it possible to reproduce the scalar property of timing on the mean. Indeed, this property implies an increase in the average production associated with the increase of time. The estimates being directly related to each time t , this implies that the productions emanates of the physical time and thereby, increase

with it. It is this same knowledge of the duration of the model which made it possible to introduce a temporal dispersion coefficient, calculated directly from the cumulative Euclidean distance between the actual state of the oscillators and their prediction. The added coefficient estimates the average dispersion that actually results from the drift in performance generated by the greater variability. This coefficient therefore testifies the gradual variance in the model, resulting in further under- or overestimation with the passage of time. It is important to underline that these characteristics were not directly injected into the model, as could be done in pre-existing models, but result from its mechanism of action.

So far, the current internal clock models dedicated to time do not include a processing mechanism allocated to non-temporal processing. It is a purely temporal, as if the duration was "disembodied" from its substance: the non-temporal information. However, a duration is always associated with a stimulus with specific properties (visual, auditory ...). Time does not exist alone. Even during an empty time interval, we see something, we think something, we feel something. The originality of our model lays on the import of physiological and cognitive variables directly into the operations of the internal clock model. Indeed, the multiple simulations made it possible to simulate the temporal biases and thus to identify the sources of cognitive and physiological variances. As above mentioned, we modulated computer parameter (fallman offset, number of neurons constituting the hidden layer, data incorporated in the input and epochs) corresponding to cognitive dimensions (plasticity, memory, attention and experience of time). As we saw Figure 68, all these dimensions had qualitative effect on the estimation of time. In adequacy with time literature, a decrease of attention or memory, increases the temporal error (de Lurdes Delgado & Droit-Volet, 2007; Hallez & Droit-Volet, 2017), while a decrease in the plasticity and the experience of time increase the error.

Finally, for the confrontation of the model with real data, it is the neuropsychological scores of selective attention, processing speed index, short-term and working memory that have, through common weights, allowed to set the state of individual variables of the internal clocks. In fact, it would not have been justified for the program to use the values that suited it the best, they had to remain in line with the individual's cognitive abilities. Even if all our neuropsychological tests have a significant weight to predict variables, one could mention the more influence weight of the processing speed index. This is totally in line with the developmental literature as Droit-Volet and Zélanti (2013) found that processing speed was the best predictor of time estimation in a non-interfering timing condition. As stated by Vernon (1987), the faster the information is processed, the lower the interference effects are. It seems

likely that the speeding up of information processing with age indirectly reflects the increasing dynamic efficiency of the neural circuits responsible for timing as the brain matures. This would also support the old statement of Surville (1960, 1963) whom established a link between neural oscillations and information processing speed.

Nevertheless, it is important to highlight that the establishment of these influences lay on a model that sits on estimation made by children and adults within a non-interfering context. In other words, it is these precise influences that make it possible to determine the temporal estimation bias according to the different inter-subject estimates, within a non-interfering context. We can thus rule on the fact that if the output variable was relative to a more interfering context, such as a dual task paradigm, we could have observed different influences of our neuropsychological variables. Studies on this paradigm having shown a strong influence of attention, it would be possible that the attentional parameter inserted in the clock is more modulated, increasing the influence of the selective attention to define its state.

We believe that our model, grounded in cognition could be even more predictive of time estimation within interfering situations, since cognitive influences have been more present in these conditions. More work needs nonetheless to be done to validate this hypothesis.

In sum, the Cognitive Plastic Clock model, grounded in cognition, succeeded to explain a significant amount of variances (up to 67%) when confronted with 308 temporal reproduction data collected in children (from 5 to 8) and adults (from 18 to 42 years). This result implies that a lack of cognitive capacities directly interferes the operation of the internal clock which fails, or at least, to a lesser extent, to predict the state of the oscillators. In other words, it suggests that the cognitive influence takes place “on-line”, during the integration of pulses. Thus and for the first time, our internal clock model can take into account the context and the possible additional temporal or non-temporal treatments as it is directly based on cognitive capacities.

Discussion générale

L'objectif de ce travail de thèse était d'étudier les aptitudes d'estimation temporelles chez l'enfant dans différents contextes attentionnels, en vue notamment de modéliser, prédire et surtout expliquer les moindres performances temporelles des jeunes enfants. A cette fin, 9 études ont été réalisées, réparties dans 3 grands axes de recherche. L'objectif de l'axe 1 était d'étudier les distorsions temporelles générées par le type de tâche temporelle, et de les mettre en lien avec les capacités cognitives, notamment attentionnelles des enfants. En effet, selon mon point de vue, l'âge en tant que tel n'est pas le facteur expliquant les différences dans les conduites d'estimation temporelle du temps observable au cours du développement. Les différences d'âges reflètent notamment des différences dans les capacités attentionnelles liées à la maturation cérébrale (Casey, Giedd & Thomas, 2000). Cet axe de recherche avait donc pour objet de déceler plus clairement les mécanismes en jeu dans les différences interindividuelles du jugement du temps. L'objectif de l'axe 2 était quant à lui d'analyser les effets d'interférences liés au contexte sur les performances temporelles des enfants d'âge différents et des adultes. Enfin, le troisième axe résidait dans une tentative de modélisation de nos données avec un modèle réseau de neurones, que j'ai pour l'instant appelé « Cognitive Plastic Clock Model » (CPC model), en Français, le modèle d'horloge plastique et cognitif.

I - Temps et neuropsychologie développementale

Une première étude préliminaire nous a avant tout permis de fixer les âges à partir desquels nous n'observons plus de différence dans les performances de jugement des durées. Au moyen de modélisation, cette étude nous a permis de déceler les âges « clefs » dans le développement de jugement du temps. La sensibilité au temps, dans la bissection temporelle, cesse de s'améliorer à 6 ans pour les durées courtes et à environ 8 ans pour les durées longues. Aussi, à partir de cette étude, j'ai sélectionné pour mon travail de thèse une tranche d'âge comprise entre 5 et 8 ans. Néanmoins, notre première étude révèle que la fixation du point d'égalité subjective, sous-jacent à la reproduction du temps et non à la variabilité du jugement temporelle, est établie de façon plus précoce. Elle est possible dès l'âge de 4 ans, du moins pour les durées courtes. Ce résultat rend compte des capacités précoces de discrimination du temps dont nous avons parlé à maintes reprises. Il révèle également que la tâche de bissection est très simple à réaliser chez les jeunes enfants. D'ailleurs, comme nous l'avons vu en introduction, avec quelques aménagements, Provasi, Rattat & Droit-Volet (2011) sont parvenus à utiliser cette méthode auprès de bébés de quelques mois. Aussi, m'intéressant au développement des

capacités de jugement du temps entre 4 et 8 ans, j'ai décidé de centrer mon travail sur des tâches de reproduction temporelle. Plus complexes, pour la réalisation de la tâche de reproduction, les sujets puisent davantage dans leurs ressources attentionnelles. Ceci est donc susceptible d'accentuer les effets développementaux attentionnels sur le jugement du temps. Toutefois, cela a posé d'autres problèmes. En l'occurrence, dans nos études, les jeunes enfants ont eu tendance à toujours produire des durées longues pour les durées cibles utilisées de 3 et 4 secondes. Ils ont donc surestimé les durées courtes. De la même façon, ils ont toujours eu tendance à reproduire des durées trop courtes pour les durées longues de 6 à 8 secondes. Ils ont donc toujours sous-estimé les durées longues. Cette surestimation des durées courtes et sous-estimation des durées longues est classique (effet Vierordt). Cependant, elles ont été très marquées chez le jeune enfant. Or, de tels biais temporels peuvent être liés à des problèmes moteurs ou d'inhibition motrice que nous n'avons pas pris en compte. À l'avenir, il serait intéressant de vérifier certains de nos résultats avec d'autres tâches que celle de la reproduction temporelle. Néanmoins, nous n'avons pas utilisé que la tâche de reproduction temporelle, la tâche de bissection ayant également été employée dans les études 5 et 6 sur les effets engendrés par les distracteurs temporels ainsi que sur la modalité sensorielle. Malgré cela, la tâche de reproduction nous a permis de récolter des résultats concluants.

I – 1. Le rôle prépondérant de l'attention

L'objectif des études 2, 3, 4 et 5 était d'étudier les effets d'interférence causés par le traitement d'une seconde tâche non-temporelle ou temporelle sur le jugement du temps. La situation de double-tâche non-temporelle et temporelle a déjà été analysée chez l'adulte. Chez l'adulte, la double-tâche cause une sous-estimation temporelle comparée à une simple tâche temporelle (pour une méta-analyse voir Block, Hancock & Zakay, 2010). Les résultats de l'étude 2 et 3 ont donc répliqué chez l'enfant les résultats des études chez l'adulte sur la double-tâche, mettant en évidence une contraction du temps quand l'attention est détournée du traitement de la durée. Cependant, les résultats de nos études ont montré que cette sous-estimation du temps s'est avérée plus importante chez les jeunes enfants. L'utilisation de tests neuropsychologiques nous a permis de montrer que ces effets d'âge sont en fait liés aux capacités attentionnelles moindres des jeunes enfants, notamment d'attention sélective et, dans une moindre mesure, d'attention divisée. Ces premiers résultats nous permettent d'envisager dans le système de traitement de l'information temporelle la localisation du processus à l'origine de cette sous-estimation. En effet, l'absence de corrélation avec la mémoire suggère

que la perte d'unités temporelles n'aurait pas lieu lors du maintien en mémoire des informations temporelles (des impulsions). La perte d'impulsion aurait donc lieu « on line », au niveau de l'incrémentation des impulsions dans l'accumulateur, comme proposé dans les théories d'horloges internes, et non au niveau de la mémoire, comme certains le suggèrent (pour une discussion, voir Ivry & Schlerf, 2008 ; Taatgen, Van Rijn & Anderson, 2007).

Ces premiers résultats semblent ainsi valider les modèles attentionnels (Thomas & Weaver, 1975 ; Zakay, 1989), selon lesquels la concurrence pour un système commun des ressources produit un effet de raccourcissement du temps subjectif qui augmente avec la difficulté de la tâche concurrente (Hancock, 1996 ; Hanley & Morris, 1982). En effet, comme le suggèrent les travaux en psychologie cognitive, plus les interférences sont élevées, plus les ressources sont partagées entre les tâches (Navon et Gopher, 1979 ; Nijboer, Borst, van Rijn et Taatgen, 2013 ; Wickens, 2002). Cela revient à concevoir l'attention comme une sorte de filtre, fonctionnant suivant le modèle de Broadbent (1974, 2000). Dans le modèle de mémoire de travail de Baddeley et Hitch (1974) exposé en introduction, il n'est pas envisagé de filtre, mais de façon assez proche, toutes les informations transitent via un mécanisme d'administrateur central doté d'une capacité limitée, qui contrôle et alloue des ressources attentionnelles pour la bonne réalisation des tâches effectuées en parallèle. Cette idée de filtre et système à capacité limitée est donc validée par les résultats de nos études, dans la mesure où la double-tâche génère systématiquement une interférence bidirectionnelle. Dans nos études, le traitement de la tâche temporelle interfère sur les performances de la tâche non-temporelle et le traitement de la tâche non-temporelle sur celui de la tâche temporelle. Ainsi, il serait envisageable qu'un même système (administrateur) alloue les ressources pour le traitement de plusieurs types d'informations. Les modèles actuels d'horloge interne dédiés au traitement du temps (Gibon et al. 1984) n'incluent pas un tel mécanisme de traitement alloué à un traitement autre que temporel. Il s'agit de modèle uniquement temporel, comme si la durée était « désincarnée » de sa substance : l'information non-temporelle. Or, une durée est toujours associée à un stimulus avec des propriétés spécifiques (visuelles, auditives...). Le temps n'existe pas seul. Même lors d'un intervalle de temps vide, on voit quelque chose, on pense à quelque chose, on ressent quelque chose. L'information non temporelle est omniprésente.

Les études 3 et 4 montrent toutefois que les processus d'interférences diffèrent selon la nature de l'interférence utilisée, révélant une multiplicité de trajectoires développementales des conduites temporelles selon les méthodologies employées. Dans l'étude 3, nous avons cherché à comparer les effets sur la performance temporelle causés par une tâche concurrente

non-temporelle à ceux causés par une tâche concurrente temporelle. Les résultats de cette étude montrent un résultat contre-intuitif où l'effet obtenu en double-tâche est dépendant de la tâche concurrente. En l'occurrence, ce résultat peut suggérer que le temps est peu coûteux à traiter, même si cela ne correspond pas aux études réalisées par Rattat (Rattat, 2010 ; Droit-Volet & Rattat, 2010). En effet, si le traitement temporel est peu coûteux, il reste davantage de ressources disponibles pour que le mécanisme attentionnel (conçu comme un interrupteur, un portail, ou les deux) soit en mode « on », laissant ainsi passer davantage d'impulsions. Ceci résulterait donc en des estimations moins sous-estimées lorsque deux tâches temporelles sont réalisées simultanément que lorsqu'une seule tâche temporelle est réalisée avec une tâche non-temporelle, plus coûteuse en attention.

Néanmoins, il est difficile de valider cette hypothèse au regard des difficultés que les sujets rencontrent pour réaliser la double tâche concurrente temporelle. En effet, les erreurs commises sur la tâche de discrimination dans l'étude 3 sont plus importantes en condition temporelle que non-temporelle. Or, c'est la double-tâche temporelle (tâche de reproduction + tâche de discrimination temporelle) qui, bien que plus complexe, génère une interférence moins marquée sur la reproduction temporelle. De plus, l'utilisation des tests neuropsychologiques dans cette étude nous a permis de vérifier le rôle de l'attention dans le cas d'une double-tâche non-temporelle, alors que dans la double-tâche temporelle, la distorsion temporelle (sous-estimation) ne corrèle avec aucune dimension cognitive, ni attentionnelle, ni mnésique.

Si l'on suit les modèles d'horloge interne et que l'on suppose la coexistence de deux mécanismes attentionnels, à savoir l'interrupteur et le portail attentionnel, alors ces résultats peuvent-être clairement expliqués, même si le traitement temporel est coûteux. Il serait ainsi possible que le fonctionnement de l'interrupteur attentionnel soit fonction de la nature de la tâche et que celui-ci se ferme dès lors que la tâche est temporelle, et qu'il s'ouvre lorsque la tâche n'est pas temporelle. Ainsi, basculer d'une tâche à l'autre supposerait qu'il y ait des altérations dans l'état de l'interrupteur lorsque de l'information non-temporelle doit-être traitée simultanément à la tâche temporelle, alors que le traitement de deux tâches temporelles ne changerait pas l'état de l'interrupteur. De ce fait, moins d'unités temporelles pourraient transiter dans l'accumulateur lors de la présence d'une information non-temporelle, alors que les impulsions ne s'arrêteraient pas de transiter jusqu'à l'accumulateur dans le cas d'une double-tâche temporelle. Le second mécanisme de portail attentionnel serait ensuite fonction de la quantité de ressources attentionnelles consacrées au stimulus temporel, et ceci tout au long du traitement. Ainsi, la double-tâche non-temporelle jouerait sur l'activation de deux mécanismes

(interrupteur et portail attentionnel), alors que la réalisation de deux-tâches temporelles ne jouerait que sur le degré d'ouverture du portail attentionnel. Cependant, ces mécanismes n'ont jamais été proposés dans cet ordre. Or, cette conjonction permettrait bien d'expliquer nos résultats tout en présentant l'idée d'horloge interne, telle qu'elle est décrite dans les modèles d'horloge interne fonctionnels.

Cette hypothèse s'avère en adéquation avec les résultats préliminaires de l'étude 5, bien que cette étude requière plus de participants. En effet, la présentation d'un distracteur ne devant pas spécifiquement être traité génère une même sous-estimation, invariable, selon la durée du stimulus. De plus, cette sous-estimation tend à être expliquée par l'inhibition. Ainsi, les sujets ayant une moindre aptitude d'inhibition ont une moindre faculté de contrôle attentionnel. Ceci fait que l'attention peut plus facilement être divertie du passage du temps et traiter l'information non-temporelle non pertinente. En conséquence, le traitement de l'information non-temporelle ouvre de manière subreptice l'interrupteur, qui n'est plus en mesure d'incrémenter les unités temporelles. Ceci expliquerait entre autres pourquoi l'effet est similaire pour les durées courtes et longues.

Néanmoins, dès lors que l'on essaie de maximiser l'interférence temporelle en incitant le sujet à traiter de multiples informations temporelles de même nature (étude 4), il semble que nous ne fassions plus face aux mêmes mécanismes, du moins au même fonctionnement de l'interrupteur (voir Figure 47). Cette étude sur le multi-timing reporte trois résultats fondamentaux qui révèlent l'existence d'un système d'horloge avec un pacemaker mais de multiples accumulateurs. Premier résultat, il y a une augmentation de l'erreur du jugement temporel en fonction du nombre de stimuli temporels à traiter simultanément. Néanmoins, cette erreur ne va pas dans le sens d'une sous-estimation comme préalablement décrit, mais dans le sens d'une surestimation du temps, du moins d'un allongement temporel. De plus, cette surestimation avec le traitement simultané des durées est fonction de l'attention, alors que les autres dimensions cognitives (mémoire à court terme, mémoire de travail, indice de vitesse de traitement) n'ont aucune influence. Deuxième résultat, le temps est jugé plus court quand la durée cible est présentée en premier. Néanmoins, ce résultat ne survient pas chez l'enfant, alors même que le sujet n'a pas connaissance qu'il va devoir traiter une seconde durée. Enfin, le troisième résultat phare de cette expérience est que l'augmentation du chevauchement des durées réduit la durée estimée. A partir du modèle proposé par van Rijn et Taagten (2008), nous avons créé un modèle expliquant ces résultats. Celui-ci est présenté Figure 47D. Ce modèle reprend l'idée de l'interrupteur appelé « mécanisme attentionnel ». Mais à ce mécanisme, on a

ajouté un mécanisme d'accélérateur temporel (time accelerator). Ces deux mécanismes (attentionnel et time accelerator) engendrent tous les deux des estimations temporelles plus longues. L'accélérateur temporel accélère le rythme du pacemaker face à de multiples durées à traiter. Autrement dit, il augmente son efficacité temporelle, sachant que traiter plusieurs durées à la fois demande plus d'impulsions. Quant au mécanisme d'attention temporelle, il serait source d'erreurs de switching. Il ferait transiter des impulsions dans le mauvais accumulateur. Toutefois, lorsque les durées sont présentées simultanément, il est également normal que le partage des impulsions génère un raccourcissement des estimations de temps, qui augmente avec le chevauchement des durées simultanées. La surestimation temporelle causée soit par l'accélération (pour l'accumulateur couplé à la seconde durée), soit par la fuite de ces impulsions (pour l'accumulateur couplé à la première durée) est en effet réduite lorsque les deux durées doivent être traitées simultanément puisque les deux accumulateurs ont tous deux besoin d'impulsions. Ce modèle, ajoutant un « time accelerator » et plusieurs accumulateurs au système de switch attentionnel, permet d'expliquer la variation de la performance temporelle en fonction du contexte temporel ou non-temporel, avec un seul système d'horloge interne (pacemaker) qui sert différents accumulateurs par un mécanisme attentionnel unique. Ceci est donc cohérent avec le modèle de van Rijn et taagten (2008), même si nous l'avons modifié partiellement.

En somme, toutes les études de cet axe pointent un effet de l'attention sur l'augmentation des effets d'interférence temporelle. Ainsi, les plus jeunes enfants avec moins de ressources attentionnelles génèrent davantage de distorsions temporelles (contraction ou dilatation selon les contextes). Ces résultats sont cohérents avec les théories du développement de l'attention selon lesquelles la quantité totale de ressources mentales disponibles pour traiter une tâche donnée augmente avec l'âge de l'enfant (Gathercole, 1998, 2002 ; Towse, Hitch & Horton, 2007). Cela est notamment attribuable à la maturation cérébrale du cortex préfrontal, ainsi qu'à l'amélioration des connaissances déclaratives et procédurales (Case, 1987 ; Cowan, 1997) et de ses liens avec les autres structures cérébrales impliquées dans le traitement du temps (SMA, cortex pariétal, striatum). Au niveau de l'horloge interne, une moindre attention suppose une stabilité plus importante des mécanismes. En effet, en situation de double-tâche non-temporelle, si l'on s'intéresse au portail attentionnel, celui-ci peut plus amplement s'ouvrir avec l'âge, et l'accroissement de l'attention disponible laissant d'avantage d'impulsions passer. Au niveau de l'interrupteur attentionnel, c'est aussi la stabilité des mécanismes qui pourrait expliquer un allongement du temps perçu en situation de « multi-timing ».

De récentes données en imagerie cérébrale ont montré que la performance sur une tâche de « flanker » s'améliore entre 4 et 8 ans lorsque la taille du cingulaire antérieur droit augmente (Fjell et al., 2012), une région du cerveau impliquée dans les fonctions exécutives (Posner, Rothbart, 1999 ; Sheese et Voelker, 2012 ; Rothbart et Posner, 2015 ; Rothbart, Sheese, Rueda et Posner, 2011). Ce changement de développement serait au cœur des améliorations du temps de réaction dans diverses tâches de conflit (Bush, Luu et Posner, 2000 ; Fjell et al., 2012), comme du traitement du temps (Coull, Cheng & Meck, 2011). La plus grande interférence chez l'enfant peut donc également être due à un coût plus important de la double-tâche, qui se traduit en un temps de réaction plus important aux changements lors du traitement des informations en double-tâche.

I – 2. Le rôle du temps de réaction

Si l'on suppose l'action d'un mécanisme d'interrupteur en situation de jugement temporel simple ou multiple pouvant potentiellement faire perdre davantage d'impulsions ou faire transiter des impulsions dans le mauvais accumulateur, alors il faut également prendre en compte son temps d'activation. Ce constat est en lien avec les études montrant que le temps de réaction et de fermeture du switch sont fortement liés (Droit-Volet, 2010). Ce temps de latence dans le changement de traitement en situation de double-tâche pourrait également être mis en lien avec l'augmentation de l'automatisation des processus mentaux avec le développement (Leone & Baillargeon 1994). Lorsque le processus est automatique, non seulement il permet d'économiser davantage de ressources attentionnelles, mais il permet également de reprendre un traitement plus rapide de la tâche. Quoi qu'il advienne, il semble donc que tout joue contre la possibilité des jeunes enfants à estimer avec justesse le temps, du moins dans les conditions explicites de traitement du temps (Droit-Volet & Coull, 2018). Le système d'horloge interne (pacemaker – accumulateur) est effectivement doublement entravé par la moindre capacité d'attention des jeunes enfants et leurs temps de réactions plus lents. Ceci conduit à ce que les jeunes enfants entrent plus difficilement et plus lentement dans un état de traitement « on » pour commencer l'estimation du temps, ou dans un état de traitement « off » dans la situation de « multi-timing ». De plus, dans les cas où les mécanismes parviennent à entrer dans un tel état, ceux-ci sont plus facilement sujets à repasser dans un état « off » à cause du manque d'inhibition des jeunes enfants, c'est-à-dire du moindre contrôle qu'ils exercent sur leur attention. Avec ce rôle majeur des mécanismes liés à l'attention, on peut aisément comprendre pourquoi les enfants, notamment ceux atteints de TDAH éprouvent autant de difficultés à juger

le temps en toutes circonstances (Hart, Radua, Mataix-Cols & Rubia, 2012). Néanmoins, plusieurs questions restent en suspens, liées à certaines limites de nos recherches.

I – 3. Limitations et futures recherches

Paradoxalement, ce qui fait l'originalité de nos études en fait également le point faible. L'utilisation de tests neuropsychologiques nous permet effectivement de pointer du doigt l'importance de certaines dimensions neuropsychologiques au détriment d'autres lors de l'estimation du temps dans des contextes qui varient. Néanmoins, les tests ne traduisent pas uniquement des habiletés des dimensions qu'ils sont censés mesurer ou, tout du moins, peuvent entraîner avec eux d'autres sous-composantes cognitives. Prenons comme exemple le test « écouter deux choses à la fois » du TEACH mesurant l'attention divisée. Ce test dure environ 10 minutes chez l'enfant. N'y a-t-il pas un effet d'attention soutenue pouvant venir interférer avec cette dimension ? De plus, dans ce test, la mémoire de travail avec ses différentes composantes n'est-elle pas impliquée ? Prenons un autre exemple avec le test de Corsi qui mesure la mémoire. La dimension attentionnelle peut-elle être totalement exclue ? En somme, ces tests, bien que fiables et valides auprès d'un grand échantillon d'enfants, peuvent constituer une limitation de nos études. A l'avenir, il serait remarquable, même si cela s'avérerait ardu, de créer des tests plus « purs » permettant de ne mesurer qu'une seule dimension, en excluant les autres. Néanmoins, l'enchevêtrement des dimensions neuropsychologiques entre elles rend aussi compte de la complexité des processus cognitifs. D'ailleurs, de plus en plus de chercheurs remettent en cause les approches très localisées et très spécifiques des fonctions cognitives. On parle de plus en plus de réseaux de traitement distribués dans tout l'encéphale, d'enchevêtrement des fonctions. Mais à tout enchevêtrer, nous ne verrons plus rien. C'est le « juste scientifique », du simple au complexe, du complexe au simple, voire de l'entre deux.

Dans le même ordre d'idée, il est difficile de connaître l'influence exacte que peut engendrer un contexte particulier sur une capacité cognitive donnée. Par exemple, un changement de situation peut chez un sujet engendrer beaucoup plus d'activités cognitives (regarder, essayer de comprendre, de ressentir, de mettre en lien les événements) que chez un autre sujet. En d'autres termes, un changement contextuel peut entraîner des conséquences différentes pour une même base cognitive. C'est la raison pour laquelle nous avons commencé à analyser les effets de différents contextes, dont les contextes sociaux, sur l'estimation du temps.

II – Temps et contexte

II – 1. Contexte et mémoire

Dans les études 6, 7 et 8 de cette thèse, qui constituent mon deuxième axe de recherche, nous nous sommes intéressés aux effets que pouvaient engendrer différents contextes sur l'estimation du temps chez des enfants âgés de 5 à 8 ans et des adultes.

La première contribution de cet axe (étude 5) concerne les différences dans le jugement du temps causées par la modalité sensorielle de présentation de la durée. De nombreuses études ont déjà montré que le temps nous paraît plus long lorsque nous l'estimons via le canal auditif que via le canal visuel. Des modèles suggèrent que cet effet de modalité proviendrait d'un mélange en mémoire des informations temporelles. D'autres chercheurs comme John Wearden ont au contraire défendu l'idée selon laquelle cet effet de modalité sensorielle proviendrait de rythmes différents de l'horloge interne (pacemaker) causés par la modalité sensorielle. Le rythme du pacemaker serait notamment plus rapide pour l'information sensorielle auditive que pour l'information visuelle. Nous ne reviendrons pas sur les résultats de cette étude, montrant de nouveau le rôle prépondérant du développement des capacités cognitives dans le développement du jugement temporel. Cependant, dans cette étude qui demande le traitement d'une durée à la fois, on peut constater que ce sont les aptitudes mnésiques limitées chez l'enfant, et non attentionnelles, qui, cette fois, prédisent le mieux les moins bonnes estimations du temps. De plus, dans les tâches simples de jugement d'une durée, l'amélioration de la sensibilité au temps avec l'âge est liée à l'amélioration avec l'âge de la mémoire de travail et la vitesse de traitement et non des capacités attentionnelles. L'attention serait donc en cause dans les tâches de jugement plus complexes, quand il s'agit de traiter plusieurs informations à la fois, temporelle ou non-temporelle. Mais, le développement consiste aussi au développement des capacités à traiter des situations de plus en plus variées et complexes.

Nos résultats montrent que la distorsion modale du temps est plus élevée chez les jeunes enfants et que les facteurs explicatifs résident dans les capacités de mémoire de travail, plus que dans celles d'attention, même si le fonctionnement de la mémoire de travail implique des ressources attentionnelles. Cela suggère donc que l'ampleur de l'effet modal sur le jugement du temps s'explique par des compétences exécutives impliquant des processus de stockage en mémoire, mais également par d'autres processus tels que la mise à jour des informations en mémoire et le maintien de l'attention sur le traitement du flux continu d'informations

temporelles. Le rôle de l'horloge interne n'est pas envisageable, même si l'attention peut affecter le rythme de l'horloge interne par un processus s'apparentant au « time accelerator » dont nous venons de parler. En somme, les processus s'entremêlent d'où la nécessité d'aboutir à un nouveau modèle d'horloge plausible sur le plan neurologique, qui allie horloge interne et cognition, ce que nous nous sommes attelés à faire dans la dernière étude sur le modèle en réseau de neurones.

Quoi qu'il en soit, il est possible de rapprocher ces résultats à l'hypothèse bayésienne que nous avons défendue dans notre article en collaboration avec l'équipe d'Hedderik van Rijn. Selon cette hypothèse, l'estimation subjective des plus jeunes enfants est davantage influencée par les expériences antérieures, ici la modalité sensorielle vue à l'essai précédent, que par ce qu'ils perçoivent au moment t , en raison peut-être de leur conscience de leur perception bruitée du signal temporel. Ce n'est bien entendu pas le cas pour l'expérience implicite du temps basée sur de multiples présentations d'une même durée (plusieurs essais ou séances). Ainsi, les plus jeunes se reposeraient davantage sur les informations dont ils viennent de faire l'expérience, encore présentes en mémoire. Néanmoins, ces informations sont aussi plus erronées chez les plus jeunes, liées à leurs capacités de stockage limitées en mémoire à court-terme. Aussi, chez les jeunes enfants, le signal flou serait directement comparé à une trace en mémoire erronée. Ceci aurait alors pour effet de maximiser les différences entre les modalités sensorielles.

Dans l'objectif d'analyser plus en profondeur l'impact mnésique chez les enfants, notamment du rôle de l'expérience préalable, nous avons également analysé dans la 7^{ème} étude l'effet sur l'estimation du temps que pouvaient engendrer différents contextes temporels, notamment différentes distributions des durées au cours d'une séance sur l'estimation du temps. Selon une méthodologie proche de l'expérience de Jazayeri et Shadlen (2010), deux distributions d'intervalle, l'une longue et l'autre courte ont dispensé dans deux séances différentes. Bien entendu, une même durée d'intervalle a été présentée dans chaque condition contextuelle, afin d'examiner si la reproduction temporelle de cette durée cible est affectée par le contexte temporel. Cependant, malgré les reproductions plus bruitées et les pentes plus plates chez les plus jeunes enfants, nous n'avons trouvé aucune différence statistique entre les groupes d'âge dans ces différents contextes. Ceci suggérerait que les différentes distributions influencent de façon similaire le jugement du temps chez les enfants et les adultes. Néanmoins, nos résultats sur le contexte essai par essai ont révélé que ce n'est pas la distribution globale qui importe, mais l(es) essai(s) présenté(s) antérieurement. En effet, la durée présentée dans les essais les plus récents a un impact plus important sur la reproduction d'une durée donnée chez

les enfants que chez les adultes. Le jugement temporel des enfants de 5 ans est ainsi influencé par deux durées présentées antérieurement (N-1 et N-2) et non par le contexte global. Ainsi, en raison d'un percept extrêmement bruité, l'estimation subjective des plus jeunes enfants est basée sur les expériences antérieures. Ceci corrobore les résultats obtenus par Karaminis et al. (2016) montrant les aptitudes précoces des enfants à intégrer continuellement des essais antécédents dans leur production actuelle.

De plus, si l'on s'intéresse aux effets subjectifs, c'est-à-dire liés aux propres reproductions temporelles des participants, et non aux durées objectives, alors on remarque un impact continu, allant jusqu'à N-7. Cependant, pour l'essai précédent (N-1), on constate que l'effet de la durée subjective est différent de l'erreur relative selon les groupes d'âge. Conformément à l'effet obtenu sur les durées objectives, les enfants de 5 et 7 ans se sont davantage appuyés sur les durées subjectives antérieures que les adultes. En revanche, l'influence des erreurs relatives antérieures est plus forte chez les adultes que chez les enfants. Ceci suggère que les adultes sont davantage conscients d'être plus sujets à des « dérives de performance ». Ces résultats inédits suggèrent que, comparés aux adultes, les enfants s'appuient davantage sur le contexte temporel que sur l'évaluation de leur erreur de jugement. Ceci peut se comprendre par le lent développement des fonctions exécutives et des capacités méta-cognitives (Nelson, 1986), des connaissances sur leur mode de fonctionnement.

Enfin, la dernière étude de l'axe 2 (étude 8) avait pour but d'analyser l'impact que les caractéristiques des autres (posture corporelle, mouvement avec objet, âge et émotion) peuvent avoir sur le jugement des durées chez l'enfant âgé entre 4 et 7 ans. Les résultats de cette étude ont démontré que, dès l'âge de 4 ans, les enfants parviennent à incorporer dans leurs jugements temporels le temps de l'autre, notamment les caractéristiques de ce dernier, s'il est plus rapide, plus lent, élicité par sa posture ou sa charge par exemple. Cette distorsion du temps dans le contexte social a été observée, même quand les enfants n'avaient pas de théorie de l'esprit explicite. L'acquisition de la théorie de l'esprit explicite a été testée par l'épreuve de Sally et Anne. Cela révèle que le jugement du temps est extrêmement sensible aux variations de contextes, quels qu'ils soient.

Néanmoins, les enfants ayant une théorie explicite de l'esprit produisaient davantage de distorsions temporelles selon les caractéristiques d'autrui. Ces distorsions temporelles ne peuvent être imputées ni au développement du contrôle moteur, étant donné que les enfants avec ou sans théorie de l'esprit avaient les mêmes performances temporelles dans la condition de contrôle, ni à un développement cognitif étant donné l'absence d'effet d'âge. Toutefois, il

aurait été intéressant de vérifier ceci en évaluant les fonctionnements cognitifs des enfants au moyen de tests neuropsychologiques comme dans nos autres études. Il est toutefois probable qu'une meilleure conscience de l'état mental des autres personnes chez les enfants ayant acquis une ToM génère de plus amples distorsions temporelles. On peut en effet penser qu'avec une meilleure conscience des états mentaux d'autrui, les enfants accordent une plus grande attention à leurs états, ce qui augmente leur influence sur le jugement temporel (distorsion temporelle). Cette piste devrait davantage être poursuivie en manipulant notamment la charge attentionnelle de la situation de jugement des durées. Ceci est donc un nouveau champ de recherche à explorer, le temps social et son développement.

Finalement, si on relie les études de cet axe et celles de l'axe précédent, on s'aperçoit finalement que l'estimation du temps dépend à la fois de processus attentionnels et mnésiques, les deux étant intrinsèquement liés. En effet, dès lors que l'attention est moindre dans un même contexte temporel donné, les jugements de temps chez les jeunes enfants sont davantage basés sur leurs expériences temporelles précédentes, celles stockées en mémoire. Néanmoins, leur mémoire peut aussi faire défaut. L'apprentissage du temps est aussi un facteur déterminant à prendre en compte. C'est pourquoi, dans notre modèle développemental d'horloge interne, basé sur des réseaux de neurones, nous avons intégré de la plasticité. Notre modèle, tout comme les jeunes enfants, peut faire preuve de plus grande plasticité neurale et ainsi apprendre plus vite, mais aussi oublier plus rapidement. Ainsi l'apprentissage du temps nécessite un délai plus important chez le jeune enfant en raison de problème d'attention, du moins tout dépend des situations rencontrées.

II – 2. Limitations et futures recherches

En lien avec la mise en garde de Droit-Volet (2010), le temps de réaction des jeunes enfants en reproduction temporelle et l'impact moteur décelé dans l'étude 7 présentent une limitation à l'utilisation de tâches de reproductions temporelles et à l'application d'une modélisation Bayésienne de nos données. A notre sens, il serait intéressant à l'avenir d'analyser l'impact moteur dans les reproductions temporelles des enfants. Dans ses études sur les productions de rythmes, Florie Monier montre que les différences avec l'âge résultent davantage des capacités de coordination motrice que des facteurs cognitifs (2018). Toutefois dans ses études il s'agit de durées courtes n'excédant pas les centaines de millisecondes. Comme susmentionné, il faudrait donc tester nos résultats avec d'autres tâches que celles de reproduction des durées et d'autres gammes de durées, notamment des durées très courtes

inférieures à 2-3 secondes. En effet, c'est uniquement avec ces variations méthodologiques que l'on pourra généraliser nos hypothèses à l'ensemble du traitement du temps ou les réserver au traitement des durées de plusieurs secondes et voire au cas spécifique de la reproduction temporelle. Mais la fin d'une thèse n'est que le début de la recherche comme le dirait ma directrice de thèse.

Une autre limitation à propos de l'étude 7 concerne le test que nous avons utilisé pour évaluer la théorie de l'esprit, le test de « Sally et Anne », c'est-à-dire une représentation explicite de l'autre. Or, une représentation mentale d'ordre 1, implicite, suffit pour que nos estimations temporelles soient influencées par les caractéristiques d'autrui comme le suggèrent nos résultats chez les jeunes enfants qui ne parviennent pas à trouver la bonne réponse au test d'Anne et Sally. A l'avenir, il serait intéressant de déceler l'âge auquel intervient cette interférence, si celle-ci est acquise ou si elle résulte d'un apprentissage plus précoce. Pour tester cette hypothèse, il faudrait travailler auprès de nourrissons. Mais les méthodes sont alors totalement différentes. De plus, il est difficile de recruter des nourrissons comme sujets d'expérience. C'est donc un autre champ d'étude difficile à mettre en œuvre.

III - Modélisation de l'horloge

III – 1. Influences de la Cognitive Plastic Clock model (CPC model)

Les résultats que nous avons obtenus jusqu'ici semblent confirmer l'impact des processus cognitifs « on line » du temps, c'est-à-dire au moment même de l'intégration des impulsions. Comme nous l'avons vu, cet impact peut provenir de l'attention, la mémoire, de l'expérience et de l'apprentissage du temps. Or, il devient évident que les modèles actuels d'horloge interne tels qu'ils sont conçus aujourd'hui ne prennent pas en compte ces dimensions cognitives. Mais, ce n'est pas leur seul défaut. Ils ne prennent pas en compte la plasticité inhérente au système d'apprentissage. Ils ne parviennent également pas à produire dans leur fonctionnement la propriété du temps scalaire. Comme nous l'avons expliqué dans notre dernière étude qui fait l'objet d'un article en préparation, la variabilité scalaire dans ces modèles est arbitrairement introduite en amont du fonctionnement temporel. De plus, le modèle de Mattel et Meck (2004), pourtant très célèbre, ne parvient pas à dire si une durée est supérieure ou inférieure à une autre. Il ne peut que conclure qu'elles sont différentes, mais pas le sens de cette différence. Enfin, ces modèles sont peu plausibles sur le plan biologique, du moins pour le modèle de Treisman, Gibbon et Block, mais pas pour les modèles plus récents de Church et

Broadbent (1990) et de Mattel et Meck (2004). Aussi, je me suis attelé pendant les années de thèse à apprendre le langage informatique, à apprendre la modélisation afin d'être en mesure de proposer à la fin de cette thèse un modèle original d'horloge interne fonctionnel. Nous avons donné le nom de Cognitive Plastic Clock à ce modèle (CPC model). Son nom peut encore évoluer. Je ne reviendrai pas sur ce modèle, sa présentation demande encore du travail pour qu'il soit compréhensible et explicable par tous. Je noterai seulement que ce modèle fonctionne. Heureusement, sinon à quoi cela aurait-il servi que je le présente me diriez-vous ? Plus sérieusement, ce modèle est plausible sur le plan neuro-biologique. En effet, il s'agit d'un modèle en réseau de neurones intégrant le temps au moyen de 12 oscillateurs. De plus, le rythme choisi pour les oscillateurs correspond aux patterns d'oscillation gamma de l'encéphale, qui sont omniprésentes dans l'activité cérébrale (Gregoriou, Gotts, Zhou & Desimone, 2009 ; Melloni, Molina, Pena, Torres, Singer & Rodriguez, 2007 ; Siegel, Donner, Oostenveld, Fries & Engel). De plus, ces ondes reflètent l'activation cérébrale au niveau d'éveil (Williams, Cheng & Meck, 2008).

Le principal avantage du modèle est qu'il permet de conserver une certaine ampleur de durées (e.g., ordinalité), contrairement au modèle de Mattel et Meck (2004) et à celui de Church et Broadbent (1990). En effet, en apprenant l'état des oscillateurs dans le temps lors du premier processus, le modèle peut trouver l'ampleur du temps à partir du pattern d'oscillations. En d'autres termes, il sait que t_2 est plus long que t_1 , car le motif d'oscillation de t_1 correspond à une durée antérieure. C'est cette connaissance des grandeurs temporelles qui a permis de reproduire la propriété scalaire du temps sur la moyenne. En effet, cette propriété implique une augmentation de la production moyenne associée à une augmentation du temps. Les estimations étant directement liées à chaque instant t , cela implique que les productions émanent du temps physique et augmentent de ce fait avec lui. C'est cette même connaissance de la durée du modèle qui a permis d'introduire un coefficient de dispersion temporelle, calculé directement à partir de la distance euclidienne cumulée entre l'état actuel des oscillateurs et leur prédiction. Le coefficient ajouté estime la dispersion moyenne qui résulte en fait de la dérive des performances générées par la plus grande variabilité. Ce coefficient témoigne donc de la variance graduelle du modèle, ce qui entraîne une sous-estimation ou une surestimation linéaire dépendant du temps. Il est important de souligner que ces caractéristiques n'ont pas été directement injectées dans le modèle, comme cela pouvait être le cas dans les modèles préexistants, mais résultent de son mécanisme d'action.

L'originalité de notre modèle réside aussi dans le fait que nous avons ajouté des facteurs physiologiques (plasticité) et cognitifs (mémoire, attention et apprentissage du temps) que nous avons décelés comme étant les sources des distorsions temporelles. En modifiant l'indice de décalage de Fahlman, nous avons modulé la plasticité de l'horloge. Un paramètre de plasticité élevé permet au modèle d'apprendre plus rapidement, mais peut plus fréquemment provoquer des oublis, ce qui entraîne des erreurs de prédiction critiques. En modulant la quantité d'informations détenues par le modèle en entrée, nous avons également joué sur l'attention. En effet, moins d'attention génère une diminution des informations qui peuvent être collectées dans l'environnement car les informations ne peuvent pas dépasser le seuil conscient. En modifiant le nombre de neurones de la couche cachée, nous avons aussi modifié la capacité de rétention en mémoire. Enfin, en modifiant le nombre d'époques, c'est-à-dire en modulant le nombre de rétro-propagation du gradient, le programme détient moins d'essais pour parvenir à réduire son gradient d'erreur. Ceci permet ainsi de moduler l'expérience temporelle. En effet, si le modèle a plus de temps pour converger vers les modalités idéales, il en connaît davantage les propriétés et a une meilleure expérience temporelle. Enfin, pour tester la véracité de ce modèle, nous avons intégré les scores obtenus aux tests neuropsychologiques des études réalisées dans cette thèse afin de déterminer l'état des facteurs de l'horloge. Le fait que le système parvienne à expliquer jusqu'à 67% du biais d'estimation causé sur un échantillon aussi hétérogène (des enfants et des adultes âgés de 5 à 42 ans) confirme le caractère cognitif des variables d'horloge interne et ratifie l'influence « on line » de ces dimensions.

Enfin, lors de l'analyse du poids de chacune des dimensions neuropsychologiques, nous avons décelé que l'indice de vitesse de traitement était l'un des facteurs les plus influents pour paramétrer les variables d'horloge interne. Cela est tout à fait en lien avec les travaux de Droit-Volet et Zélandi (2013) qui ont constaté que la vitesse de traitement était le meilleur prédicteur de l'estimation du temps dans une tâche de bissection temporelle simple. Il semble probable que l'accélération du traitement de l'information avec l'âge reflète indirectement l'augmentation de l'efficacité dynamique des circuits neuronaux responsables pour l'estimation du temps.

III – 2. Limitations et futures recherches.

La prochaine étape, qui fait aujourd'hui l'objet de mes travaux, est de finir la rédaction de ce modèle pour qu'il soit simple à comprendre et afin d'être en mesure de pouvoir le publier. La seconde étape sera de lancer ce même modèle à partir d'autres données générées par des participants en situation de double-tâche. Aussi, si cela fonctionne, alors nous pourrions conclure que le CPC model prédit les distorsions intra et inter-individuelles.

Convaincus de l'intérêt de ce modèle, nous espérons que celui-ci soit un précurseur dans les travaux sur l'estimation du temps. Néanmoins, il nous reste encore à expliquer 33% des variances de productions. A l'avenir, il serait intéressant de réussir à ajouter à l'horloge, telle qu'elle fonctionne dans le modèle, un mécanisme basé sur le temps de réaction comparable au switch. L'ajout d'un tel facteur pourrait potentiellement expliquer encore plus de variances. Après une étude plus poussée de l'influence du temps de réaction sur les estimations du temps, il serait intéressant de pouvoir ajouter une variable à l'horloge interne relative à ce facteur, qui semble être un dernier élément déterminant dans l'estimation du temps. Cet élément avec des temps de réaction variés refléterait le switch attentionnel en tout ou rien décrit régulièrement dans les modèles d'horloge interne, fluctuant entre les deux modes « on » et « off ». L'ajout d'un tel facteur pourrait potentiellement expliquer encore davantage de variances. Une autre possibilité serait d'insérer une seconde perturbation cognitive, après l'incrémentation des unités temporelles, pouvant correspondre au biais lors de la décision et de la récupération de l'information en mémoire. Cela étant, il ne faudrait pas trop complexifier le modèle. Le but est de maintenir constant un facteur, comme le facteur décisionnel, et de voir les variations du modèle quand ce facteur est constant. En effet, nous arrivons déjà à expliquer 67% de la variance et cela, sans prendre en compte les critères de décision ou le système de switch. Or 67% est déjà beaucoup pour un modèle.

Enfin, la dernière limite du modèle et non la moindre est qu'il permet aujourd'hui d'apprécier l'erreur temporelle de façon absolue mais pas relative. A l'avenir, il pourrait-être intéressant d'être apte à prédire le sens de ces bruits, c'est-à-dire s'ils vont dans le sens d'une surestimation ou d'une sous-estimation du temps. En somme, c'est le début d'un long travail de recherche.

Conclusion générale

En résumé, l'objectif de ce travail de thèse était d'étudier le développement des conduites temporelles et leurs changements en fonction des contextes et des différentes capacités cognitives des enfants, dans l'ambition d'essayer d'élaborer un modèle développemental original. A travers nos études, l'attention s'est révélée être un facteur déterminant dans la formation des distorsions temporelles. En effet, quelle que soit la procédure utilisée, un manque d'attention entraîne systématiquement un plus grand effet d'interférence de la tâche concurrente quelle que soit sa nature, et que cet effet aille dans le sens d'une sous-estimation (double-tâche non temporelle) ou dans celui d'une surestimation (dual-timing). Dans cette thèse, nous avons mis en avant l'impact de l'attention sur le jugement du temps chez l'enfant et ses répercussions à tous les niveaux du traitement du temps. En effet, une moindre attention rend le signal temporellement « flou », ce qui résulte en des estimations subjectives davantage erronées et orientées vers les expériences antérieures. Mais les expériences antérieures sont aussi moins bonnes pour des raisons de capacités mnésiques plus limitées et des capacités d'évaluation des erreurs de jugements moins bonnes, liées aux fonctions exécutives et métacognitives moins développées chez le jeune enfant. On pourrait en conclure que l'enfant est très mauvais dans ses jugements du temps, en d'autres termes, qu'il est inadapté à son environnement temporel. Mais je dois à la fin de ce travail de thèse, renvoyer ceux qui auront eu le courage (ou l'obligation) de lire ce document dans son intégralité à mon introduction. En effet, dans mon introduction, j'évoque tous les travaux chez le bébé et le jugement implicite du temps chez le jeune enfant. Ces études montrent clairement qu'à tous les âges les enfants sont capables d'estimations temporelles plutôt précises. Il semble donc qu'il existe autant de développements dans les conduites temporelles qu'il existe de conditions. Les enfants doivent avoir l'occasion de faire l'expérience du temps à plusieurs reprises dans les mêmes conditions pour apprendre la durée ou devrais-je dire la distribution des durées associées aux événements et aux actions. Un débat actuel questionne la possibilité d'apprendre une durée en un seul essai. Pour ma part, je dirai que cela n'est pas possible, pas chez l'enfant tout du moins, car le temps est dépendant de son contenu et du contenu mental de l'enfant. Le temps n'est d'après moi que la résultante de ressentis, du fonctionnement fluctuant de notre horloge, qui au fur et à mesure des expériences parvient à être décontextualisé.

Bibliographie

- Acerbi, L., Vijayakumar, S., & Wolpert, D. M. (2014). On the origins of suboptimality in human probabilistic inference. *PLoS Computational Biology*, *10*(6), e1003661. doi:10.1371/journal.pcbi.1003661
- Acerbi, L., Wolpert, D. M., & Vijayakumar, S. (2012). Internal representations of temporal statistics and feedback calibrate motor-sensory interval timing. *PLoS Computational Biology*, *8*(11), e1002771. doi:10.1371/journal.pcbi.1002771
- Adams, R. D. (1977). Intervening stimulus effects on category judgments of duration. *Perception & Psychophysics*, *21*(6), 527–534. doi:10.3758/BF03198733
- Adams, W. J., & Mamassian, P. (2004). Bayesian combination of ambiguous shape cues. *Journal of Vision*, *3*(9), 840–840. doi:10.1167/4.10.7
- Addyman, C., Rocha, S., & Mareschal, D. (2014). Mapping the origins of time: Scalar errors in infant time estimation. *Developmental psychology*, *50*(8), 2030–2035. doi:10.1037/a0037108
- Allan, L. G., & Gibbon, J. (1991). Human bisection at the geometric mean. *Learning and Motivation*, *22*(1–2), 39–58. doi:10.1016/0023-9690(91)90016-2
- Allan, L. G. (1998). The influence of the scalar timing model on human timing research. *Behavioural Processes*, *44*(2), 101–117. doi:10.1016/S0376-6357(98)00043-6
- Allan, L. G. (2002). Are the referents remembered in temporal bisection?. *Learning and Motivation*, *33*(1), 10–31. doi:10.1006/lmot.2001.1097
- Allman, M. J., DeLeon, I. G., & Wearden, J. H. (2011). Psychophysical assessment of timing in individuals with autism. *American Journal on Intellectual and Developmental Disabilities*, *116*(2), 165–178. doi:10.1352/1944-7558-116.2.165
- Allman, M. J., Penney, T. B., & Meck, W. H. (2016). Brief history of “The Psychology of Time Perception”. *Timing and Time Perception*, *4*(3), 299–314. doi:10.1163/22134468-00002071
- Anderson, J. R. (2007). *How can the human mind occur in the physical universe?*. Oxford: Oxford University Press.
- Apperly, I. A., & Butterfill, S. A. (2009). Do humans have two systems to track beliefs and belief-like states? *Psychological Review*, *116*(4), 953–970. doi:10.1037/a0016923
- Arlin, M. (1986). The effects of quantity, complexity, and attentional demand on children’s time perception. *Perception & Psychophysics*, *40*(3), 177–182. doi:10.3758/BF03203014
- Arlin, M. (1986b). The effect of quantity and depth of processing on children’s time perception. *Journal of Experimental Child Psychology*, *42*(1), 84–98. doi:10.1016/0022-0965(86)90017-2

- Asaoka, R., & Gyoba, J. (2015). Effects of sensory modality and retention delay on time reproduction performance. *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, 34(1), 53–59. doi:10.14947/psychono.34.7
- Atkinson, J. (2002). *The developing visual brain*. New York, NY: Oxford University Press.
- Aslin, R. N. (1981) Development of smooth pursuit in human infants. In D. F. Fisher, R. A. Monty, and J. W. Senders (Eds.), *Eye Movements: Cognition and Visual Perception* (pp. 31–51). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Ayhan, I., Bruno, A., Nishida, S. Y., & Johnston, A. (2009). The spatial tuning of adaptation-based time compression. *Journal of Vision*, 9(11), 2–2. doi:10.1167/9.11.2
- Ayhan, I., Revina, Y., Bruno, A., & Johnston, A. (2012). Duration judgments over multiple elements. *Frontiers in Psychology*, 3, 459. doi:3389/fpsyg.2012.00459
- Baddeley A. (1986). *Working Memory*. Oxford University Press, Oxford.
- Baddeley A. (1990). *Human memory : theory and practice*. Boston : Allyn and Bacon.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory?. *Trends in cognitive sciences*, 4(11), 417–423. doi:10.1016/S1364-6613(00)01538-2
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. *Psychology of Learning and Motivation*, 8, 47–89. doi:10.1016/S0079-7421(08)60452-1Get
- Bald, L., Berrien, F. K., Price, J. B., & Sprague, R. O. (1942). Errors in perceiving the temporal order of auditory and visual stimuli. *Journal of Applied Psychology*, 26(3), 382. doi:10.1037/h0059216
- Baron, A., Kaufman, A., & Stauber, K. A. (1969). Effects of instructions and reinforcement-feedback on human operant behavior maintained by fixed-interval reinforcement. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 12(5), 701–712. Doi:10.1901/jeab.1969.12-701
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol system. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(4), 577–660. doi:10.1017/S0140525X99002149
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 617–645. doi:10.1146/annurev. psych.59.103006.093639
- Barsalou, L. W. (2010). Grounded cognition: Past, present, and future. *Topics in Cognitive Science*, 2(4), 716–724. doi:10.1111/j.1756-8765.2010.01115.x

- Bartzokis, G., Lu, P. H., Tingus, K., Mendez, M. F., Richard, A., Peters, D. G., ... & Thompson, P. M. (2010). Lifespan trajectory of myelin integrity and maximum motor speed. *Neurobiology of aging*, *31*(9), 1554–1562. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2008.08.015
- Başar, E., Başar-Eroglu, C., Karakaş, S., & Schürmann, M. (2001). Gamma, alpha, delta, and theta oscillations govern cognitive processes. *International journal of psychophysiology*, *39*(2–3), 241–248. doi:10.1016/S0167-8760(00)00145-8
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2014). *lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version. 1, 7*. doi:10.18637/jss.v067.i01
- Battaglia, P. W., Jacobs, R. A., & Aslin, R. N. (2003). Bayesian integration of visual and auditory signals for spatial localization. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, *20*(7), 1391–1397. doi:10.1364/JOSAA.20.001391
- Bench, C., Frith, C. D., Grasby, P. M., Friston, K. J., Paulesu, E., Frackowiak, R. S. J., & Dolan, R. J. (1993). Investigations of the functional anatomy of attention using the Stroop test. *Neuropsychologia*, *31*(9), 907–922. doi:10.1016/0028-3932(93)90147-R
- Bentall, R. P., Lowe, C. F. (1982). Developmental aspects of human operant behaviour : The role of instructions and self-instructions. *Behaviour Analysis Letters*, *2*(3), 186–186.
- Bentall, R. P., Lowe, C. F., & Beasty, A. (1985). The role of verbal behavior in human learning: II Developmental differences. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *43*(2), 165–181.
- Berg, R. W., & Ditlevsen, S. (2013). Synaptic inhibition and excitation estimated via the time constant of membrane potential fluctuations. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, *110*(4), 1021–1034. doi:10.1152/jn.00006.2013.
- Berkeley, G. (1709). *An Essay Towards a New Theory of Vision*. Repéré à <http://www.gutenberg.org/ebooks/author/1497>. Accessed 23 February 2018.
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A developmental perspective on executive function. *Child development*, *81*(6), 1641–1660. doi:10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x
- Bishop, S. J. (2007). Neurocognitive mechanisms of anxiety: an integrative account. *Trends in cognitive sciences*, *11*(7), 307–316. doi:10.1016/j.tics.2007.05.008
- Bjorklund, D. V., & Causey, K. B. (2018). *Children's Thinking: Cognitive Development and Individual Differences*. Sage Publication.
- Block, R. A. (1978). Remembered duration: Effects of event and sequence complexity. *Memory & Cognition*, *6*(3), 320–326. doi:10.3758/BF03197462

- Block, R. A. (1982). Temporal judgments and contextual change. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 8(6), 530–544. doi:10.1037/0278-7393.8.6.530
- Block, R. A. (1990). *Models of psychological time*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Block RA. (1992). Prospective and retrospective duration judgment: the role of information processing and memory. In: M. Macar, V. Pouthas. & W. J. Friedman (Eds). *Time, action, and cognition: Towards bridging the gap* (pp. 141–152). Dordrecht, Netherlands : Kluwer Academic Publishers.
- Block, R. A., Hancock, P. A., & Zakay, D. (2010). How cognitive load affects duration judgments: A meta-analytic review. *Acta Psychologica*, 134(3), 330–343. doi:10.1016/j.actpsy.2010.03.006
- Block, R. A., & Reed, M. A. (1978). Remembered duration: Evidence for a contextual-change hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 4(6), 656. doi:10.1037/0278-7393.4.6.656
- Block, R. A., & Zakay, D. (1997). Prospective and retrospective duration judgments: A meta-analytic review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4(2), 184–197. doi:10.3758/BF03209393
- Boltz, M. G. (1995). Effects of event structure on retrospective duration judgments. *Perception & psychophysics*, 57(7), 1080–1096. doi:10.1177/00220345950740081301
- Boltz, M. G. (1998). The processing of temporal and non- temporal information in the remembering of event durations and musical structure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(4), 1087–1104. doi:10.1037//0096-1523.24.4.1087
- Boltz, M. G. (2005). Duration judgments of naturalistic events in the auditory and visual modalities. *Perception & Psychophysics*, 67, 1362–1375.
- Borgi, R. (2008). *Thermo-mécaniques et modélisation par système*. Toulouse, France : Cépaduès Editions
- Bortoletto, M., Cook, A., & Cunnington, R. (2011). Motor timing and the preparation for sequential actions. *Brain and cognition*, 75(2), 196–204. doi:10.1016/j.bandc.2010.11.016
- Bovet, P. (1968). Echelles subjectives de durée obtenues par une méthode de bissection. *L'Année psychologique*, 68(1), 23–36. Repéré à https://www.persee.fr/doc/psy_0003-5033_1968_num_68_1_27594
- Brackbill, Y., & Fitzgerald, H. E. (1972). Stereotype temporal conditioning in infants. *Psychophysiology*, 9(6), 569–577. doi:10.1111/j.1469-8986.1972.tb00766.x
- Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, 10(4), 433–436. doi:10.1163/156856897X00357.

- Brannon, E. M., Roussel, L. W., Meck, W. H., & Woldorff, M. (2004). Timing in the baby brain. *Cognitive Brain Research*, 21(2), 227–233. doi:10.1016/j.cogbrainres.2004.04.007
- Brannon, E. M., Suanda, S., & Libertus, K. (2007). Temporal discrimination increases in precision over development and parallels the development of numerosity discrimination. *Developmental science*, 10(6), 770–777. doi:10.1111/j.1467-7687.2007.00635.x
- Brodeur, D.A., Green, G. C., Flores, H. & Burack, J.A. (2014). Time Estimation Among Low-Functioning Individuals With Autism Spectrum Disorders: Evidence of Poor Sensitivity to Variability of Short Durations. *Autism Research*, 7(2), 237–244. doi:10.1002/aur.1364
- Bronson, G. (1974). The postnatal growth of visual capacity. *Child Development*, 45(4), 873–890. doi:10.2307/1128073
- Brown, S. W. (1997). Attentional resources in timing: Interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks. *Perception & Psychophysics*, 59(7), 1118–1140. doi:10.3758/BF03205526
- Brown, S. W. (2006). Timing and executive function: Bidirectional interference between concurrent temporal production and randomization tasks. *Memory & Cognition*, 34(7), 1464–1471. doi:10.3758/BF03195911
- Brown, S. W. (2010). Timing, resources, and interference: Attentional modulation of time perception. In K. C. Nobre & J. T. Coull (Eds.). *Attention and time* (pp. 107–122). New York, NY: Oxford University Press.
- Brown, S. W., Collier, S. A., & Night, J. C. (2013). Timing and executive resources: Dual-task interference patterns between temporal production and shifting, updating, and inhibition tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39(4), 947–963. doi:10.1037/a0030484
- Brown, B. L., Höhn, S., Faure, A., Von Hörsten, S., Le Blanc, P., Desvignes, N., ... & Doyère, V. (2011). Temporal sensitivity changes with extended training in a bisection task in a transgenic rat model. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 5, 44. doi:10.3389/fnint.2011.00044
- Brown, S. W., & Perreault, S. T. (2017). Relation between temporal perception and inhibitory control in the Go/No-Go task. *Acta Psychologica*, 173, 87–93. doi:10.1016/j.actpsy.2016.12.004
- Brown, S. W., & Stubbs, D. A. (1988). The psychophysics of retrospective and prospective timing. *Perception*, 17(3), 297–310. doi:10.1068/p170297
- Brown, S. W., & Stubbs, D. A. (1992). Attention and interference in prospective and retrospective timing. *Perception*, 21(4), 545–557. doi:10.1068/p210545

- Brown, S. W., & West, A. N. (1990). Multiple timing and the allocation of attention. *Acta Psychologica*, 75(2), 103–121. doi:10.1016/0001-6918(90)90081-P
- Bruno, A., & Cicchini, G. M. (2016). Multiple channels of visual time perception. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 131–139. doi:10.1016/j.cobeha.2016.02.028
- Bryce, D., & Bratzke, D. (2016). Multiple timing of nested intervals: Further evidence for a weighted sum of segments account. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(1), 317–323. doi:10.3758/s13423-015-0877-5
- Bryce, D., Seifried-Dübon, T., & Bratzke, D. (2015). How are overlapping time intervals perceived? Evidence for a weighted sum of segments model. *Acta psychologica*, 156, 83–95. doi:10.1016/j.actpsy.2014.12.007
- Buchweitz, A., Keller, T. A., Meyler, A., & Just, M. A. (2012). Brain activation for language dual-tasking: Listening to two people speak at the same time and a change in network timing. *Human Brain Mapping*, 33(8), 1868–1882. doi:10.1002/hbm.21327
- Bueti, D. (2011a). The sensory representation of time. *Frontiers in Integrative Neurosciences*, 25(34), 1–3. doi:10.3389/fnint.2011.00034.
- Buffardi, L. (1971). Factors affecting the filled-duration illusion in the auditory, tactual, and visual modalities. *Perception & Psychophysics*, 10(4), 292–294. doi:10.3758/BF03212828
- Buhusi, C. V., & Meck, W. H. (2002). Differential effects of methamphetamine and haloperidol on the control of an internal clock. *Behavioral Neuroscience*, 116(2), 291–297. doi:10.1037/0735-7044.116.2.291
- Buhusi, C. V., & Meck, W. H. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(10), 755. doi:10.1038/nrn1764
- Buhusi, C. V., & Meck, W. H. (2009). Relativity theory and time perception: single or multiple clocks?. *PloS one*, 4(7), e6268. doi:10.1371/journal.pone.0006268
- Buhusi, C. V., Oprisan, S. A., & Buhusi, M. (2018). Biological and cognitive frameworks for a mental timeline. *Frontiers in Neuroscience*, 12, 377. doi:10.3389/fnins.2018.00377
- Buhusi, C. V., Reyes, M. B., Gathers, C. A., Oprisan, S. A., & Buhusi, M. (2018). Inactivation of the medial-prefrontal cortex impairs interval timing precision, but not timing accuracy or scalar timing in a peak-interval procedure in rats. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 12(20). doi:10.3389/fnint.2018.00020.

- Buhusi, C. V., Sasaki, A., & Meck, W. H. (2002). Temporal integration as a function of signal and gap intensity in rats (*Rattus norvegicus*) and pigeons (*Columba livia*). *Journal of Comparative Psychology*, *116*(4), 381–390. doi:10.1037//0735-7036.116.4.381
- Bulf, H., Johnson, S. P., & Valenza, E. (2011). Visual statistical learning in the newborn infant. *Cognition*, *121*(1), 127–132. doi:10.1016/j.cognition.2011.06.
- Burr, D., Tozzi, A., & Morrone, M. C. (2007). Neural mechanisms for timing visual events are spatially selective in real-world coordinates. *Nature Neuroscience*, *10*(4), 423–425. doi:10.1038/nn1874
- Bush, G., Luu, P., & Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(6), 215–222. doi:10.1016/S1364-6613(00)01483-2
- Camus, J. F. (1996). *La psychologie cognitive de l'attention*. Paris, France : Armand Colin.
- Carlson, S. M., Koenig, M. A., & Harms, M. B. (2013). Theory of mind. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, *4*(4), 391–402. doi:10.1002/wcs.1232
- Casasanto, D., & Boroditsky, L. (2008). Time in the mind: Using space to think about time. *Cognition*, *106*(2), 579–593. doi:10.1016/j.cognition.2007.03.004
- Case, R. (1992). The role of the frontal lobes in the regulation of cognitive development. *Brain and cognition*, *20*(1), 51–73. doi:10.1016/0278-2626(92)90061-P
- Casey, B. J., Giedd, J. N., & Thomas, K. M. (2000). Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. *Biological Psychology*, *54*(1-3), 241–257. doi:10.1016/S0301-0511(00)00058-2
- Casey, B. J., Tottenham, N., Liston, C., & Durston, S. (2005). Imaging the developing brain: What have we learned about cognitive development? *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(3), 104–110. doi:10.1016/j.tics.2005.01.011
- Casini, L., & Macar, F. (1997). Effects of attention manipulation on judgments of duration and of intensity in the visual modality. *Memory & Cognition*, *25*(6), 812–818. doi:10.3758/BF03211325
- Casini, L., & Macar, F. (1999). Multiple approaches to investigate the existence of an internal clock using attentional resources. *Behavioural Processes*, *45*(1–3), 73–85. doi:10.1016/S0376-6357(99)00010-8
- Casini, L., Macar, F., & Grondin, S. (1992). Time estimation and attentional sharing. In F. Macar, V. Pouthas, & W. Friedman (Eds.), *Time, Action, Cognition: Towards Bridging the Gap* (pp. 177–180). Dordrecht, Netherlands: Kluwer. doi:10.1007/978-94-017-3536-0_20
- Casini, L., Pech-Georgel, C., & Ziegler, J. C. (2018). It's about time: revisiting temporal processing deficits in dyslexia. *Developmental Science*, *21*(2), e12530. doi:10.1111/desc.12530

- Cepeda, N. J., Kramer, A. F., & Gonzalez de Sather, J. (2001). Changes in executive control across the life span: Examination of task-switching performance. *Developmental Psychology, 37*(5), 715–730. doi:10.1037/0012-1649.37.5.715
- Chambon, M., Droit-Volet, S., & Niedenthal, P. M. (2008). The effect of embodying the elderly on time perception. *Journal of Experimental Social Psychology, 44*(3), 672–678. doi:10.1016/j.jesp.2007.04.014
- Chambon, M., Gil, S., Niedenthal, P. M., & Droit-Volet, S. (2005). Psychologie sociale et perception du temps: l'estimation temporelle des stimuli sociaux et émotionnels. *Psychologie Française, 50*(1), 167–180. doi:10.1016/j.psfr.2004.10.008
- Champagne, J., & Fortin, C. (2008). Attention sharing during timing: Modulation by processing demands of an expected stimulus. *Perception & Psychophysics, 70*(4), 630–639. doi:10.3758/PP.70.4.630
- Charras, P., Droit-Volet, S., Brechet, C., & Coull, J. T. (2017). The spatial representation of time can be flexibly oriented in the frontal or lateral planes from an early age. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 43*(4), 832–844. doi:10.1037/xhp0000349
- Chelonis, J. J., Flake, R. A., Baldwin, R. L., Blake, D. J., & Paule, M. G. (2004). Developmental aspects of timing behavior in children. *Neurotoxicology and teratology, 26*(3), 461–476. doi:10.1016/j.ntt.2004.01.004
- Chen, K-M., & Yeh, S-L. (2009). Asymmetric cross-modal effects in time perception. *Acta Psychologica, 130*(3), 225–234. doi:10.1016/j.actpsy.2008.12.008
- Cheng, R. K., Williams, C. L., & Meck, W. H. (2008). Oscillatory bands, neuronal synchrony and hippocampal function: implications of the effects of prenatal choline supplementation for sleep-dependent memory consolidation. *Brain research, 1237*, 176–194. doi:10.1016/j.brainres.2008.08.077
- Cheng, X., Yang, Q., Han, Y., Ding, X., & Fan, Z. (2014). Capacity limit of simultaneous temporal processing: How many concurrent 'clocks' in vision? *PLoS one, 9*(3), e91797. doi:10.1371/journal.pone.0091797
- Cherry, E.C. (1953). Some experiments on the recognition of speech with one and with two ears. *Journal of acoustical Society of America, 25*, 975–979.
- Chiba, A., Oshio, K. I., & Inase, M. (2008). Striatal neurons encoded temporal information in duration discrimination task. *Experimental Brain Research, 186*(4), 671–676. doi:10.1007/s00221-008-1347-3
- Church, R. M. (1980). Short-term memory for time intervals. *Learning and Motivation, 11*(2), 208–219. doi:10.1016/0023-9690(80)90013-2

- Church, R. M. (1984). Properties of the Internal Clock a. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 423(1), 566–582. doi:10.1111/j.1749-6632.1984.tb23459.x
- Church, R. M., & Broadbent, H. A. (1990). Alternative representations of time, number, and rate. *Cognition*, 37(1–2), 55–81. doi:10.1016/0010-0277(90)90018-F
- Church, R. M., & Deluty, M. Z. (1977). Bisection of temporal intervals. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 3(3), 216–228. doi:10.1037/0097-7403.3.3.216
- Church, R. M., & Gibbon, J. (1982). Temporal generalization. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 8(2), 165. doi:10.1037/0097-7403.8.2.165
- Church, R. M., Guilhardi, P., Keen, R., MacInnis, M., & Kirkpatrick, K. (2003). Simultaneous temporal processing. *Time and mind II: Information Processing Perspectives*, 3, 19.
- Cicchini, G. M., Arrighi, R., Cecchetti, L., Giusti, M., & Burr, D. C. (2012). Optimal en- coding of interval timing in expert percussionists. *Journal of Neuroscience*, 32(3), 1056–1060. doi:10.1523/JNEUROSCI.3411-11.2012.
- Cicchini, G. M., & Morrone, M. C. (2009). Shifts in spatial attention affect the perceived duration of events. *Journal of Vision*, 9(1), 1–13. doi:10.1167/9.1.9
- Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences*, 36(3), 181–204. doi:10.1017/S0140525X12000477
- Clément, A., & Droit-Volet, S. (2006). Counting in a time discrimination task in children and adults. *Behavioural Processes*, 71(2–3), 164–171. doi:10.1016/j.beproc.2005.08.007
- Coelho, M., Ferreira, J. J., Dias, B., Sampaio, C., Martins, I. P., & Castro-Caldas, A. (2004). Assessment of time perception: The effect of aging. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 10(3), 332–341. doi:10.1017/S1355617704103019
- Cohen, M. J. (1997). *Examiner manual: Children Memory Scale*. San Antonio, TX: Harcourt Brace.
- Cohen, R.A. (1993). *The Neuropsychology of Attention*. New-york, plenum press.
- Colas, F., Diard, J., & Bessiere, P. (2010). Common Bayesian models for common cognitive issues. *Acta biotheoretica*, 58(2–3), 191–216. doi:10.1007/s10441-010-9101-1
- Colombo, J., & Richman, W. A. (2002). Infant timekeeping: Attention and temporal estimation in 4-month-olds. *Psychological Science*, 13(5), 475–479. doi:10.1111/1467-9280.00484

- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature reviews neuroscience*, 3(3), 201–215. doi:10.1038/nrn755
- Corbetta, M., Miezin, F. M., Shulman, G. L., & Petersen, S. E. (1993). A PET study of visuospatial attention. *Journal of Neuroscience*, 13(3), 1202–1226. doi:10.1523/JNEUROSCI.13-03-01202.1993
- Corsi, P. M. (1972). Human memory and the medial temporal region of the brain. *Dissertation Abstracts International*, 34(2), 819B.
- Coull, J. T. (2004). fMRI studies of temporal attention: Allocating attention within, or towards, time. *Cognitive Brain Research*, 21(2), 216–226. doi:10.1016/j.cogbrainres.2004.02.011
- Coull, J. T. (2009). Neural substrates of mounting temporal expectation. *PLoS biology*, 7(8), e1000166. doi:10.1371/journal.pbio.1000166
- Coull, J. T., Cheng, R. K., & Meck, W. H. (2011). Neuroanatomical and neurochemical substrates of timing. *Neuropsychopharmacology*, 36(1), 3–25. doi:10.1038/npp.2010.113
- Coull, J. T., & Droit-Volet, S. (2018). Explicit understanding of duration develops implicitly through action. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(10), 923–937. doi:10.1016/j.tics.2018.07.011
- Coull, J. T., Frith, C. D., Büchel, C., & Nobre, A. C. (2000). Orienting attention in time: behavioural and neuroanatomical distinction between exogenous and endogenous shifts. *Neuropsychologia*, 38(6), 808–819. doi:10.1016/S0028-3932(99)00132-3
- Coull, J. T., & Nobre, A. C. (1998). Where and when to pay attention: the neural systems for directing attention to spatial locations and to time intervals as revealed by both PET and fMRI. *Journal of Neuroscience*, 18(18), 7426–7435. doi:10.1523/JNEUROSCI.18-18-07426.1998
- Coull, J. T., Vidal, F., Nazarian, B., & Macar, F. (2004). Functional anatomy of the attentional modulation of time estimation. *Science*, 303(5663), 1506–1508. doi:10.1126/science.1091573
- Courage, M. L., Reynolds, G. D., & Richards, J. E. (2006). Infants' attention to patterned stimuli: Developmental change from 3 to 12 months of age. *Child development*, 77(3), 680–695. doi:10.1111/j.1467-8624.2006.00897.x
- Cowan, N., Nugent, L. D., Elliott, E. M., Ponomarev, I., & Saults, J. S. (1999). The role of attention in the development of short-term memory: Age differences in the verbal span of apprehension. *Child Development*, 70(5), 1082–1097. doi:10.1111/1467-8624.00080
- Creelman, C. D. (1962). Human discrimination of auditory duration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(5), 582–593. doi:10.1121/1.1918172

- Crook, C.K. (1979). The Organization and Control of Infant Sucking. In H.R. Reese and L.P. Lipsitt (Eds.), *Advances in Child Development and Behaviour*, (pp. 209–252). New York, NY : Academic Press.
- Crowder, A. M., & Hohle, R. H. (1970). Time estimation by young children with and without informational feedback. *Journal of Experimental Child Psychology*, *10*(3), 295–307. doi:10.1016/0022-0965(70)90053-6
- Cui, X., Stetson, C., Montague, P. R., & Eagleman, D. M. (2009). Ready... go: amplitude of the fMRI signal encodes expectation of cue arrival time. *PLoS biology*, *7*(8), e1000167. doi:10.1371/journal.pbio.1000167
- Czeisler, C. A., Duffy, J. F., Shanahan, T. L., Brown, E. N., Mitchell, J. F., Rimmer, D. W., ... & Dijk, D. J. (1999). Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker. *Science*, *284*(5423), 2177–2181. doi:10.1126/science.284.5423.2177
- Damsma, A., van der Mijl, R., & van Rijn, H. (2018). Neural markers of memory consolidation do not predict temporal estimates of encoded items. *Neuropsychologica*, *117*, 36–45. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2018.04.039
- Darcheville, J. C., Riviere, V., & Wearden, J. H. (1992). Fixed-interval performance and self-control in children. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *57*(2), 187–199. doi:10.1901/jeab.1992.57-187
- Davis, M., & Whalen, P. J. (2001). The amygdala: vigilance and emotion. *Molecular psychiatry*, *6*(1), 13–34. doi:10.1038/sj.mp.4000812
- De Casper, A. J., & Fifer, W. P. (1980). Of human bonding: Newborns prefer their mothers' voices. *Science*, *208*(4448), 1174–1176. doi:10.1126/science.7375928
- De Casper, A. J., & Sigafos, A. D. (1983). The intrauterine heartbeat: A potent reinforcer for newborns. *Infant Behavior & Development*, *6*(1), 19–25. doi:10.1016/S0163-6383(83)80004-6
- de Hevia, M. D., Izard, V., Coubart, A., Spelke, E. S., & Streri, A. (2014). Representations of space, time, and number in neonates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(13), 4809–4813. doi:10.1073/pnas.1323628111
- de Hevia, M. D., Lee, Y. N., & Streri, A. (2017). The temporal dimensions in the first year of life. *Timing & Time Perception*, *5*(3–4), 280–296. doi:10.1163/22134468-00002093
- de Lurdes Delgado, M., & Droit-Volet, S. (2007). Testing the representation of time in reference memory in the bisection and the generalization task: The utility of a developmental approach. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *60*(6), 820–836. doi:10.1080/17470210600790471

- Demany, L., McKenzie, B., & Vurpillot, E. (1977). Rhythm perception in early infancy. *Nature*, *266*(5604), 718–719. doi:10.1038/266718a0
- Dennis, M., Edelstein, K., Hetherington, R., Copeland, K., Frederick, J., Blaser, S. E., ... & Fletcher, J. M. (2004). Neurobiology of perceptual and motor timing in children with spina bifida in relation to cerebellar volume. *Brain*, *127*(6), 1292–1301. doi:10.1093/brain/awh154
- De Villiers, J. G., & Pyers, J. E. (2002). Complements to cognition: A longitudinal study of the relationship between complex syntax and false-belief-understanding. *Cognitive Development*, *17*(1), 1037–1060. doi:10.1016/S0885-2014(02)00073-4
- De Vries, J. I. P., Visser, G. H.A., & Prechtl, H. F. R. (1984). Fetal mobility in the first half of pregnancy. In H. F. R. Prechtl (Ed.). *Continuity of neural functions from prenatal to postnatal life clinics in Developmental Medical Publications*, (pp. 46–64). Oxford, UK : Mac Keith Press
- Dempster, F. N., & Brainerd, C. J. (1995). *Interference and inhibition in cognition*. New York: Academic Press.
- Diamond A. (2002). Normal development of prefrontal cortex from birth to young adulthood: cognitive functions, anatomy, and biochemistry. In D. T. Stuss. & R. T. Knight 'Eds.), *Principles of Frontal Lobe Function* (pp. 466–503). Oxford, UK : Oxford University Press.
- Di Luca, M., & Rhodes, D. (2016). Optimal perceived timing: Integrating sensory information with dynamically updated expectations. *Scientific reports*, *6*, 28563. doi:10.1038/srep28563
- Drew, M. R., Zupan, B., Cooke, A., Couvillon, P. A., & Balsam, P. D. (2005). Temporal control of conditioned responding in goldfish. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *31*(1), 31–39. doi:10.1037/0097-7403.31.1.31
- Droit, S., Pouthas, V., & Jacquet, A. (1991). Apprentissage temporel chez des enfants âgés de 4 1/2 et 6 ans: rôle d'une horloge externe. *L'Année psychologique*, *91*(3), 347–364. doi:10.3406/psy.1991.29471
- Droit, S., Pouthas, V., & Jacquet, A. Y. (1990). Temporal learning in 4½-and 6-year-old children: Role of instructions and prior knowledge. *Journal of Experimental Child Psychology*, *50*(2), 305–321. doi:10.1016/0022-0965(90)90044-9
- Droit, S., Provasi, J., & Pouthas, V. (1993). Les activités rythmiques du nourrisson: de la neurophysiologie à la cognition. *Psychologie française*. Repéré à <https://www.researchgate.net/publication/232590248> Les activités rythmiques du nourrisson de la neurophysiologie à la cognition Rhythmic activities in infants From neurophysiology to cognition
- Droit-Volet, S. (1998). Time estimation in young children: an initial force rule governing time production. *Journal of Experimental Child Psychology*, *68*(3), 236–249. doi:10.1006/jecp.1997.2430

- Droit-Volet, S. (1999). Time estimation in young children: Effects of response type and familiarity. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 18(1), 27–44.
- Droit-Volet, S. (2000). L'estimation du temps: perspective développementale. *L'Année psychologique*, 100(3), 443–464. Repéré à https://www.persee.fr/doc/psy_0003-5033_2000_num_100_3_28653
- Droit-Volet, S. (2001). Les différentes facettes du temps. *Enfances Psy*, 13(1), 26–40. doi:10.3917/ep.013.0026
- Droit-Volet, S. (2002). Scalar timing in temporal generalization in children with short and long stimulus durations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 55(4), 1193–1209. doi:10.1080/02724980244000161
- Droit-Volet, S. (2003). Alerting attention and time perception in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 85(4), 372–394. doi:10.1016/S0022-0965(03)00103-6
- Droit-Volet, S. (2008). A further investigation of the filled-duration illusion with a comparison between children and adults. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 34(3), 400–414. doi:10.1037/0097-7403.34.3.400
- Droit-Volet, S. (2010). Speeding up a master clock common to time, number and length?. *Behavioural processes*, 85(2), 126–134. doi:10.1016/j.beproc.2010.06.017
- Droit-Volet, S. (2010). Stop using time reproduction tasks in a comparative perspective without further analyses of the role of the motor response on the temporal performance: The case of children. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22(1), 130–148. doi:10.1080/09541440902738900.
- Droit-Volet, S. (2011). Child and time. In A. Vatakis, A. Esposito, M. Giagkou, F. Cummins, & G. Papedis (Eds.), *Multidisciplinary aspects of time and time perception* (pp. 151–173). Berlin Heidelberg : Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-642-21478-3_13
- Droit-Volet, S. (2013). Time perception in children: A neurodevelopmental approach. *Neuropsychologia*, 51(2), 220–234. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2012.09.023.
- Droit-Volet, S. (2014). What emotions tell us about time. In D. Llyod, & V. Arstila (Eds.), *Subjective time: The philosophy, psychology, and neuroscience of temporality*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Droit-Volet, S. (2016). Development of time. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 102–109. doi:10.1016/j.cobeha.2016.02.003

- Droit-Volet, S. (2017). Time dilation in children and adults: the idea of a slower internal clock in young children tested with different click frequencies. *Behavioural Processes, 138*, 152–159. doi:10.1016/j.beproc.2017.03.005
- Droit-Volet, S. (2018). Intertwined facets of subjective time. *Current Directions in Psychological Science, 27*(6), 422–428. doi:10.1177/0963721418779978
- Droit-Volet, S., Brunot, S., & Niedenthal, P. (2004). BRIEF REPORT Perception of the duration of emotional events. *Cognition and Emotion, 18*(6), 849–858. doi:10.1080/02699930341000194
- Droit-Volet, S., Clément, A., & Fayol, M. (2008). Time, number, and length: Similarities and differences in bisection behavior in children and adults. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 61*(12), 1827–1846. doi:10.1080/17470210701743643.
- Droit-Volet, S., Clément, A., & Wearden, J. (2001). Temporal generalization in 3- to 8-year-old children. *Journal of Experimental Child Psychology, 80*(3), 271–288. doi:10.1006/jecp.2001.2629
- Droit-Volet, S., & Coull, J. T. (2016). Distinct developmental trajectories for explicit and implicit timing. *Journal of Experimental Child Psychology, 150*, 141–154. doi:10.1016/j.jecp.2016.05.010
- Droit-Volet, S., & Coull, J. T. (2016). Time does not fly but slow down in old age. *Time and Society, 150*, 141–154. doi:10.1177/0961463X16656852
- Droit-Volet, S., de Lurdes Delgado, M., & Rattat, A. C. (2006). The development of the ability to judge time in children. In J. R. Marrow (Ed.), *Focus on child psychology research* (pp. 81–104). New York, NY : Nova Science Publishers, Inc.
- Droit-Volet, S., Fayolle, S., Lamotte, M., & Gil, S. (2013). Time, emotion and the embodiment of timing. *Timing and Time Perception, 1*(1), 99–126. doi:10.1080/02699931.2015.1023180
- Droit-Volet, S., Fayolle, S. L., & Gil, S. (2011). Emotion and time perception: effects of film-induced mood. *Frontiers in Integrative Neuroscience, 5*(33). doi:10.3389/fnint.2011.00033
- Droit-Volet, S., & Gautier, T. (2000). Time estimation in 3- and 5½ -year-old children: The role of instructions as a function of the type of response. *Current Psychology of Cognition, 19*(3), 263–276.
- Droit-Volet, S., & Gil, S. (2009). The time-emotion paradox. *Journal of Philosophical Transactions of the Royal Society, B- Biological Sciences, 364*(1525), 1943–1953. doi:10.1098/rstb.2009.0013
- Droit-Volet, S., & Hallel, Q. (2018). Differences in modal distortion in time perception due to working memory capacity: a response with a developmental study in children and adults. *Psychological research, 1*–10. doi:10.1007/s00426-018-1016-5

- Droit-Volet, S., & Izaute, M. (2005). The effect of feedback on timing in children and adults: The temporal generalization task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *58*(3), 507–520. doi:10.1080/02724980443000025
- Droit-Volet, S., & Izaute, M. (2009). Improving time discrimination in children and adults in a temporal bisection task: The effects of feedback and no forced choice on decision and memory processes. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *62*(6), 1173–1188. doi:10.1080/17470210802384180
- Droit-Volet, S., & Meck, W. H. (2007). How emotions colour our perception of time. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(12), 504–513. doi:10.1016/j.tics.2007.09.008
- Droit-Volet, S., Meck, W., & Penney, T. (2007). Sensory modality effect and time perception in children and adults. *Behavioural Processes*, *74*(2), 244–250. doi:10.1016/j.beproc.2006.09.012
- Droit-Volet, S., & Rattat, A.-C. (1999). Are time and action dissociated in young children's time estimation? *Cognitive Development*, *14*(4), 573–595. doi:10.1016/S0885-2014(99)00020-9
- Droit-Volet, S., & Rattat, A.C. (2007). A further analysis of temporal bisection behavior in children with and without reference memory: the similarity and the partition task. *Acta Psychologica*, *125*(2), 240–256. doi:10.1016/j.actpsy.2006.08.003
- Droit-Volet, S., Tourret, S., & Wearden, J. (2004). Perception of the duration of auditory and visual stimuli in children and adults. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *57*(5), 797–818. doi:10.1080/02724980343000495
- Droit-Volet, S., & Wearden, J.H. (2001). Temporal bisection in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *80*(2), 142–159. doi:10.1006/jecp.2001.2631
- Droit-Volet, S., & Wearden, J. (2002). Speeding up an internal clock in children? Effects of visual flicker on subjective duration. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section B*, *55*(3), 193–211. doi:10.1080/02724990143000252
- Droit-Volet, S., & Wearden, J. (2003). Les modèles d'horloge interne en psychologie du temps. *L'année psychologique*, *103*(4), 617-654. Recupéré à : https://www.persee.fr/doc/psy_00035033_2003_num_103_4_29656
- Droit-Volet, S., Wearden, J., & Delgado-Yonger, M. (2007). Short-term memory for time in children and adults: A behavioral study and a model. *Journal of experimental child psychology*, *97*(4), 246–264. doi:10.1016/j.jecp.2007.02.003Get
- Droit-Volet, S., Wearden, J. & Zélanti, P. S. (2015). Cognitive abilities required in time judgment depending on the temporal task used: a comparison of children and adults. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *68*(11), 2216–2242. doi:10.1080/17470218.2015.1012087

- Droit-Volet, S., & Coull, J. T. (2016). Distinct developmental trajectories for explicit and implicit timing. *Journal of experimental child psychology*, *150*, 141–154. doi:10.1016/j.jecp.2016.05.010
- Droit-Volet, S., & Zélanti, P. (2013). Development of time sensitivity: duration ratios in time bisection. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *66*(4), 671–686. doi:10.1080/17470218.2012.712148
- Droit-Volet, S., & Zélanti, P. S. (2013). Development of time sensitivity and information processing speed. *PloS one*, *8*(8), e71424. doi:10.1371/journal.pone.0071424
- Droit-Volet, S., Zélanti, P.S., Dellatolas, G., Kieffer, V., El Massioui, Brown, B.L., Doyère, V., Joëlle Provasi, J. & Grill, J. (2013). Time perception in children treated for a cerebellar medulloblastoma. *Research in Developmental Disabilities*, *34*(1), 480–494. doi:10.1016/j.ridd.2012.09.006
- Duncan, J., Burgess, P., & Emslie, H. (1995). Fluid intelligence after frontal lobe lesions. *Neuropsychologia*, *33*(3), 261–268. doi:10.1016/0028-3932(94)00124-8
- Dyjas, O., Bausenhardt, K. M., & Ulrich, R. (2012). Trial-by-trial updating of an internal reference in discrimination tasks: Evidence from effects of stimulus order and trial sequence. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *74*(8), 1819–1841. doi:10.3758/s13414-012-0362-4
- Edwards, C. J., Alder, T. B., & Rose, G. J. (2002). Auditory midbrain neurons that count. *Nature Neuroscience*, *5*(10), 934–936. doi:10.1038/nn916
- Effron, D. A., Niedenthal, P.M., Gil, S., & Droit-Volet, S. (2006). Embodied temporal perception of emotion. *Emotion*, *6*(1), 1–9. doi:10.1037/1528-3542.6.1.1
- Ehrenstein, W. H., & Ehrenstein, A. (1999). Psychophysical methods. In U. Windhorst. & J. Hakan. (Eds.), *Modern techniques in neuroscience research* (pp. 1211–1241). Berlin Heidelberg : Springer, doi:10.1007/978-3-642-58552-4_43
- Einstein, A. (1990). *La théorie de la relativité restreinte et générale*. Paris : Dunod.
- Eisler, H. (1981). The parallel-clock model: Replies to critics and criticisms. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *29*(5), 516–520. doi:10.3758/BF03207367
- Eisler, H., Eisler, A., Hellström, A. (2008). Psychophysical Issues in the Study of Time Perception. In: Grondin, S. (ed.) *Psychology of Time* (pp. 75–109). Bingley, UK : Emerald Group Publishing. Repéré à <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=oWf2OqH3aJYC&oi=fnd&pg=PA75&ots=iaFm4fob-z&sig=Smb9HBuHBCqrLBqU-G NV7cVmzQ#v=onepage&q&f=false>
- Elman, J. L. (1990). Finding structure in time. *Cognitive science*, *14*(2), 179–211. doi:10.1207/s15516709cog1402_1

- Enns, J. T., & Brodeur, D. A. (1989). A developmental study of covert orienting to peripheral visual cues. *Journal of Experimental Child Psychology*, *48*(2), 171–189. doi:10.1016/0022-0965(89)90001-5
- Enns, J. T., & Girgus, J. S. (1985). Developmental changes in selective and integrative visual attention. *Journal of experimental child psychology*, *40*(2), 319–337. doi:10.1016/0022-0965(85)90093-1
- Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, *415*(6870), 429–433. doi:10.1038/415429a.
- Espinosa-Fernández, L., de la Torre Vacas, L., del Rosario García-Viedma, M., García-Gutiérrez, A., & Colmenero, C. J. T. (2004). Temporal performance in 4–8 year old children. The effect of chronometric information in task execution. *Acta psychologica*, *117*(3), 295–312. doi:10.1016/j.actpsy.2004.08.001
- Espinosa-Fernández, L., Miró, E., Cano, M., & Buela-Casal, G. (2003). Age-related changes and gender differences in time estimation. *Acta psychologica*, *112*(3), 221–232. doi:10.1016/S0001-6918(02)00093-8
- Fahlman, S. E. (1988). An empirical study of learning speed in back-propagation networks. *Technical Report CMU-CS-88-162*, Carnegie-Mellon Univ.
- Fayol, M., Camos, V., & Roussel, J. L. (2000), Acquisition et mise en œuvre de la numération par les enfants de 2 à 9 ans, In M. Pesenti & X. Seron. (Eds.), *Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres* (pp. 33–58). Marseille, France : Solal. Repéré à <http://www.ia94.ac-creteil.fr/math/lexique/nombre/fcr.pdf>
- Fayolle, S., Gil, S., & Droit-Volet, S. (2015). Fear and time: Fear speeds up the internal clock. *Behavioural Processes*, *120*, 135–140. doi:10.1016/j.beproc.2015.09.014
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf Und Hartel. In *English translation of Vol. 1 by HE Adler 1966*. Holt, Rinehart, and Winston New York.
- Ferdinand, N. K., & Kray, J. (2014). Developmental changes in performance monitoring: How electrophysiological data can enhance our understanding of error and feedback processing in childhood and adolescence. *Behavioural Brain Research*, *263*, 122–132. doi:10.1016/j.bbr.2014.01.
- Fereday, R., & Buehner, M. J. (2017). Temporal binding and internal clocks: No evidence for general pacemaker slowing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *43*(5), 971–985. doi:10.1037/xhp0000370

- Fernandes, H. L., Stevenson, I. H., Vilares, I., & Kording, K. P. (2014). The generalization of prior uncertainty during reaching. *Journal of Neuroscience*, *34*(34), 11470–11484. doi:10.1523/JNEUROSCI.3882-13.2014
- Ferrandez, A. M., Hugueville, L., Lehericy, S., Poline, J. B., Marsault, C., & Pouthas, V. (2003). Basal ganglia and supplementary motor area subtend duration perception: an fMRI study. *Neuroimage*, *19*(4), 1532–1544. doi:10.1016/S1053-8119(03)00159-9
- Ferreira, V. F. M., Paiva, G. P., Prando, N., Graça, C. R., & Kouyoumdjian, J. A. (2016). Time perception and age. *Arquivos de neuro-psiquiatria*, *74*(4), 299–302. doi:10.1590/0004-282X20160025
- Fjell, A. M., Walhovd, K., Brown, T., Kuperman, J., Chung, Y., Hagler, D., ... Gruen, J. (2012). Multimodal imaging of the self-regulating developing brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(48), 19620–19625. doi:10.1073/pnas.1208243109
- Fortin, C., & Breton, R. (1995). Temporal interval production and processing in working memory. *Perception & Psychophysics*, *57*(2), 203–215. doi:10.3758/BF03206507
- Fortin, C., & Massé, N. (1999). Order information in short-term memory and time estimation. *Memory & Cognition*, *27*(1), 54–62. doi:10.3758/BF03201213
- Fortin, C., & Rousseau, R. (1998). Interference from short-term memory processing on encoding and reproducing brief durations. *Psychological Research*, *61*(4), 269–276. doi:10.1007/s004260050031
- Fortin, C., & Schweickert, R. (2016). Timing, working memory, and expectancy: A review of interference studies. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *8*, 67–72. doi:10.1016/j.cobeha.2016.01.016
- Fortin, C., Rousseau, R., Bourque, P., & Kirouac, E. (1993). Time estimation and concurrent nontemporal processing: Specific interference from short-term-memory demands. *Perception & Psychophysics*, *53*(5), 536–548. doi:10.3758/BF03205202
- Fox, N. A., Henderson, H. A., Marshall, P. J., Nichols, K. E., & Ghera, M. M. (2005). Behavioral inhibition: Linking biology and behavior within a developmental framework. *Annual Review of Psychology*, *56*, 235–262. doi:10.1146/annurev.psych.55.090902.
- Fraisse, P. (1948). Étude comparée de la perception et de l'estimation de la durée chez les enfants et les adultes. *Enfance*, *1*(3), 199–211. doi:10.3406/enfan.1948.1083
- Fraisse, P. (1963). *The psychology of time*. Oxford, England: Harper & Row.
- François, M. (1927). VI. Contribution à l'étude du sens du Temps. La température interne comme facteur de variation de l'appréciation subjective des durées. *L'Année psychologique*, *28*(1), 186–204. doi:10.3406/psy.1927.6412

- Friedman, W. (1990). *About time: Inventing the fourth dimension.* , MA: MIT Press.
- Frith, C. D., & Frith, U. (1999). Interacting minds – A biological basis. *Science*, *286*(5445), 1692–1695. doi:10.1126/science.286.5445.1692
- Fuster, J. (2015). *The prefrontal cortex.* Academic Press.
- Gallistel, C. R. (1990). *The organization of learning.* The MIT Press.
- Gallistel, C. R., King, A., & McDonald, R. (2004). Sources of variability and systematic error in mouse timing behavior. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *30*(1), 3–16. doi:10.1037/0097-7403.30.1.3
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: a review using an integrative framework. *Psychological bulletin*, *134*(1), 31–60. doi:10.1037/0033-2909.134.1.31
- Gathercole, S. E. (1998). The development of memory. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *39*(1), 3–27. doi:10.1111/1469-7610.00301
- Gathercole, S. E. (2002). Memory development during the childhood year. In A. D. Baddeley, M. D. Kopelman, & B. A. Wilson (Eds.), *Handbook of memory disorders* (2nd ed., pp. 475–500). Chichester, UK: John Wiley.
- Gautier, T., & Droit-Volet, S. (2002). Attention and time estimation in 5- and 8-year-old children: A dual-task procedure. *Behavioural Processes*, *58*(1–2), 57–66. doi:10.1016/S0376-6357(02)00002-5
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, *84*(3), 279–325. doi:10.1037/0033-295X.84.3.279
- Gibbon, J. (1992). Ubiquity of scalar timing with a Poisson clock. *Journal of mathematical psychology*, *36*(2), 283–293. doi:10.1016/0022-2496(92)90041-5
- Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. H. (1984). Scalar timing in memory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *423*(1), 52–77. doi:10.1111/j.1749-6632.1984.
- 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*(2), 170–184. doi:10.1016/S0959-4388(97)80005-0
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., ... & Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nature neuroscience*, *2*(10), 861–863. doi:10.1038/13158

- Gil, S., & Droit-Volet, S. (2012). Emotional time distortions: The fundamental role of arousal. *Cognition and Emotion*, 26(5), 847–862. doi:10.1080/02699931.2011.625401
- Gil, S., Chambres, P., Hyvert, C., Fanget, M., & Droit-Volet, S. (2012). Children with Autism Spectrum Disorders have the working raw material for time perception. *PlosOne*, 7(11), e49116. doi:10.1371/journal.pone.0049116
- Gil, S., Niedenthal, P. M., & Droit-Volet, S. (2007). Anger and time perception in children. *Emotion*, 7(1), 219. doi:10.1037/1528-3542.7.1.219
- Goldstone, S., & Goldfarb, J. L. (1964a). Auditory and visual time judgment. *The Journal of General Psychology*, 70(2), 369–387. doi:10.1080/00221309.1964.9920609
- Goldstone, S., & Goldfarb, J. L. (1964b). Direct comparisons of auditory and visual durations. *Journal of Experimental Psychology*, 67(5), 483–485. doi:10.1037/h0046997
- Goldstone, S., & Lhamon, W. T. (1972). Auditory-visual differences in human temporal judgement. *Perception Motor Skills*, 34(2), 623–633. doi:10.2466/pms.1972.34.2.623
- Goldstone, S., & Lhamon, W. T. (1974). Studies of auditory-visual differences in human timing judgment, 1: Sounds are judged longer than lights. *Perception Motor Skills*, 39, 63–82. doi:10.2466/pms.1974.39.1.63
- Gooch, D., Snowling, M., & Hulme, C. (2011). Time perception, phonological skills and executive function in children with dyslexia and/or ADHD symptoms. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 52(2), 195–203. doi:10.1111/j.1469-7610.2010.02312.x
- Gori M, Chilosi, A. Forli F., & Burr, D. (2017). Audio-visual temporal perception in children with restored hearing. *Neuropsychologia*, 99, 350–359. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2017.03.025
- Gori, M., Sandini, G., & Burr, D. (2012). Development of visuo-auditory integration in space and time. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 6, 77. doi:10.3389/fnint.2012.00077
- Grant, D. S., & Spetch, M. L. (1993). Memory for duration in pigeons: Dissociation of choose-short and temporal-summation effects. *Animal Learning & Behavior*, 21(4), 384–390. doi:10.3758/BF03198005
- Gregoriou, G. G., Gotts, S. J., Zhou, H., & Desimone, R. (2009). High-frequency, long-range coupling between prefrontal and visual cortex during attention. *science*, 324(5931), 1207–1210. doi:10.1126/science.1171402
- Gremaud, R. (2013). *Théorie eulérienne des milieux déformables*. Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes.

- Gribova, A., Donchin, O., Bergman, H., Vaadia, E., & de Oliveira, S. C. (2002). Timing of bimanual movements in human and non-human primates in relation to neuronal activity in primary motor cortex and supplementary motor area. *Experimental Brain Research*, *146*(3), 322–335. doi:10.1007/s00221-002-1174-x
- Griffiths, T. L., & Tenenbaum, J. B. (2011). Predicting the future as Bayesian inference: People combine prior knowledge with observations when estimating duration and extent. *Journal of Experimental Psychology: General*, *140*(4), 725–743. doi:10.1037/a0024899
- Grondin, S. (2010). Timing and time perception: a review of recent behavioral and neuroscience findings and theoretical directions. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *72*(3), 561–582. doi:10.3758/APP.72.3.561
- Grondin, S., & Macar, F. (1992). Dividing attention between temporal and nontemporal tasks: A performance operating characteristic—POC—analysis. In F. Macar, V. Pouthas, & W. J. Friedman (Eds.), *Time, Action, and Cognition* (pp. 119–128). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic.
- Grondin, S., and McAuley, D. (2009). Duration discrimination in crossmodal sequences. *Perception*, *38*(10), 1542–1559. doi:10.1068/p6359
- Grondin, S, Meilleur-Wells, G., Ouellette, C., & Macar, F. (1998). Sensory effects on judgements of short-time intervals. *Psychological Research*, *61*(4), 261–268. doi:10.1007/s004260050030
- Gu, B. M., van Rijn, H., & Meck, W. H. (2015). Oscillatory multiplexing of neural population codes for interval timing and working memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *48*, 160–185. doi:10.1016/j.neubiorev.2014.10.008
- Haith, M. M., Hazan, C., & Goodman, G. S. (1988). Expectation and anticipation of dynamic visual events by 3.5-month-old babies. *Child development*, 467–479. doi:10.2307/1130325
- Haldemann, J., Troche, S. J., & Salthouse, T. A. (2016). *Theoretical perspectives on cognitive aging*. London: Routledge.
- Hale, C. M., & Tager-Flusberg, H. (2003). The influence of language on theory of mind: A training study. *Developmental Science*, *6*(3), 346–359. doi:10.1111/1467-7687.00289
- Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2017). High levels of time contraction in young children in dual tasks are related to their limited attention capacities. *Journal of Experimental Child Psychology*, *161*, 148–160. doi:10.1016/j.jecp.2017.04.013
- Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2018). Young children embody the time of others in their time judgments: The role of the theory of mind. *Infant and Child Development*, *27*(6), e2101. doi:10.1002/icd.2101

- Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2019). Timing in a dual-task in children and adults: when the interference effect is higher with concurrent non-temporal than temporal information. *Journal of Cognitive Psychology, 31*(1), 34–48. doi:10.1080/20445911.2019.1567519
- Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (submitted). Simultaneous time processing in children and adults: when attention predicts temporal interference effects.
- Hallez, Q., Damsma, A., Rhodes, D., van Rijn, H., & Droit-Volet, S. (2019). The dynamic effect of context on interval timing in children and adults. *Acta Psychologica, 192*, 87–93. doi:10.1016/j.actpsy.2018.10.004
- Hancock, P. A. (1996). Effects of control order, augmented feedback, input device and practice on tracking performance and perceived workload. *Ergonomics, 39*(9), 1146–1162. doi:10.1080/00140139608964535
- Hanley, J. R., & Morris, N. (1982). Time estimation as a function of recall: A test of Ornstein's theory of temporal judgement. *Current Psychology, 2*(1–2), 45–53. doi:10.1007/BF03186743
- Hart, H., Radua, J., Mataix-Cols, D., & Rubia, K. (2012). Meta-analysis of fMRI studies of timing in attention-deficit hyperactivity disorder (ADHD). *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 36*(10), 2248–2256. doi:10.1016/j.neubiorev.2012.08.003
- Hazeltine, E., Teague, D., & Ivry, R. B. (2002). Simultaneous dual-task performance reveals parallel response selection after practice. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 28*(3), 527. doi:10.1037/0096-1523.28.3.527
- Henderson, J., Hurly, T. A., Bateson, M., & Healy, S. D. (2006). Timing in Free-Living Rufous Hummingbirds, *Selasphorus rufus*. *Current Biology, 16*(5), 512–515. doi:10.1016/j.cub.2006.01.054
- Henry, M. J., & Herrmann, B. (2014). Low-frequency neural oscillations support dynamic attending in temporal context. *Timing & Time Perception, 2*(1), 62–86. doi:10.1163/22134468-00002011
- Hicks, R. E., & Brundige, R. M. (1974). Judgments of temporal duration while processing verbal and physiognomic stimuli. *Acta Psychologica, 38*(6), 447–453. doi:10.1016/0001-6918(74)90004-3
- Hicks, R. E., Miller, G. W., & Kinsbourne, M. (1976). Prospective and retrospective judgments of time as a function of amount of information processed. *American Journal of Psychology, 89*, 719–730. doi:10.2307/1421469
- Hinton, S. C., Harrington, D. L., Binder, J. R., Durgerian, S., & Rao, S. M. (2004). Neural systems supporting timing and chronometric counting: an fMRI study. *Cognitive Brain Research, 21*(2), 183–192. doi:10.1016/j.cogbrainres.2004.04.009

- Hoagland, H. (1933). The physiological control of judgments of duration: Evidence for a chemical clock. *The Journal of General Psychology*, 9(2), 267–287. doi:10.1080/00221309.1933.9920937
- Hollingworth, H. L. (1910). The central tendency of judgment. *The Journal of Philosophy, Psychology and Scientific Methods*, 7(17), 461–469. doi:10.2307/2012819
- Horr, N. K., & Di Luca, M. (2015). Filling the blanks in temporal intervals: the type of filling influences perceived duration and discrimination performance. *Frontiers in Psychology*, 6, 114. doi:10.3389/fpsyg.2015.00114
- Hothorn, T., Bretz, F., Westfall, P., Heiberger, R. M., & Schuetzenmeister, A. (2013). Multcomp: *Simultaneous inference in general parametric models R package version, 1*, 2–18. Repéré à <http://cran.r-project.org/web/packages/multcomp/index.html>.
- Howe, M. (2015). Memory development. In R. M. Lerner, L. Liben, & U. Mueller. (Eds.), *Handbook of Child Psychology and Developmental Science* (pp. 203–249). New York, US: Wiley. doi:10.1002/9781118963418.childpsy206
- Hughes, J. R. (2008). Gamma, fast, and ultrafast waves of the brain: their relationships with epilepsy and behavior. *Epilepsy & Behavior*, 13(1), 25–31. doi:10.1016/j.yebeh.2008.01.011
- Indraco, A., Spence, C., Vatakis, A., & Harrar, V. (2016). Combined effects of motor response, sensory modality, and stimulus intensity on temporal reproduction. *Experimental Brain Research*, 234(5), 1189–1198. doi:10.1007/s00221-015-4264-2
- Irwin-Chase, H., & Burns, B. (2000). Developmental changes in children's abilities to share and allocate attention in a dual task. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77(1), 61–85. doi:10.1006/jecp.1999.2557
- Ivry, R. B., & Schlerf, J. E. (2008). Dedicated and intrinsic models of time perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(7), 273–280. doi:10.1016/j.tics.2008.04.002
- Ivry, R. B., & Spencer, R. M. (2004). Evaluating the role of the cerebellum in temporal processing: beware of the null hypothesis. *Brain*, 127(8), e13–e13. doi:10.1093/brain/awh226
- Ivry, R. B., Spencer, R. M., Zelaznik, H. N., & Diedrichsen, J. (2002). The cerebellum and event timing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 978(1), 302–317. doi:10.1111/j.1749-6632.2002.tb07576.x
- Jacoby, L. L. (1991). A process dissociation framework: Separating automatic from intentional uses of memory. *Journal of memory and language*, 30(5), 513–541. doi:10.1016/0749-596X(91)90025-F

- Jahanshahi, M., Jones, C. R., Dirnberger, G., & Frith, C. D. (2006). The substantia nigra pars compacta and temporal processing. *Journal of Neuroscience*, *26*(47), 12266–12273. doi:10.1523/JNEUROSCI.2540-06.2006
- Jamieson, D. G., & Petrusic, W. M. (1975). Presentation order effects in duration discrimination. *Perception & Psychophysics*, *17*(2), 197–202. doi:10.3758/BF03203886
- Janssen, P., & Shadlen, M. N. (2005). A representation of the hazard rate of elapsed time in macaque area LIP. *Nature Neuroscience*, *8*(2), 234–241. doi:10.1038/nn1386
- Jantzen, K. J., Steinberg, F. L., & Kelso, J. A. S. (2005). Functional MRI reveals the existence of modality and coordination-dependent timing networks. *Neuroimage*, *25*(4), 1031–1042. doi:10.1016/j.neuroimage.2004.12.029
- Jazayeri, M., & Shadlen, M. N. (2010). Temporal context calibrates interval timing. *Nature Neuroscience*, *13*(8), 1020–1026. doi:10.1038/nn.2590.
- Jiang, Y., Saxe, R., & Kanwisher, N. (2004). Functional magnetic resonance imaging provides new constraints on theories of the psychological refractory period. *Psychological Science*, *15*(6), 390–396. doi:10.1007/BF03186743
- Johnson, M. H., Dziurawiec, S., Ellis, H., & Morton, J. (1991). Newborns' preferential tracking of face-like stimuli and its subsequent decline. *Cognition*, *40*(1–2), 1–19. doi:10.1016/0010-0277(91)90045-6
- Johnston, A., Arnold, D. H., & Nishida, S. (2006). Spatially localized distortions of event time. *Current Biology*, *16*(5), 472–479. doi:10.1016/j.cub.2006.01.032
- Johnston, A., Bruno, A., & Ayhan, I. (2011). Retinotopic selectivity of adaptation-based compression of event. *Journal of Vision*, *11*(2), 1–3. doi:10.1167/11.2.21a
- Johnstone, B., Erdal, K., & Stadler, M. A. (1995). The relationship between the Wechsler Memory Scale—Revised (WMS-R) Attention index and putative measures of Attention. *Journal of clinical psychology in medical settings*, *2*(2), 195–204. doi:10.1007/BF01988643
- Kacelnik, A., & Brunner, D. (2002). Timing and foraging: Gibbon's scalar expectancy theory and optimal patch exploitation. *Learning and Motivation*, *33*(1), 177–195. doi:10.1006/lmot.2001.1110
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. New-York, NY : Prentice Hall.
- Kail, R. V., & Ferrer, E. (2007). Processing speed in childhood and adolescence: Longitudinal models for examining developmental change. *Child development*, *78*(6), 1760–1770. doi:10.1111/j.1467-8624.2007.01088.x

- Karaminis, T., Cicchini, G. M., Neil, L., Cappagli, G., Aagten-Murphy, D., Burr, D., & Pellicano, E. (2016). Central tendency effects in time interval reproduction in autism. *Scientific reports*, *6*, 28570. doi:10.1038/srep28570.
- Karatekin, C. (2004). Development of attentional allocation in the dual task paradigm. *International Journal of Psychophysiology*, *52*(1), 7–21. doi:10.1016/j.ijpsycho.2003.12.002
- Kasprowicz, M., Czosnyka, M., Soehle, M., Smielewski, P., Kirkpatrick, P. J., Pickard, J. D., & Budohoski, K. P. (2012). Vasospasm shortens cerebral arterial time constant. *Neurocritical Care*, *16*(2), 213–218. doi:10.1007/s12028-011-9653-1
- Killeen, P. R., & Fetterman, J. G. (1988). A behavioral theory of timing. *Psychological review*, *95*(2), 274–295. doi:10.1037/0033-295X.95.2.274
- Killeen, P.R., Fetterman, J.G., & Bizo, L.A. (1997). Time's cause. In C. M. Bradshaw & E. Szabadi (Eds.), *Time and behavior: Psychological and neurobehavioral analyses* (pp. 79–131). Amsterdam: Elsevier, North-Holland.
- Killeen, P. R., & Weiss, N. A. (1987). Optimal timing and the Weber function. *Psychological review*, *94*(4), 455–468. doi:10.1037/0033-295X.94.4.455
- Kim, Y. J., Tsai, J. J., Ojemann, J., & Verghese, P. (2017). Attention to multiple objects facilitates their integration in prefrontal and parietal cortex. *Journal of Neuroscience*, *37*(19), 4942–4953. doi:10.1523/JNEUROSCI.2370-16.2017
- Kirkham, N. Z., Cruess, L., & Diamond, A. (2003). Helping children apply their knowledge to their behavior on a dimension-switching task. *Developmental Science*, *6*(5), 449–467. doi:10.1111/1467-7687.00300
- Kirkham, N. Z., Slemmer, J. A., & Johnson, S. P. (2002). Visual statistical learning in infancy: Evidence for a domain general learning mechanism. *Cognition*, *83*(2), 35–42. doi:10.1016/S0010-0277(02)00004-5.
- Kirkham, N. Z., Slemmer, J. A., Richardson, D. C., & Johnson, S. P. (2007). Location, location, location: Development of spatiotemporal sequence learning in infancy. *Child Development*, *78*(5), 1559–1571. doi:10.1111/j.1467-8624.2007.01083.x
- Kladopoulos, C. N., Hemmes, N. S., & Brown, B. L. (2004). Prospective timing under dual-task paradigms: Attentional and contextual-change mechanisms. *Behavioural Processes*, *67*(2), 221–233. doi:10.1016/j.beproc.2003.12.004
- Klapproth, F. (2011). Temporal decision making in simultaneous timing. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *5*(71). doi:10.3389/fnint.2011.00071
- Klein, E. (2002). *Le temps existe-t-il?*. Paris, France : Le Pommier.

- Klein, E. (2007). *Le facteur temps ne sonne jamais deux fois*. Roubaix, France : Flammarion.
- Kleiner, M., Brainard, D., Pelli, D., Ingling, A., Murray, R., & Broussard, C. (2007). What's new in Psychtoolbox-3. *Perception*, *36*(14), 1.
- Klenberg, L., Korkman, M., & Lahti-Nuuttila, P. (2001). Differential development of attention and executive functions in 3-to 12-year-old Finnish children. *Developmental Neuropsychology*, *20*(1), 407–428. doi:10.1207/S15326942DN2001_6.
- Koch, G., Oliveri, M., Torriero, S., Salerno, S., Gerfo, E. L., & Caltagirone, C. (2007). Repetitive TMS of cerebellum interferes with millisecond time processing. *Experimental Brain Research*, *179*(2), 291–299.
- Koch, I., Poljac, E., Müller, H., & Kiesel, A. (2018). Cognitive structure, flexibility, and plasticity in human multitasking—An integrative review of dual-task and task-switching research. *Psychological Bulletin*, *144*(6), 557–583. doi:10.1037/bul0000144
- Körding, K. P., & Wolpert, D. M. (2004). Bayesian integration in sensorimotor learning. *Nature*, *427*(6971), 244–247. doi:10.1038/nature02169
- Körding, K. P., Beierholm, U., Ma, W. J., Quartz, S., Tenenbaum, J. B., & Shams, L. (2007). Causal inference in multisensory perception. *PLoS one*, *2*(9), e943. doi:10.1371/journal.pone.0000943
- Labrell, F., Mikaeloff, Y., Perdry, H., & Dellatolas, G. (2016). Time knowledge acquisition in children aged 6 to 11 years and its relationship with numerical skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, *143*, 1–13. doi:10.1016/j.jecp.2015.10.005
- Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., & Wright, P. E. (1998). Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on Optimization*, *9*(1), 112–147. doi:10.1137/S1052623496303470
- Lakatos, P., Karmos, G., Mehta, A. D., Ulbert, I., & Schroeder, C. E. (2008). Entrainment of neuronal oscillations as a mechanism of attentional selection. *science*, *320*(5872), 110–113. doi:10.1126/science.1154735
- Lake, J. I., LaBar, K. S., & Meck, W. H. (2016). Emotional modulation of interval timing and time perception. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *64*, 403–420. doi:10.1016/j.neubiorev.2016.03.003
- Lapid, E., Ulrich, R., & Rammsayer, T. (2008). On estimating the difference limen in duration discrimination tasks: A comparison of the 2AFC and the reminder task. *Perception & Psychophysics*, *70*(2), 291–305. doi:10.1371/journal.pone.

- Lederman, L. M. & Hill, C. T. (2008). *Symmetry and the beautiful universe*. New-York, USA : Prometheus Books.
- Lejeune, H. (1998). Switching or gating? The attentional challenge in cognitive models of psychological time. *Behavioural processes*, 44(2), 127–145. doi:10.1016/S0376-6357(98)00045-X
- Lejeune, H. (2000). Prospective timing, attention and the switch: A response to 'Gating or switching? Gating is a better model of prospective timing' by Zakay. *Behavioural Processes*, 52(2–3), 71–76. doi:10.1016/S0376-6357(00)00136-4
- Lejeune, H., Richelle, M., & Wearden, J. H. (2006). About Skinner and time: Behavior-analytic contributions to research on animal timing. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 85(1), 125–142. doi:10.1901/jeab.2006.85.04
- Lejeune, H., & Wearden, J. H. (2006). Scalar properties in animal timing: Conformity and violations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(11), 1875–1908. doi:10.1080/17470210600784649
- Lejeune, J., & Wearden, J. H. (2009). Vierordt's the experimental study of the time sense (1868) and its legacy. *European Journal of Cognitive Psychology*, 21(6), 94–960. doi:10.1080/09541440802453006.
- Lenroot, R. K., & Giedd, J. N. (2006). Brain development in children and adolescents: insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neuroscience & biobehavioral reviews*, 30(6), 718–729. doi:10.1016/j.neubiorev.2006.06.001
- Lenth, R. V. (2016). Least-squares means: The R package lsmeans. *Journal of Statistical Software*, 69(1), 1–33. doi:10.18637/jss.v069.i01.
- Leon, M. I., & Shadlen, M. N. (2003). Representation of time by neurons in the posterior parietal cortex of the macaque. *Neuron*, 38(2), 317–327. doi:10.1016/S0896-6273(03)00185-5
- Levin, I., & Wilkening, F. (1989). Measuring time via counting: The development of children's conceptions of time as a quantifiable dimension. In G. de Soete, H. Feger. & C. Klauer (Eds.), *Advances in psychology* (Vol. 59, pp. 119–144). Amsterdam, Netherlands : North Holland publishers. doi:10.1016/S0166-4115(08)61040-7
- Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2003). Brain activation patterns during measurement of sub-and supra-second intervals. *Neuropsychologia*, 41(12), 1583–1592. doi:10.1016/S0028-3932(03)00118-0
- Liptak, B. G. (2003). *Instrument Engineers' Handbook, Volume One: Process Measurement and Analysis*. CRC press.
- Litovsky, R. (2015). Development of the auditory system. In P. Vinken, & G. Bruyn (Eds.), *Handbook of clinical neurology* (Vol. 129, pp. 55–72). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-62630-1.00003-2

- Livesey, A. C., Wall, M. B., & Smith, A. T. (2007). Time perception: manipulation of task difficulty dissociates clock functions from other cognitive demands. *Neuropsychologia*, *45*(2), 321–331. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2006.06.033
- Long, E. R., Hammack, J. T., May, F., & Campbell, B. J. (1958). Intermittent reinforcement of operant behavior in children. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *1*(4), 315–339. doi:10.1901/jeab.1958.1-315
- Lou, H. C., Henriksen, L., & Bruhn, P. (1984). Focal cerebral hypoperfusion in children with dysphasia and/or attention deficit disorder. *Archives of Neurology*, *41*(8), 825–829. doi:10.1001/archneur.1984.04050190031010
- Lourenco, S. F., & Longo, M. R. (2011). Origins and development of generalized magnitude representation. In S. Deheane, & E. Brannon (Eds.), *Space, time and number in the brain* (pp. 224–244). London, UK : Elsevier Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-385948-8.00015-3
- Low, J. (2010). Preschoolers' implicit and explicit false-belief understanding: Relations with complex syntactical mastery. *Child Development*, *81*(2), 597–615. doi:10.1111/j.1467-8624.2009.01418.x
- Lowe, C. F., Beasty, A., & Bentall, R. P. (1983). The role of verbal behavior in human learning: Infant performance on fixed-interval schedules. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *39*(1), 157–164. doi:10.1901/jeab.1983.39-157
- Lucas, C. G., & Griffiths, T. L. (2009). Learning the Form of Causal Relationships Using Hierarchical Bayesian Models. *Cognitive Science*, *34*(1), 113–147. doi:10.1111/j.1551-6709.2009.01058.x
- Lustig, C. A., & Meck, W. H. (1998). Attention mediated temporal processing deficits as a function of age, signal modality, and time of day. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*(55), 134–137.
- Macar, F. (1996). Temporal judgments on intervals containing stimuli of varying quantity, complexity and periodicity. *Acta Psychologica*, *92*(3), 297–308. doi:10.1016/0001-6918(95)00017-8
- Macar, F., Anton, J. L., Bonnet, M., & Vidal, F. (2004). Timing functions of the supplementary motor area: an event-related fMRI study. *Cognitive Brain Research*, *21*(2), 206–215. doi:10.1016/j.cogbrainres.2004.01.005
- Macar, F., Coull, J., & Vidal, F. (2006). The supplementary motor area in motor and perceptual time processing: fMRI studies. *Cognitive processing*, *7*(2), 89–94. doi:10.1007/s10339-005-0025-7
- Macar, F., Grondin, S., & Casini, L. (1994). Controlled attention sharing influences time estimation. *Memory & Cognition*, *22*(6), 673–686. doi:10.3758/BF03209252

- 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. *Experimental Brain Research*, *142*(4), 475–485. doi:10.1007/s00221-001-0953-0
- Magnani, B., & Musetti, A. (2017). Innate and cultural spatial time: A developmental perspective. *Frontiers in Human Neurosciences*, *11*, 215. doi:10.3389/fnhum.2017.00215
- Malapani, C., Rakitin, B., Levy, R., Meck, W. H., Deweer, B., Dubois, B., & Gibbon, J. (1998). Coupled temporal memories in Parkinson's disease: a dopamine-related dysfunction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*(3), 316–331. doi:10.1162/089892998562762
- Mamassian, P., Landy, M., & Maloney, L. T. (2002). Bayesian modelling of visual perception. In R. P. N. Rao, B. A. Olshausen, & M. S. Lewicki (Eds.). *Probabilistic models of the brain: Perception and neural function* (pp. 13–36). Cambridge, MA: MIT Press.
- Manly, T., Robertson, I. H., Anderson, V., & Nimmo-Smith, I. (1999). *The test of everyday attention (TEA-CH)*. Bury St. Edmunds, England: Thames Valley Test Company
- Maquestiaux, F., Hartley, A. A., & Bertsch, J. (2004). Can practice overcome age-related differences in the psychological refractory period effect? *Psychology and Aging*, *19*(4), 649–667. doi:10.1037/0882-7974.19.4.
- Maricq, A. V., Roberts, S., & Church, R. M. (1981). Methamphetamine and time estimation. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *7*(1), 18–30. doi:10.1037/0097-7403.7.1.18
- Matsuda, F., & Matsuda, M. (1983). A longitudinal study of learning process of duration estimation in young children. *Japanese Psychological Research*, *25*(3), 119–129. doi:10.4992/psycholres1954.25.119
- Matell, M. S., & Meck, W. H. (2000). Neuropsychological mechanisms of interval timing behavior. *Bioessays*, *22*(1), 94–103. doi:10.1002/(SICI)1521-1878(200001)22:1<94::AID-BIES14>3.0.CO;2-E
- Matell, M. S., & Meck, W. H. (2004). Cortico-striatal circuits and interval timing: coincidence detection of oscillatory processes. *Cognitive brain research*, *21*(2), 139–170. doi:10.1016/j.cogbrainres.2004.06.012
- Matell, M. S., Meck, W. H., & Nicolelis, M. A. (2003). Interval timing and the encoding of signal duration by ensembles of cortical and striatal neurons. *Behavioral Neuroscience*, *117*(4), 760–773. doi:10.1037/0735-7044.117.4.760
- Matthews, W. J., & Meck, W. H. (2016). Temporal cognition: Connecting subjective time to perception, attention, and memory. *Psychological bulletin*, *142*(8), 865–907. doi:10.1037/bul0000045

- Mauk, M. D., & Buonomano, D. V. (2004). The neural basis of temporal processing. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 307–340. doi:10.1146/annurev.neuro.27.070203.144247
- Mayer, A. R., Wilcox, C. E., Teshiba, T. M., Ling, J. M., & Yang, Z. (2013). Hyperactivation of the cognitive control network in cocaine use disorders during a multisensory Stroop task. *Drug and alcohol dependence*, 133(1), 235–241. doi:10.1016/j.drugalcdep.2013.04.029
- Melloni, L., Molina, C., Pena, M., Torres, D., Singer, W., & Rodriguez, E. (2007). Synchronization of neural activity across cortical areas correlates with conscious perception. *Journal of neuroscience*, 27(11), 2858–2865. doi:10.1523/JNEUROSCI.4623-06.2007
- McAuley, J. D., & Jones, M. R. (2003). Modeling effects of rhythmic context on perceived duration: A comparison of interval and entrainment approaches to short-interval timing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(6), 1102–1125. doi:10.1037/0096-1523.29.6.1102-1125.
- McAuley, J., Jones, M., Holub, S., Johnston, H., & Miller, N. (2006). The time of our lives: Life span development of timing and event tracking. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135(3), 348–367. doi:10.1037/0096-3445.135.3.
- McCormack, T. (2015). The development of temporal cognition. In R. M. Lerner (Ed.), *Handbook of child psychology and developmental science* (7th ed., Vol. 2, pp. 624–670). New York, NY: Wiley. doi:10.1002/9781118963418.childpsy215
- McCormack, T., Brown, G. D. A., Maylor, E. A., Darby, A., & Green, D. (1999). Developmental changes in time estimation : Comparing childhood and old age. *Developmental Psychology*, 35(4), 1143–1155. doi:10.1037/0012-1649.35.4.1143
- McCormack, T., & Hoerl, C. (2017). The development of temporal concepts: Learning to locate events in time. *Timing and Time Perception*, 5(3–4), 297–327. doi:10.1163/22134468-00002094
- McCormack, T., Wearden, J. H., Smith, M. C., & Brown, G. D. A. (2005). Episodic temporal generalization: A developmental study. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 58(4), 693–704. doi:10.1080/02724980443000250
- Meaux, J. B., & Chelonis, J. J. (2003). Time perception differences in children with and without ADHD. *Journal of pediatric health care*, 17(2), 64–71. doi:10.1067/mp.2003.26
- Meck, W. H. (1983). Selective adjustment of the speed of internal clock and memory processes. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 9(2), 171–201. doi:10.1037//0097-7403.9.2.171

- Meck, W. H. (1984). Attentional Bias between Modalities: Effect on the Internal Clock, Memory, and Decision Stages Used in Animal Time Discrimination a. *Annals of the New York Academy of sciences*, *423*(1), 528–541. doi:10.1111/j.1749-6632.1984.tb23457.x
- Meck, W. H. (2005). Neuropsychology of timing and time perception. *Brain and Cognition*, *58*(1), 1–8. doi:10.1016/j.bandc.2004.09.004
- Meck, W. H., & Benson, A. M. (2002). Dissecting the brain's internal clock: how frontal–striatal circuitry keeps time and shifts attention. *Brain and Cognition*, *48*(1), 195–211. doi:10.1006/brcg.2001.1313
- Meck, W. H., & Church, R. M. (1984). Simultaneous temporal processing. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *10*(1), 1–29. doi:10.1037/0097-7403.
- Meck, W. H., & MacDonald, C. J. (2007). Amygdala inactivation reverses fear's ability to impair divided attention and make time stand still. *Behavioral Neuroscience*, *121*(4), 707–720. doi:10.1037/0735-7044.121.4.707
- Meck, W. H., & N'Diaye, K. (2005). Un modèle neurobiologique de la perception et de l'estimation du temps. *Psychologie Française*, *50*(1), 47–63. doi:10.1016/j.psfr.2004.10.009
- Meck, W. H., Penney, T. B., & Pouthas, V. (2008). Cortico-striatal representation of time in animals and humans. *Current Opinion in Neurobiology*, *18*(2), 145–152. doi:10.1016/j.conb.2008.08.002
- Meck, W. H., & Williams, C. L. (1997). Simultaneous temporal processing is sensitive to prenatal choline availability in mature and aged rats. *Neuroreport*, *8*(14), 3045–3051. doi:10.1097/00001756-199709290-00009
- Melgire, M., Ragot, R., Samson, S., Penney, T. B., Meck, W. H., & Pouthas, V. (2005). Auditory/visual duration bisection in patients with left or right medial-temporal lobe resection. *Brain and cognition*, *58*(1), 119–124. doi:10.1016/j.bandc.2004.09.013
- Merchant, H., Harrington, D. L., & Meck, W. H. (2013). Neural basis of the perception and estimation of time. *Annual Review of Neuroscience*, *36*, 313–336. doi:10.1146/annurev-neuro-062012-170349
- Mermillod, M., Bonin, P., Méot, A., Ferrand, L., & Paindavoine, M. (2012). Computational evidence that frequency trajectory theory does not oppose but emerges from age-of-acquisition theory. *Cognitive Science*, *36*(8), 1499–1531. doi:10.1111/j.1551-6709.2012.01266.x
- Meyer, D. E., & Kieras, D. E. (1997). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part 2. Accounts of psychological refractory-period phenomena. *Psychological Review*, *104*(4), 749–791. doi:10.1037/0033-295X.104.4.749
- Miall, C. (1989). The storage of time intervals using oscillating neurons. *Neural Computation*, *1*(3), 359–371. doi:10.1162/neco.1989.1.3.359

- Michon, J. A., Pouthas, V. E., & Jackson, J. L. (1988). *Guyau and the Idea of Time*. Oxford, UK : North-Holland.
- Mikolov, T., Joulin, A., Chopra, S., Mathieu, M., & Ranzato, M. A. (2014). Learning longer memory in recurrent neural networks. *arXiv preprint arXiv:1412.7753*. repéré à : <https://pdfs.semanticscholar.org/9665/247ea3421929f9b6ad721f139f11edb1dbb8.pdf>
- Mioni, G., Stablum, F., McClintock, S. M., & Grondin, S. (2014). Different methods for reproducing time, different results. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *76*(3), 675–681. doi:10.3758/s13414-014-0625-3
- Miyazaki, M., Nozaki, D., & Nakajima, Y. (2005). Testing Bayesian models of human coincidence timing. *Journal of Neurophysiology*, *94*(1), 395–399. doi:10.1152/jn.01168.2004.
- Monier, F., & Droit-Volet, S. (2018). Synchrony and emotion in children and adults. *International Journal of Psychology*, *53*(3), 184–193. doi:10.1002/ijop.12363
- Montangero, J. (1988). Le développement de la connaissance du temps. Quelques aspects fondamentaux. *Le Journal des Psychologues*, 35–48.
- Montangero, J. (2001). Comment l'enfant comprend le temps. *La recherche, hors-série*, *5*, 88–91.
- Montgomery, D. E., & Koeltzow, T. E. (2010). A review of the day–night task: The Stroop paradigm and interference control in young children. *Developmental Review*, *30*(3), 308–330. doi:10.1016/j.dr.2010.07.001
- Morey, R. D., Rouder, J. N., & Jamil, T. (2014). *BayesFactor: Computation of Bayes factors for common designs*. R Package Version. 0.9(8).
- Morgan, M. J., Giora, E., & Solomon, J. A. (2008). A single “stopwatch” for duration estimation, a single “ruler” for size. *Journal of Vision*, *8*(2), 14–14. doi:10.1167/8.2.14
- Morris, N., & Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory: The role of the central executive. *British journal of psychology*, *81*(2), 111–121. doi:10.1111/j.2044-8295.1990.tb02349.x
- Muhs, K. S., Karwowski, W., & Kern, D. (2018). Temporal variability in human performance: A systematic literature review. *International Journal of industrial ergonomics*, *64*, 31–50. doi:10.1016/j.ergon.2017.10.002
- Muris, P., Mayer, B., van Lint, C., & Hofman, S. (2008). Attentional control and psychopathological symptoms in children. *Personality and Individual Differences*, *44*(7), 1495–1505. doi:10.1016/j.paid.2008.01.006

- Nather, F. C., & Bueno, J. L. O. (2008). Movement ranking scale of human body static images for subjective timing estimation. *Proceedings of Fechner Day*, 24(1), 185–190.
- Nather, F. C., Bueno, J. L., Bigand, E., & Droit-Volet, S. (2011). Time changes with the embodiment of another's body posture. *PLoSOne*, 6(5), e19818. doi:10.1371/journal.pone.0019818
- Navon, D., & Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3), 214–255. doi:10.1037/0033-295X.86.3.214
- Navon, D., & Miller, J. (1987). Role of outcome conflict in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(3), 435–448. doi:10.1037//0096-1523.13.3.435
- Nelson, K. (1986). Event knowledge and cognitive development. In K. Nelson (Ed.), *Event knowledge: Structure and function in development* (pp.1–21). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Newton, I. (1759). *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Paris, France : Lambert.
- Niedenthal, P. M. (2007). Embodying emotion. *Science*, 316(5827), 1002–1005. doi:10.1126/science.1136930
- Niedenthal, P. M., Barsalou, L. W., Winkielman, P., Krauth-Gruber, S., & Ric, F. (2005). Embodiment in attitudes, social perception, and emotion. *Personality and Social Psychology Review*, 9(3), 184–211. doi:10.1207/ s15327957pspr0903_1
- Nijboer, M., Borst, J., van Rijn, H., & Taatgen, N. (2013). *Concurrent multitasking: Different tasks, different interference*. Récupéré à : http://www.mennonijboer.nl/publications/Nijboer_2013_CogSci_poster.pdf
- Nijboer, M., Taatgen, N. A., Brands, A., Borst, J. P., & van Rijn, H. (2013). Decision making in concurrent multitasking: do people adapt to task interference?. *PloS one*, 8(11), e79583. doi:10.1371/journal.pone.0079583
- Nobre, A. C. (2001). Orienting attention to instants in time. *Neuropsychologia*, 39(12), 1317–1328. doi:10.1016/S0028-3932(01)00120-8
- Nobre, K., & Coull, J. T. (2010). *Attention and time*. New York: Oxford University Press.
- Norman, D. A. & Shallice, T. (1986). Attention to action : Willed and automatic control of behavior. In R. J. Davidson D. E. Schwartz & D. Shapira (Eds.), *Consciousness and self-regulation : Advances in research* (pp. 1–18). New York, NY : Plenum Press. doi:10.1007/978-1-4757-0629-1_1
- Noulhiane, M., Mella, N., Samson, S., Ragot, R., & Pouthas, V. (2007). How emotional auditory stimuli modulate time perception. *Emotion*, 7(4), 697–704. Doi:10.1037/1528-3542.7.4.697

- Ogden, R. S., Wearden, J. H., & Montgomery, C. (2014). The differential contribution of executive functions to temporal generalization, reproduction, and verbal estimation. *Acta Psychologica, 152*, 84–94.
doi:10.1016/j.actpsy.2014.07.014
- Ohyama, T., Gibbon, J., Deich, J. D., & Balsam, P. D. (1999). Temporal control and maintenance of autoshaping in the ring dove. *Animal Learning & Behavior, 27*, 89–98.
- Olsson, D. M., & Nelson, L. S. (1975). The Nelder-Mead simplex procedure for function minimization. *Technometrics, 17*(1), 45–51. doi:10.2307/1267998
- Ornstein, R. E. *On the experience of time*. Harmondsworth, England: Penguin Books, 1969.
- Ortega, L., Lopez, F., & Church, R. M. (2009). Modality and intermittency effects on time estimation. *Behavioural Processes, 81*(2), 270–273. doi:10.1016/j.beproc.2009.02.009
- Parasuraman, R. (Ed.). (2000). *The attentive brain*. MIT Press.
- Pardo, J. V., Pardo, P. J., Janer, K. W., & Raichle, M. E. (1990). The anterior cingulate cortex mediates processing selection in the Stroop attentional conflict paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 87*(1), 256–259. doi:10.1073/pnas.87.1.256
- Pascual-Leone, J., & Baillargeon, R. (1994). Developmental measurement of mental attention. *International Journal of Behavioral Development, 17*(1), 161–200.
doi:10.1177/016502549401700110
- Pashler, H. (1984). Processing stages in overlapping tasks: evidence for a central bottleneck. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 10*(3), 358–377. doi:10.1037/0096-1523.10.3.358
- Pashler, H. E., & Sutherland, S. (1998). *The psychology of attention* (Vol. 15) Cambridge, MA: MIT press.
- Penney, T. B. (2003). Modality differences in interval timing: Attention, clock speed, and memory. In W. H. Meck (Ed.), *Functional and neural mechanisms of interval timing* (pp. 209–233). Boca Raton, FL, US: CRC Press. doi:10.1201/9780203009574.ch8
- Penney, T. B., Gibbon, J., & Meck, W. H. (2000). Differential effects of auditory and visual signals on clock speed and temporal memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 26*(6), 1770–1787. doi:10.1037/0096-1523.26.6.1770
- Perner, J., Mauer, M. C., & Hildenbrand, M. (2011). Identity: Key to children's understanding of belief. *Science, 333*(6041), 474–477. doi:10.1126/science.1201216
- Penney, T. B., & Turret, S. (2005). Les effets de la modalité sensorielle sur la perception du temps. *Psychologie Française, 5*(1), 131–143. doi:10.1016/j.psfr.2004.10.011

- Penney, T.P., Vaitilingam, L., 2008. Imaging time. In: Grondin, S. (Ed.), *Psychology of Time* (pp. 261–294). Bingley, UK : Emerald group publishing.
- Petzschner, F. H., & Glasauer, S. (2011). Iterative Bayesian estimation as an explanation for range and regression effects: a study on human path integration. *Journal of Neuroscience*, *31*(47), 17220–17229.
doi:10.1523/JNEUROSCI.2028-11.2011
- Petzschner, F. H., Maier, P., & Glasauer, S. (2012). Combining symbolic cues with sensory input and prior experience in an iterative Bayesian framework. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *6*(58), 1–18.
doi:10.3389/fnint.2012.00058.
- Pinheiro de Carvalho, M., Machado, A., & Tonneau, F. (2016). Learning in the temporal bisection task: Relative or absolute?. *Journal of Experimental Psychology: Animal Learning and Cognition*, *42*(1), 67.
doi:10.1037/xan0000089
- Plourde, M., Gamache, P. L., & Grondin, S. (2008). Filled intervals are perceived as longer than empty ones: The effect occurs even with a between-session design. *Proceedings of Fechner Day*, *24*(1), 87–93.
- Poljac, E., Koch, I., & Bekkering, H. (2009). Dissociating restart cost and mixing cost in task switching. *Psychological Research Psychologische Forschung*, *73*(3), 407–416. doi:10.1007/s00426-008-0151-9
- Posner, M.I. (1995). Attention in cognitive neuroscience: an overview. In M. S. Gazzaniga. & E. Bizzi. (eds.), *The cognitive neurosciences* (pp. 615– 24). Cambridge, MA : MIT Press
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual review of neuroscience*, *13*(1), 25–42. doi:10.1146/annurev.ne.13.030190.000325
- Posner, M. I., & Rafal, R. D. 1987. Cognitive theories of attention and the rehabilitation of attentional deficits. In J. Meier, A. L. Benton, & L. Diller. (Eds.), *Neuropsychological Rehabilitation* (pp. 182–201). Edinburgh, UK : Churchill Livingstone.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (1991). Les mécanismes de l'attention. *Revue de neurologie*, *2*, 85–115.
- Posner, M. I., Rothbart, M. K., Sheese, B. E., & Voelker, P. (2012). Control networks and neuromodulators of early development. *Developmental Psychology*, *48*(3), 827–835.
doi:10.1037/a0025530
- Posner, M. I., & Snyder, C. R. (1975). Attention and cognitive control. In R. L. Solso (Ed.), *Information processing and cognition: The Loyola symposium* (pp. 55–85). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

- Pouthas, V. (1981). Adaptations comportementales à la durée chez le très jeune enfant. In *Memoire, conditionnement, evolution*. Paris, France : Publications de la Sorbonne, série.
- Pouthas, V. (1993). Ontogenesis of temporal learning in the child experimental evidence and perspectives. *Psychologica Belgica*, 33(2), 171–183.
- Pouthas, V. (1995). Développement de la perception du temps et des régulations temporelles de l'action chez le nourrisson et l'enfant. In I. Deliège. & J. Sloboda. (Eds.), *Naissance et Développement du Sens Musical* (pp. 133–163). Paris, France : Presse Universitaires de France.
- Pouthas, V., Droit, S., & Jacquet, A. Y. (1993). Temporal experiences and time knowledge in infancy and early childhood. *Time & Society*, 2(2), 199–218. doi:10.1177/0961463X93002002004
- Pouthas, V., Droit, S., Jacquet, A. Y., & Wearden, J. H. (1990). Temporal differentiation of response duration in children of different ages: developmental changes in relations between verbal and nonverbal behavior. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 53(1), 21–31. doi:10.1901/jeab.1990.53-21
- Pouthas, V., & Jacquet, A. Y. (1983). Attente et adaptation à la durée chez l'enfant. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 3(4), 397–406.
- Poynter, D. (1989). Judging the duration of time intervals: A process of remembering segments of experience. In G. de Soete, H. Feger, & K. Klauer. (Eds.), *Advances in psychology* (Vol. 59, pp. 305–331). Amsterdam, Netherlands : North-Holland publishers. doi:10.1016/S0166-4115(08)61045-6
- Predebon, J. (1996). The relationship between the number of presented stimuli and prospective duration estimates: The effect of concurrent task activity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 3(3), 376–379. doi:10.3758/BF03210764
- Provasi, J., Pouthas, V., Jacquet, A. Y. (1993) Acquired temporal regulations of non-nutritive sucking activity in young infants. *Infant Behavior and Development* (Submitted for publication).
- Provasi, J., Rattat, A. C., & Droit-Volet, S. (2011). Temporal bisection in 4-month-old infants. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 37(1), 108–113. doi:10.1037/a0019976.
- Puyjarinet, F. (2011). Perception du temps: aspects théoriques et perspectives cliniques en psychomotricité. In J.M. Albaret & J. Corraze (Eds.), *Entretiens de Psychomotricité 2011* (pp. 65–74). Paris: Les Entretiens Médicaux. Repéré à : <https://www.researchgate.net/publication/312026989> Perception et gestion du temps aspects théoriques et perspectives cliniques en psychomotricité
- Rall, W. (1960). Membrane potential transients and membrane time constant of motoneurons. *Experimental neurology*, 2(5), 503–532. doi:10.1016/0014-4886(60)90029-7

- Rammsayer, T. H. (2012). Auditory and visual temporal sensitivity: evidence for a hierarchical structure of modality-specific and modality-independent levels of temporal information processing. *Psychological Research, 76*(1), 20–31. doi:10.1007/s00426-011-0333-8
- Rammsayer, T. H., & Brandler, S. (2007). Performance on temporal information processing as an index of general intelligence. *Intelligence, 35*(2), 123–139. doi:10.1016/j.intell.2006.04.007
- Rammsayer, T. H., Borter, N., & Troche, S. J. (2015). Visual-auditory differences in duration discrimination of intervals in the subsecond and second range. *Frontiers in psychology, 6*, 1626. doi:10.3389/fpsyg.2015.01626
- Rao, S. M., Mayer, A. R., & Harrington, D. L. (2001). The evolution of brain activation during temporal processing. *Nature Neuroscience, 4*(3), 317–323. doi:10.1038/85191
- Rattat, A. C. (2010). Bidirectional interference between timing and concurrent memory processing in children. *Journal of Experimental Child Psychology, 106*, 145–162. doi:10.1016/j.jecp.2010.02.001
- Rattat, A. C., & Droit-Volet, S. (2002). Le transfert d'un apprentissage de durée d'action chez le jeune enfant: l'effet facilitateur de la variété des actions?. *Enfance, 54*(2), 141–153. doi:10.3917/enf.542.0141
- Rattat, A. C., & Droit-Volet, S. (2005). The long-term retention of time: A developmental study. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section B, 58*(2), 163–176. doi:10.1080/02724990444000096
- Rattat, A. C., & Droit-Volet, S. (2007). Implicit long-term memory for duration in young children. *European Journal of Cognitive Psychology, 19*(2), 271–285. doi:10.1080/09541440600834647
- Rattat, A. C., & Droit-Volet, S. (2010). The effects of interference and retention delay on temporal generalization performance. *Attention, Perception, & Psychophysics, 72*(7), 1903–1912. doi:10.3758/APP.72.7.1903
- Rattat, A. C., & Droit-Volet, S. (2012). What is the best and easiest method of preventing counting in different temporal tasks?. *Behavior Research Methods, 44*(1), 67–80. doi:10.3758/s13428-011-0135-3
- Rattat, A. C., & Tartas, V. (2017). Temporal categorization of familiar actions by children and adults. *Timing & Time Perception, 5*(1), 61–76. doi:10.1163/22134468-00002080.
- Recanzone, G. H. (2009). Interactions of Auditory and Visual Stimuli in Space and Time. *Hearing Research, 258*(1–2), 89–99. doi:10.1016/j.heares.2009.04.009

- Reimers, S., & Maylor, E. A. (2005). Task switching across the life span: Effects of age on general and specific switch costs. *Developmental Psychology*, *41*(4), 661–671. doi:10.1037/0012-1649.41.4.661
- Rhodes, D. (2018). On the distinction between perceived duration and event timing towards a unified model of time perception. *Timing & Time Perception*, *6*(1), 90–123. doi:10.1163/22134468-20181132.
- Richelle, M., & Lejeune, H. (1979). L'animal et le temps. In P. Fraisse (Ed.), *Du temps biologique au temps psychologique; symposium de l'association de psychologie scientifique de langue française* (pp. 73–128). Paris, France : Presses Universitaires de France.
- Richelle, M., & Lejeune, H. (1980). Régulation temporelle du comportement et anticipation. *Anticipation et comportement*, 141–158. Repéré à <http://hdl.handle.net/2268/100929>
- Roberts, W. A. (1995). Simultaneous numerical and temporal processing in the pigeon. *Current Directions in Psychological Science*, *4*(2), 47–51. doi:10.1111/1467-8721.ep10771008
- Rohenkohl, G., & Nobre, A. C. (2011). Alpha oscillations related to anticipatory attention follow temporal expectations. *Journal of Neuroscience*, *31*(40), 14076–14084. doi: 10.1523/JNEUROSCI.3387-11.2011
- Ronsard, P. (1963). *Poésies choisies de Ronsard*. Paris, France : Garnier frères.
- Roseboom, W., Fountas, Z., Nikiforou, K., Bhowmik, D., Shanahan, M., & Seth, A. K. (2018). Time without clocks: Human time perception based on perceptual classification. *bioRxiv*, 172387. doi:10.1101/172387
- Rothbart, M. K., & Posner, M. I. (2015). The developing brain in a multitasking world. *Developmental Review*, *35*, 42– 63. doi:10.1016/j.dr.2014.12.006
- Rothbart, M. K., Sheese, B. E., Rueda, M. R., & Posner, M. I. (2011). Developing mechanisms of self-regulation in early life. *Emotion Review*, *3*(2), 207–213. doi:10.1177/ 1754073910387943
- Rousseau, L., & Rousseau, R. (1996). Stop-reaction time and the internal clock. *Perception & Psychophysics*, *58*(3), 434–448. doi:10.3758/BF03206819
- Rousseau, R., Picard, D., & Pitre, E. (1984). An adaptive counter model for time estimation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *423*(1), 639–642. doi:10.1111/j.1749-6632.1984.tb23480.x
- Roux, F., & Uhlhaas P. J. (2014). Working memory and neural oscillations: α - γ versus θ - γ codes for distinct WM information? *Trends in Cognitive Science*, *18*(1), 16–25. doi:10.1016/j.tics.2013.10.010.
- Rovee-Collier, C. (1993). The capacity for long-term memory in infancy. *Current Directions in Psychological Science*, *2*(4), 130–135. doi:10.1111/1467-8721.ep10772618

- Rovelli, C. (2008). *Qu'est-ce que le temps ? Qu'est-ce que l'espace ?* Rome, Italie : Bernard Gilson éditeur.
- Rovelli, C. (2018). *L'ordre du temps*. Roubaix, France : Flammarion.
- Rubin, O., & Meiran, N. (2005). On the origins of the task mixing cost in the cuing task-switching paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *31*(6), 1477–1491. doi:10.1037/0278-7393.31.6.1477
- Ruff, H. A., & Capozzoli, M. C. (2003). Development of attention and distractibility in the first 4 years of life. *Developmental psychology*, *39*(5), 877–890. doi:10.1037/0012-1649.39.5.877
- Ruff, H. A., & Rothbart, M. K. (2001). *Attention in early development: Themes and variations*. Oxford University Press.
- Ruff, H.A., & Saltarelli, L.M. (1993). Exploratory play with objects: Basic cognitive processes and individual differences. In M. Bornstein, & A.W. O'Reilly (Eds.), *The role of play in the development of thought* (pp. 5–15). San Francisco, USA : Jossey-Bass.
- Rustic, J., & Enns, J. T. (2015). Attentional development. In R. M. Lerner, L. Liben & U. Mueller. (Eds.), *Handbook of child psychology and developmental science* (pp. 158–203). New York, NY : Wiley.
- Sakai, K., Hikosaka, O., Takino, R., Miyauchi, S., Nielsen, M., & Tamada, T. (2000). What and when: parallel and convergent processing in motor control. *Journal of Neuroscience*, *20*(7), 2691–2700. doi: 10.1523/JNEUROSCI.20-07-02691.2000
- Salthouse, T. A., & Meinzig, E. J. (1995). Aging, inhibition, working memory, and speed. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, *50*(6), 297–306. doi:10.1093/geronb/50B.6.P297
- Salvucci, D. D., Taatgen, N. A., & Borst, J. P. (2009). Toward a unified theory of the multitasking continuum: From concurrent performance to task switching, interruption, and resumption. In M. Jones (Ed. *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 1819–1828). Boston, MA, USA : Association for Computing Machinery. doi:10.1145/1518701. 1518981
- Savage, R., Cornish, K., Manly, T., & Hollis, C. (2006). Cognitive processes in children's reading and attention: The role of working memory, divided attention, and response inhibition. *British Journal of Psychology*, *97*(3), 365–385. doi:10.1348/000712605X81370
- Saxe, R., & Kanwisher, N. (2003). People thinking about thinking people: The role of the temporo-parietal junction in "theory of mind". *NeuroImage*, *19*(4), 1835–1842. doi:10.1016/S1053-8119(03)00230-1
- Schiffman, H. R., & Bobko, D. J. (1974). Effects of stimulus complexity on the perception of brief temporal intervals. *Journal of Experimental Psychology*, *103*(1), 156–159. doi:10.1037/h0036794

- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological review*, *84*(2), 127–190. doi:10.1037/0033-295X.84.2.127
- Schirmer, A. (2004). Timing speech: a review of lesion and neuroimaging findings. *Cognitive Brain Research*, *21*(2), 269–287. doi:10.1016/j.cogbrainres.2004.04.003
- Schirmer, A., Meck, W. H., & Penney, T. B. (2016). The socio-temporal brain: Connecting people in time. *Trends in Cognitive Sciences*, *20*(10), 760–772. doi:10.1016/j.tics.2016.08.002
- Schlichting, N., Damsma, A., Aksoy, E. E., Wächter, M., Asfour, T., & van Rijn, H. (2018). Temporal context influences the perceived duration of everyday actions: Assessing the ecological validity of lab-based timing phenomena. *Journal of Cognition*, *1*(1), 4. doi:10.5334/joc.4.
- Schneider, D., Bayliss, A. P., Becker, S. I., & Dux, P. E. (2012). Eye movements reveal sustained implicit processing of others' mental states. *Journal of Experimental Psychology: General*, *141*(3), 433–438. doi:10.1037/a0025458
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological review*, *84*(1), 1–66. doi:10.1037/0033-295X.84.1.1
- Schumacher, E. H., Seymour, T. L., Glass, J. M., Fencsik, D. E., Lauber, E. J., Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (2001). Virtually perfect time sharing in dual-task performance: Uncorking the central cognitive bottleneck. *Psychological science*, *12*(2), 101–108. doi:10.1111/1467-9280.00318
- Sciutti, A., Burr, D., Saracco, A., Sandini, G., & Gori, M. (2014). Development of context dependency in human space perception. *Brain Research*, *232*(12), 3965–3976. doi:10.1007/s00221-014-4021-y.
- Shakespeare, W. (1904). *The tragedy of Hamlet*. University Press.
- Shallice, T. (1988). *From neuropsychology to mental structure*. Cambridge University Press.
- Shallice, T. I. M., & Burgess, P. W. (1991a). Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. *Brain*, *114*(2), 727–741. doi:10.1093/brain/114.2.727
- Shallice T, Burgess PW. (1991). Higher-order cognitive impairments and frontal lobe lesions in man. In H. S. Levin, H. M. Eisenberg. & A. L. Benton (Eds.), *Frontal lobe function and dysfunction* (pp. 125– 138). Oxford, UK : Oxford University Press.
- Shi, Z., & Burr, D. (2016). Predictive coding of multisensory timing. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *8*, 200–206. doi:10.1016/j.cobeha.2016.02.014.

- Shi, Z., Church, R. M., & Meck, W. H. (2013). Bayesian optimization of time perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *17*(11), 556–564. doi:10.1016/j.tics.2013.09.009
- Siegel, M., Donner, T. H., Oostenveld, R., Fries, P., & Engel, A. K. (2008). Neuronal synchronization along the dorsal visual pathway reflects the focus of spatial attention. *Neuron*, *60*(4), 709–719. doi:10.1016/j.neuron.2008.09.010
- Sigman, M., & Dehaene, S. (2006). Dynamics of the central bottleneck: Dual-task and task uncertainty. *PLoS Biology*, *4*(7), e220. doi:10.1371/journal.pbio.0040220
- Siqueland, E. R., & de Lucia, C. A. (1969). Visual reinforcement of nonnutritive sucking in human infants. *Science*, *165*(3898), 1144–1146. doi:10.1126/science.165.3898.1144
- Skinner, B. F. (1938). *The Behavior of Organisms: An Experimental Analysis*. New York: Appleton-Century.
- Slade, L., & Ruffman, T. (2005). How language does (and does not) relate to theory of mind: A longitudinal study of syntax, semantics, working memory and false belief. *British Journal of Developmental Psychology*, *23*(1), 117–141. doi:10.1348/026151004X21332
- Smith, A., Taylor, E., Lidzba, K., & Rubia, K. (2003). A right hemispheric frontocerebellar network for time discrimination of several hundreds of milliseconds. *Neuroimage*, *20*(1), 344–350. doi:10.1016/S1053-8119(03)00337-9
- Smith, A., Taylor, E., Warner Rogers, J., Newman, S., & Rubia, K. (2002). Evidence for a pure time perception deficit in children with ADHD. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *43*(4), 529–542. doi:10.1111/1469-7610.00043
- Sowell, E. R., Delis, D., Stiles, J., & Jernigan, T. L. (2001). Improved memory functioning and frontal lobe maturation between childhood and adolescence: A structural MRI study. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *7*(3), 312–322. doi:10.1017/S135561770173305X
- Sowell, E. R., Peterson, B. S., Thompson, P. M., Welcome, S. E., Henkenius, A. L., & Toga, A. W. (2003). Mapping cortical change across the human life span. *Nature Neuroscience*, *6*(3), 309–315. doi:10.1038/nn1008
- Sowell, E. R., Thompson, P. M., Holmes, C. J., Batth, R., Jernigan, T. L., & Toga, A. W. (1999). Localizing age-related changes in brain structure between childhood and adolescence using statistical parametric mapping. *NeuroImage*, *9*(6), 587–597. doi:10.1006/nimg.1999.0436
- Spencer, R. M., Zelaznik, H. N., Diedrichsen, J., & Ivry, R. B. (2003). Disrupted timing of discontinuous but not continuous movements by cerebellar lesions. *science*, *300*(5624), 1437–1439. doi:10.1126/science.1083661

- Spetch, M. L., & Rusak, B. (1992). Temporal context effects in pigeons' memory for event duration. *Learning and Motivation, 23*(2), 117–144. doi:10.1016/0023-9690(92)90013-C
- Spetch, M. L., & Wilkie, D. M. (1983). Subjective shortening: A model of pigeons' memory for event duration. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 9*(1), 14–30. doi:10.1037/0097-7403.9.1.14
- Staddon, J. E. R., & Higa, J. J. (1999). Time and memory: Towards a pacemaker-free theory of interval timing. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior, 71*(2), 215–251. doi:10.1901/jeab.1999.71-215
- Stauffer, C. C., Haldemann, J., Troche, S. J., & Rammsayer, T. H. (2012). Auditory and visual temporal sensitivity: evidence for a hierarchical structure of modality-specific and modality-independent levels of temporal information processing. *Psychological Research, 76*(1), 20–31. doi:10.1007/s00426-011-0333-8
- Stocker, A. A., & Simoncelli, E. P. (2006). Noise characteristics and prior expectations in human visual speed perception. *Nature Neuroscience, 9*(4), 578–585. doi:10.1038/nn1669.
- Stott, L. H. (1935). Time-order errors in the discrimination of short tonal durations. *Journal of Experimental Psychology, 18*(6), 741–766. doi:10.1037/h0057714
- Survillo WW (1961) Frequency of the alpha rhythm, reaction time and age. *Nature, 191*(4790), 823–824. doi:10.1038/191823a0
- Survillo WW (1963) The relation of response-time variability to age and the influence of brain wave frequency. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 15*(6), 1029–1032. Doi:10.1016/0013-4694(63)90146-9
- Szelag, E., Kowalska, J., Rymarczyk, K., & Pöppel, E. (2002). Duration processing in children as determined by time reproduction: implications for a few seconds temporal window. *Acta Psychologica, 110*(1), 1–19. doi:10.1016/S0001-6918(01)
- Taatgen, N. A., Van Rijn, H., & Anderson, J. (2007). An integrated theory of prospective time interval estimation: The role of cognition, attention, and learning. *Psychological Review, 114*(3), 577–598. doi:10.1037/0033-295X.114.3.577
- Taatgen, N., & van Rijn, H. (2011). Traces of times past: Representations of temporal intervals in memory. *Memory & Cognition, 39*(8), 1546–1560. doi:10.3758/s13421-011-0113-0.
- Tau, G. Z., & Peterson, B. S. (2010). Normal development of brain circuits. *Neuropsychopharmacology, 35*(1), 147–168. doi:10.1038/npp.2009.115

- Thelen, E. (1981). Rhythmical behavior in infancy: An ethological perspective. *Developmental Psychology*, *17*(3), 237–257. doi:10.1037/0012-1649.17.3.237
- Thelen, E., & Fisher, D. M. (1982). Newborn stepping: An explanation for a "disappearing" reflex. *Developmental psychology*, *18*(5), 760–775. doi:10.1037/0012-1649.18.5.760
- Thomas, E. A. C., & Brown, J. I. (1974). Time perception and the filled-duration illusion. *Perception and Psychophysics*, *16*(3), 449–458. doi:10.3758/BF03198571
- Thomas, E. A., & Cantor, N. E. (1975). On the duality of simultaneous time and size perception. *Perception & Psychophysics*, *18*(1), 44–48. doi:10.3758/BF03199365
- Thomas, E. A., & Weaver, W. B. (1975). Cognitive processing and time perception. *Perception & Psychophysics*, *17*(4), 363–367. doi:10.3758/BF03199347
- Tizard, B., & Hughes, M. (2008). *Young children learning*. Oxford, UK : John Wiley & Sons.
- Tobin, S., Bisson, N., & Grondin, S. (2010). An ecological approach to prospective and retrospective timing of long durations: a study involving gamers. *PloS one*, *5*(2), e9271. doi:10.1371/journal.pone.0009271
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2002). All-or-none bottleneck versus capacity sharing accounts of the psychological refractory period phenomenon. *Psychological research*, *66*(4), 274–286. doi:10.1007/s00426-002-0101-x
- Toplak, M. E., Dockstader, C., & Tannock, R. (2006). Temporal information processing in ADHD: findings to date and new methods. *Journal of neuroscience methods*, *151*(1), 15–29. doi:10.1016/j.jneumeth.2005.09.018
- Towse, J. N., Hitch, G. J., & Horton, N. (2007). Working memory as the interface between processing and retention: A developmental perspective. *Advances in Child Development and Behavior*, *35*, 219–251. doi:10.1016/B978-0-12-009735-7.50011-6
- 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*(3), 228–242. doi:10.1006/nimg.2000.0535
- Tregellas, J. R., Davalos, D. B., & Rojas, D. C. (2006). Effect of task difficulty on the functional anatomy of temporal processing. *Neuroimage*, *32*(1), 307–315. doi:10.1016/j.neuroimage.2006.02.036
- Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the "internal clock". *Psychological Monographs: General and Applied*, *77*(13), 1–31. doi:10.1037/h0093864

- Treisman, M. (2013). The information-processing model of timing (Treisman, 1963): Its sources and further development. *Timing & Time Perception, 1*(2), 131–158. doi:10.1163/22134468-00002017
- 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. doi:10.1080/09541449208406242
- Truett, A., Hume, A. L., Wood, C. C., & Goff, W. R. L. (1984). Developmental and aging changes in somatosensory, auditory and visual evoked potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 58*(1), 14–24. doi:10.1016/0013-4694(84)90196-2
- Tse, P. U., Intriligator, J., Rivest, J., & Cavanagh, P. (2004). Attention and the subjective expansion of time. *Perception & psychophysics, 66*(7), 1171–1189. doi:10.3758/BF03196844
- Tsujimoto, S. (2008). The prefrontal cortex: Functional neural development during early childhood. *The Neuroscientist, 14*(4), 345–358. doi:10.1177/1073858408316002
- Tzourio, N., El Massioui, F., Crivello, F., Joliot, M., Renault, B., & Mazoyer, B. (1997). Functional anatomy of human auditory attention studied with PET. *Neuroimage, 5*(1), 63–77. doi:10.1006/nimg.1996.0252
- Ulbrich, P., Churan, J., Fink, M., & Wittmann, M. (2007). Temporal reproduction: Further evidence for two processes. *Acta Psychologica, 125*(1), 51–65. doi:10.1016/j.actpsy.2006.06.004
- Ulrich, R., Nitschke, J., & Rammsayer, T. (2006). Crossmodal temporal discrimination: Assessing the predictions of a general pacemaker-counter model. *Perception & Psychophysics, 68*(7), 1140–1152. doi:10.3758/BF03193716
- Underwood, G., & Swain, R. A. (1973). Selectivity of attention and the perception of duration. *Perception, 2*(1), 101–105. doi:10.1068/p020101
- Vallesi, A., McIntosh, A. R., Shallice, T., & Stuss, D. T. (2009). When time shapes behavior: fMRI evidence of brain correlates of temporal monitoring. *Journal of Cognitive Neuroscience, 21*(6), 1116–1126. doi:10.1162/jocn.2009.21098
- VanMarle, K., & Wynn, K. (2006). Six-month-old infants use analog magnitudes to represent duration. *Developmental science, 9*(5), 41–49. doi:10.1111/j.1467-7687.2006.00508.x
- van Rijn, H. (2016). Accounting for memory mechanisms in interval timing: A review. *Current Opinion in Behavioral Sciences, 8*, 245–249. doi:10.1016/j.cobeha. 2016.02.016.
- Van Rijn, H., & Taatgen, N. A. (2008). Timing of multiple overlapping intervals: How many clocks do we have?. *Acta Psychologica, 129*(3), 365–375. doi:10.1016/j.actpsy.2008.09.002

- Van Zomerén, A. H., & Brouwer, W. H. (1994). *Clinical neuropsychology of attention*. Oxford, UK : University Press.
- Vercillo, T., Pittelli, D., Cicchini, G. M., & Burr, D. (2012). Craniotopic adaptation-based changes to perceived event-duration are not accompanied by changes in perceived onset or offset of stimulus. *Perception ECVF abstract*, 41, 187-187.
- Vernon, P. A. (1987). *Speed of information-processing and intelligence*. Ablex Publishing.
- Verstynen, T., & Sabes, P. N. (2011). How each movement changes the next: An experimental and theoretical study of fast adaptive priors in reaching. *Journal of Neuroscience*, 31(27), 10050–10059. doi:10.1523/JNEUROSCI.6525-10.
- Vierordt, K. (1868). *Der Zeitsinn nach Versuchen*. Tübingen, Germany: H. Laupp.
- Vilares, I., & Körding, K. P. (2011). Bayesian models: the structure of the world, uncertainty, behavior, and the brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1224(1), 22–39. doi:10.1111/j.1749-6632.2011.05965.x
- Wackermann, J., & Ehm, W. (2006). The dual klepsydra model of internal time representation and time reproduction. *Journal of Theoretical Biology*, 239(4), 482–493. doi:10.1016/j.jtbi.2005.08.024
- Walker, J. T., & Scott, K. J. (1981). Auditory–visual conflicts in the perceived duration of lights, tones, and gaps. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7(6), 1327–1339. doi:10.1037/0096-1523.7.6.1327
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: Common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 483–488. doi:10.1016/j.tics.2003.09.002
- Wang, B., Low, J., Jing, Z., & Qinghua, Q. (2012). Chinese preschoolers' implicit and explicit false-belief understanding. *British Journal of Developmental Psychology*, 30, 123–140. doi:10.1111/j.2044-835X.2011.02052.x
- Wearden, J. (2016). *The psychology of time perception*. Springer.
- Wearden, J. H. (1991). Human performance on an analogue of an interval bisection task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section B*, 43(1b), 59–81. doi:10.1080/14640749108401259
- Wearden, J. H. (1993). Decisions and memories in human timing. *Psychologica Belgica*, 33(2), 241–511.
- Wearden, J. H., & Bray, S. (2001). Scalar timing without reference memory? Episodic temporal generalization and bisection in humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section B*, 54(4b), 289–309. doi:10.1080/713932763

- Wearden, J. H., & Doherty, M. F. (1995). Exploring and developing a connectionist model of animal timing: Peak procedure and fixed-interval simulations. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *21*(2), 99–115. doi:10.1037/0097-7403.21.2.99
- Wearden, J. H., Edwards, H., Fakhri, M., & Percival, A. (1998). Why sounds are judged longer than lights: Application of a model of the internal clock in humans. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *51*(2), 97–120 doi:10.1080/713932672
- Wearden, J. H., & Ferrara, A. (1995). Stimulus spacing effects in temporal bisection by humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *48*(4), 289–310. doi:10.1080/14640749508401454
- Wearden, J., & Lejeune, H. (1993). Across the Great Divide: Animal psychology and time in humans. *Time & Society*, *2*(1), 87–106. doi:10.1177/0961463X93002001007
- Wearden, J. H., & Lejeune, H. (2008). Scalar properties in human timing: conformity and violations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *61*(4), 569–587. doi:10.1080/17470210701282576
- Wearden, J. H., & McShane, B. (1988). Interval production as an analogue of the peak procedure: Evidence for similarity of human and animal timing processes. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *40*(4), 363–375. doi:10.1080/14640748808402330
- Wearden, J. H., Norton, R., Martin, S., & Montford-Bebb, O. (2007). Internal clock processes and the filled-duration illusion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *33*(3), 716–729. doi:10.1037/0096-1523.33.3.716
- Wearden, J. H., & Penton-Voak, I. S. (1995). Feeling the heat: Body temperature and the rate of subjective time, revisited. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section B*, *48*(2b), 129–141. doi:10.1080/14640749508401443
- Wearden, J. H., Todd, N., & Jones, L. (2006). When do auditory-visual difference in duration judgment occur. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *59*(10), 1709–1724. doi:10.1080/17470210500314729
- Wearden, J. H., Wearden, A. J., & Rabbitt, P. M. (1997). Age and IQ effects on stimulus and response timing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *23*(4), 962–979. doi:10.1037/0096-1523.23.4.962
- Wechsler, D. (1998). *WAIS III and WMS-III manual*. San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Wechsler, D. (2005). *Wechsler individual achievement test-second edition (WIAT II)*. London: Psychological Corporation.

- Weisberg, P. (1970). Effects of reinforcement history on timing (DRL) performance in young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 9(3), 348–362. doi:10.1016/0022-0965(70)90023-8
- Weisberg, P., & Tragakis, C. J. (1967). Analyses of DRL behavior in young children. *Psychological reports*, 21(3), 709–715. doi:10.2466/pr0.1967.21.3.709
- Wellman, H. M. (2002). Understanding the psychological world: Developing a theory of mind. In U. Goswami (Ed.), *Blackwell handbook of childhood cognitive development* (pp. 167–187). Oxford, UK : Blackwell. doi:10.1002/9780470996652.ch8
- Wellman, H. M., Cross, D., & Watson, J. (2001). Meta-analysis of theory of mind development: The truth about false belief. *Child Development*, 72(3), 655–684. doi:10.1111/1467-8624.00304
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 159–177. doi:10.1080/14639220210123806
- Weiner, H. (1962). Some effects of response cost upon human operant behavior. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 5(2), 201–208. doi:10.1901/jeab.1962.5-201
- Weiner, H. (1964). Conditioning history and human fixed-interval performance. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 7(5), 383–385. doi:10.1901/jeab.1964.7-383
- Weiner, H. (1964). Conditioning history and human fixed-interval performance. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 7, 383–385.
- Werbos, P. J. (1988). Generalization of backpropagation with application to a recurrent gas market model. *Neural networks*, 1(4), 339–356. doi:10.1016/0893-6080(88)90007-X
- Wickens, C. D. (1980). The structure of attentional resources. *Attention and performance VIII*, 8, 239–257.
- Wilkening, F., Levin, I., & Druyan, S. (1987). Children's counting strategies for time quantification and integration. *Developmental Psychology*, 23(6), 823–831. doi:10.1037/0012-1649.23.6.823
- Williams, R. J. Gradient-Based Learning Algorithms for Recurrent Networks and Their Computational Complexity. *Neural Networks*, 6, 627–648. Repéré à : <https://pdfs.semanticscholar.org/10da/e7fca6b65b61d155a622f0c6ca2bc3922251.pdf>
- Williamson, L. L., Cheng, R. K., Etcheagaray, M., & Meck, W. H. (2008). “Speed” warps time: Methamphetamine's interactive roles in drug abuse, habit formation, and the biological clock of circadian and interval timing. *Current Drug Abuse Reviews*, 1(2), 203–212. doi:10.2174/1874473710801020203

- Wimmer, H., & Perner, J. (1983). Beliefs about beliefs: Representation and constraining function of wrong beliefs in young children's understanding of deception. *Cognition*, *13*(1), 103–128. doi:10.1016/0010-0277(83)90004-5
- Wing, A. M. (2002). Voluntary timing and brain function: an information processing approach. *Brain and cognition*, *48*(1), 7–30. doi:10.1006/brcg.2001.1301
- Witherspoon, D., & Allan, L. G. (1985). The effect of a prior presentation on temporal judgments in a perceptual identification task. *Memory & Cognition*, *13*(2), 101–111. doi:10.3758/BF03197003
- Wittmann, M. (2013). The inner sense of time: How the brain creates a representation of duration. *Nature Reviews Neuroscience*, *14*(3), 217–223. doi:10.1038/nrn3452
- Wittmann, M., & Paulus, M. P. (2008). Decision making, impulsivity and time perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *12*(1), 7–12. doi:10.1016/j.tics.2007.10.004
- Wolff, P. H. (1991). Endogenous motor rhythms in young infants. In A. E. Patla (Ed.), *Advances in psychology* (Vol. 81, pp. 119–133). Amsterdam, Netherlands : North-Holland publishers. doi:10.1016/S0166-4115(08)60762-1
- Wolpert, D. M. (2007). Probabilistic models in human sensorimotor control. *Human movement science*, *26*(4), 511–524. doi:10.1016/j.humov.2007.05.005
- Woodrow, H. (1935). The effect of practice upon time-order errors in the comparison of temporal intervals. *Psychological Review*, *42*(2), 127–152. doi:10.1037/h0063696
- Xu, S., & David, P. (2018). Distortions in time perceptions during task switching. *Computers in Human Behavior*, *80*, 362–369. doi:10.1016/j.chb.2017.11.032
- Zakay, D. (1989). Subjective time and attentional resource allocation: An integrated model of time estimation. In G. de Soete, H. Feger. & K. Klauer (Eds.), *Advances in psychology* (Vol. 59, pp. 365–397). Amsterdam, Netherlands : North- Holland publishers. doi:10.1016/S0166-4115(08)61047-X
- Zakay, D. (1992). The role of attention in children's time perception. *Journal of Experimental Child Psychology*, *54*(3), 355–371. doi:10.1016/0022-0965(92)90025-2
- Zakay, D. (1993). Relative and absolute duration judgments under prospective and retrospective paradigms. *Perception & Psychophysics*, *54*(5), 656–664. doi:10.3758/BF03211789
- Zakay, D. (2000). Gating or switching? Gating is a better model of prospective timing (a response to 'switching or gating?' by Lejeune) 1. *Behavioural processes*, *52*(2–3), 63–69. doi:10.1016/S0376-6357(00)00141-8

- Zakay, D., & Block, R. A. (1994). An attentional-gate model of prospective time estimation. In M. Richelle, V. De Keyser, G. D'Ydewalle, & A. Vandierendonck (Eds.), *Time and the dynamic control of behaviour* (pp. 167–178). Liège, Belgique : Pôle d'attraction Interuniversitaire.
- Zakay, D., & Block, R. A. (1996). The role of attention in time estimation processes. In M. A. Pastor & J. Artieda (Eds.), *Time, internal clocks and movement* (pp. 143–164). Amsterdam, Netherlands : North-Holland publishers.
- Zakay, D., & Block, R. A. (1997). Temporal cognition. *Current directions in psychological science*, 6(1), 12–16. doi:10.1111/1467-8721.ep11512604
- Zakay, D., & Block, R. A. (1998). New perspective on prospective time estimation. In V. De Keyser, G. d'Ydewalle, & A. Vandierendonck (Eds.), *Time and the dynamic control of behavior* (pp. 129–141). Ashland, OH, US: Hogrefe & Huber Publishers.
- Zakay, D., & Block, R. A. (2004). Prospective and retrospective duration judgments: an executive-control perspective. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64(3), 319–328. Elsevier. Repéré à
- Zakay, D., & Fallach, E. (1984). Immediate and remote time estimation—a comparison. *Acta Psychologica*, 57(1), 69– 81. doi:10.1016/0001-6918(84)90054-4
- Zakay, D., & Tsal, Y. (1989). Awareness of attention allocation and time estimation accuracy. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 27(3), 209–210. doi:10.3758/BF03334586
- Zeiler, M. D., & Kelley, C. A. (1969). Fixed-ratio and fixed-interval schedules of cartoon presentation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 8(2), 306–313. doi:10.1016/0022-0965(69)90105-2
- Zélanti, P. & Droit-Volet, S. (2011). Cognitive abilities explaining age-related changes in time perception of short and long durations. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109(2), 143–157. doi:10.1016/j.jecp.2011.01.003
- Zélanti, P. S., & Droit-Volet, S. (2012). Auditory and visual differences in time perception? An investigation from a developmental perspective with neuropsychological tests. *Journal of Experimental Child Psychology*, 112(3), 296–311. doi:10.1016/j.jecp.2012.01.003