



HAL
open science

Régulation rythmique avant 4 ans : effet d'un tempo auditif sur le tempo moteur

Anne Bobin-Bègue, Joëlle Provasi

► **To cite this version:**

Anne Bobin-Bègue, Joëlle Provasi. Régulation rythmique avant 4 ans : effet d'un tempo auditif sur le tempo moteur. *L'Année psychologique*, 2008, 108 (04), pp.631. 10.4074/S000350330800403X . hal-02887838

HAL Id: hal-02887838

<https://hal.science/hal-02887838v1>

Submitted on 2 Jul 2020

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.

Régulation rythmique avant 4 ans : effet d'un tempo auditif sur le tempo moteur

Anne Bobin-Bègue* et Joëlle Provasi
Laboratoire Développement et Complexité, EPHE, Paris

RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est d'analyser les capacités de l'enfant âgé de 1½ à 3½ ans à modifier son tempo moteur spontané (TMS) en fonction de tempi auditifs. Les résultats montrent que le TMS reste constant entre 1½ et 3½ ans et que, parallèlement, il devient plus régulier. Les enfants les plus âgés modifient leurs rythmes de frappes si le tempo auditif diffère d'au moins 20 % de leurs propres rythmes. La capacité des enfants à ralentir leurs rythmes de frappes se met en place plus tardivement que leur accélération. Enfin, les modifications du rythme de frappes induisent une modification équivalente du TMS mais transitoire.

Rhythmic regulation before 4 years : Effect of an auditory tempo on motor tempo.

ABSTRACT

The goal of this study is to analyze the 1½ to 3½ year children capacity to modify their spontaneous motor tempo (SMT) in function of auditory tempi. Results showed that between 1½ and 3½ years, the SMT remains constant but it becomes more regular. The oldest children are able to modify their tapping rhythms as soon as the external stimulations are over 20 % different from their own SMT. But, as expected with such young children, tapping faster is easier than tapping slower. Finally, modifying the tapping rhythms induces a transitory modification in the SMT. All the results were discussed with reference to relevant models.

Les nouveau-nés sont capables de produire des intervalles de temps très réguliers, en l'absence de tout repère temporel externe. Spontanément, ils produisent des activités rythmiques telles que la succion ou le pédalage (Pouthas, Provasi & Droit, 1996 ; Thelen, 1979). Plus généralement, tout individu est capable de produire un tempo dont la valeur lui est propre, sans aucun indice temporel extérieur (Fraisse, 1974). Ce

* Correspondance : Anne Bobin-Bègue, Laboratoire Développement et Complexité, EPHE, 41, rue Gay-Lussac 75005 Paris, FRANCE. E-mail : anne.begue@gmail.com

Remerciements : les auteurs souhaitent vivement remercier le personnel et les enfants de la crèche Fontenelle (Marly le Roi, France) et de l'école maternelle St Jacques (Paris, France) sans qui cette étude n'aurait pu être menée.

tempo est appelé tempo moteur spontané (TMS). Les caractéristiques du TMS ont été bien étudiées chez l'adulte : sa valeur moyenne est de 600 ms, mais varie beaucoup d'un individu à l'autre, entre 300 ms et 800 ms (Boltz, 1994 ; Drake, Jones & Baruch, 2000 ; Fraise, 1974 ; Gérard & Rosenfeld, 1995 ; Moussay, Dosseville, Gauthier, Larue, Sesboüe & Davenne, 2002). Chez l'enfant et notamment chez le jeune enfant, les caractéristiques du TMS ne sont pas bien déterminées comme nous allons le voir ultérieurement.

Selon le modèle développemental de Drake, Jones et Baruch (2000), le TMS serait une expression motrice représentative d'une valeur propre à chaque individu appelée « période de référence ». La période de référence permet d'expliquer comment nous percevons dynamiquement les séquences rythmiques de notre environnement (Théorie de l'Attention Dynamique, Jones, 1976 ; Jones & Boltz, 1989) ; notre attention se focalise spontanément sur les événements se produisant à une période proche de notre période de référence. Dans ce contexte théorique, plusieurs hypothèses ont été proposées. La première est que, comme le TMS, la période de référence subirait un ralentissement avec l'âge. La seconde est que le traitement des informations temporelles est d'autant plus précis que les intervalles à traiter sont proches de cette période de référence et donc proche du TMS puisqu'il serait son expression motrice. Ces 2 principales hypothèses ont été vérifiées expérimentalement chez l'adulte. D'un point de vue développemental, ces hypothèses ne sont pas encore validées chez l'enfant de moins de 4 ans, en raison du faible nombre des données et de résultats contradictoires. Nous avons donc mis au point un protocole expérimental adapté aux jeunes enfants afin d'apporter de nouvelles données permettant de répondre aux objectifs suivants.

Le premier objectif de cette étude a été de déterminer la valeur et la régularité de la période de référence au moyen du TMS chez le jeune enfant. Les quelques résultats expérimentaux obtenus chez les enfants de moins de 6 ans suggèrent que leur TMS est plus rapide que celui de l'adulte (Drake *et al.*, 2000 ; Jacquet, Gérard & Pouthas, 1994 ; Provasi & Bobin-Bègue, 2003 ; McAuley, Jones, Holub, Johnston & Miller, 2006) : il est de 430 ms à 2½ et à 4 ans (Provasi & Bobin-Bègue, 2003) ; entre 4 et 10 ans, il se situe entre 350 ms et 550 ms, selon les auteurs (Drake *et al.*, 2000 ; Fraise, Chambron, & Oléron, 1954 ; Jacquet *et al.*, 1994 ; Provasi & Bobin-Bègue, 2003 ; McAuley *et al.*, 2006). Chez les adultes de 25 et 70 ans, le TMS augmente de 536 ms à 747 ms (Vanneste, Pouthas & Wearden, 2001 ; voir aussi Baudouin, Vanneste & Isingrini, 2004 ; McAuley *et al.*, 2006). L'ensemble de ces résultats suggère que le TMS ralentit de la naissance à la sénescence. Pour tester cette hypothèse

du ralentissement du TMS tout au long de la vie, il est nécessaire de déterminer sa valeur plus précisément avant 4 ans. Notre étude vise à déterminer sa valeur entre 1½ ans et 3½ ans. Compte-tenu des données précédemment mentionnées, nous faisons l'hypothèse que nous observerons un TMS moyen à 430 ms avec des valeurs faibles à 1½ ans et plus élevées à 3½ ans.

L'autre caractéristique du TMS est que, chez l'adulte, sa valeur est très variable d'un individu à l'autre i.e. comprise entre 300 et 800 ms (Fraisse, 1974). Chez l'enfant, la variabilité inter-individuelle du TMS augmente entre 4 et 10 ans (Drake *et al.*, 2000) ; entre 2½ et 4 ans, la variabilité inter-individuelle est comprise entre 380 et 480 ms, ce qui est moins important que chez l'adulte (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Ces données suggèrent que la variabilité inter-individuelle du TMS augmente avec l'âge. Si cette hypothèse se vérifie, cela signifierait que la valeur de la période de référence varie peu d'un individu à l'autre à la naissance, et qu'une plus grande variabilité inter-individuelle apparaît au cours du développement.

La régularité du TMS (régularité des frappes pour chaque individu appelée aussi variabilité intra-individuelle) est aussi une variable à prendre en considération. À 2½ ans, le TMS est plus variable qu'à 4 ans (Provasi & Bobin-Bègue, 2003) et sa régularité augmente à partir de 4 ans (Drake *et al.*, 2000 ; McAuley *et al.*, 2006). Ces données suggèrent que le TMS augmente en régularité avec l'âge et nos données devraient permettre de confirmer cette hypothèse. La régularité du TMS reflète celle de la période de référence. Il existerait un processeur temporel qui serait spécifiquement dévolu au traitement de l'information temporelle (Lejeune & Macar, 1994). Si ce processeur temporel repose sur une période de référence stable, alors il est vraisemblable qu'il acquiert une plus grande précision.

La précision du traitement temporel est liée à la valeur du TMS puisqu'il a été montré que le traitement est plus précis lorsque le tempo auditif est proche de la valeur du TMS (Drake *et al.*, 2000). Un tempo est une séquence isochrone d'événements et est caractérisé par son intervalle inter-stimulations (ISI pour Inter-Stimulations Interval). Les tempi sont traités plus facilement qu'un intervalle unique (Drake & Botte, 1993 ; Miller & McAuley, 2005) et la durée des intervalles vides est perçue plus précisément que celle d'intervalles pleins (Grondin, 1993 ; Grondin, Meilleur-Wells, Oulette & Macar, 1998 ; Tse & Penney, 2006) ; enfin, les durées des sons sont perçues plus précisément que les mêmes durées de stimulation dans d'autres modalités sensorielles (Grondin, 1993 ; Grondin *et al.*, 1998 ; Penney & Tourret, 2005). Ainsi, les tempi auditifs

sont les stimulations privilégiées pour étudier le traitement temporel des durées courtes. De plus, ces stimulations sont particulièrement adaptées aux études chez le jeune enfant pour lesquels les tâches et les instructions doivent être particulièrement simples.

La précision du traitement temporel est déterminée par les seuils de discrimination de tempi. Ce seuil est la limite en dessous de laquelle 2 tempi différents sont perçus comme identiques : leurs ISI sont trop proches pour être traités différemment. Selon les résultats de Drake *et al.* (2000), les seuils de discrimination décrivent une parabole en fonction des tempi testés. Chez l'adulte, le minimum de cette fonction correspond au seuil de 3 %, obtenu pour des tempi proches de la valeur du TMS. Un adulte est capable de discriminer un tempo de 600 ms d'un tempo de 580 ms. Ce seuil augmente lorsque les tempi testés s'éloignent du TMS. Chez l'enfant, le seuil de discrimination optimal devrait donc être observé pour des tempi plus rapides que chez l'adulte, dans l'hypothèse d'un ralentissement du TMS avec l'âge. À notre connaissance, une seule étude a évalué le seuil de discrimination de tempi avant 4 ans ; il est situé entre 10 % et 20 % à 600 ms, pour des enfants entre 3 et 4 ans (Bobin-Bègue & Provasi, 2005). Si le TMS ralentit avec l'âge et que le seuil optimal est observé pour des tempi à discriminer proche du TMS, alors cette valeur de seuil n'est pas la valeur optimale. Le seuil optimal devrait donc être observé pour des tempi proches de 430 ms et serait donc inférieur à 20 %. Les autres études menées chez l'enfant et utilisant une procédure de discrimination n'ont testé qu'une différence de 15 % entre un tempo de référence et un tempo variable. Les résultats de ces études divergent (Baruch & Drake, 1997 ; Bobin-Bègue & Provasi, 2005 ; Drake & Baruch, 1995). Ils ne concordent pas tous avec l'hypothèse selon laquelle les meilleures performances devraient être obtenues pour des tempi plus rapides que 600 ms.

Le faible nombre d'études concernant la discrimination de tempi chez l'enfant est lié aux difficultés méthodologiques. Chez l'adulte, les seuils sont déterminés par des tâches perceptives simples mais longues, répétitives et nécessitant des notions de temps explicites. Ces tâches, qui permettent d'obtenir des résultats précis, ne sont pas adaptées aux jeunes enfants. Les tâches de production sont plus adaptées à ces âges parce qu'elles ne requièrent pas explicitement de notion de temps et sont plus ludiques. Les tâches de production impliquent une étape de perception ; ainsi, modifier son rythme de frappes en fonction de tempi auditifs suppose que ces tempi auditifs soient discriminés. La revue de la littérature montre que les enfants de 4 ans sont capables de modifier leur rythme de frappes pour se synchroniser à un tempo cible de 600 ms ; par

contre, ils ne sont pas capables de le faire lorsque le tempo cible est de 400 ms (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Dans cette expérience, le TMS moyen des enfants était de 430 ms, signifiant que ces enfants étaient capables de modifier leur rythme de frappes de 40 % (430 ms vs. 600 ms) mais pas de 7 % (430 ms vs. 400 ms). Le seuil de discrimination serait donc supérieur à 7 % (et inférieur à 40 %) ; il serait donc plus élevé chez le jeune enfant que chez l'adulte (environ 3 %). Il est probable que la valeur du seuil soit environ 15 % (Bobin-Bègue & Provasi, 2005). Pour vérifier cette valeur, nous avons proposé aux enfants une tâche de production qui nous permette de déterminer la valeur de ce seuil, à 5 % près. Nous faisons l'hypothèse que si l'enfant est capable de modifier son rythme de frappes en fonction d'un tempo auditif, alors le processeur temporel est capable d'identifier ce tempo auditif comme étant différent de son rythme de frappes initial. La tâche consiste donc pour le participant à synchroniser son rythme de frappes avec un tempo auditif de plus en plus différent de son TMS au cours des essais. La variation de tempo à partir de laquelle nous observerons une modification du rythme de frappes sera une bonne estimation du seuil de discrimination. Le 2^e objectif de cette étude sera donc de déterminer quelle variation du tempo auditif induira une modification du rythme de frappes et si cette valeur dépend de l'âge de l'enfant.

Lorsque l'enfant doit produire une tâche temporelle, les stimulations externes perçues interagissent avec le fonctionnement du mécanisme de traitement. En l'absence de tempo auditif, après une tâche de synchronisation et sans aucune instruction, il a été observé que l'enfant de plus de 2 ans conserve un rythme de frappes différent de son TMS initial (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Ce type de résultats, observés chez l'adulte (Treisman & Brogan, 1992 ; Treisman, Faulkner, Naish & Brogan, 1990), suggère une modification de la période de référence. Le 3^e objectif de notre étude a donc été de vérifier l'hypothèse selon laquelle la modification de la période de référence est observable à chaque fois que l'enfant modifie son rythme de frappes. Nous avons donc ajouté une phase de TMS à la fin de la procédure pour comparer sa valeur à celle du TMS initial.

Le 4^e et dernier objectif de cette étude est de savoir si les performances du traitement temporel sont les mêmes que les tempi soient plus rapides ou plus lents que le TMS. Dans la majorité des études, les participants doivent discriminer un tempo standard d'un tempo plus rapide, que ce soit chez l'adulte ou chez l'enfant (Drake & Baruch, 1995 ; Drake & Botte, 1993). Or, il a été montré, par exemple que les bébés discriminent un tempo 15 % plus rapide que le standard mais pas l'inverse (un tempo

15 % plus lent que le standard ; Baruch & Drake, 1997). De la même manière, les nouveau-nés sont capables d'accélérer leur rythme de succion en présence de stimulations auditives, mais sont incapables de le ralentir (Bobin-Bègue, Provasi, Marks & Pouthas, 2006). Cette dissymétrie se retrouve aussi dans les interactions sociales : les jeunes enfants parviennent à accélérer leur rythme de jeux avec leurs parents, mais ils s'arrêtent lorsque leurs parents ralentissent le rythme des interactions (Condon & Sanders, 1974). Ces résultats justifient de tester des tempi plus rapides que le TMS de l'enfant. Même s'il semble plus facile de produire des comportements plus rapides que son propre rythme, il existe une limite biomécanique dont il faut tenir compte dans l'interprétation des données ; chez des enfants de plus de 4 ans, il a été montré que plus l'enfant est jeune, plus son rythme de frappes maximum (c'est-à-dire le plus rapide) est proche de TMS (Drake *et al.*, 2000).

La littérature est moins abondante en ce qui concerne les tempi auditifs plus lents que le TMS. Entre 6 et 10 ans, les enfants préfèrent toujours écouter les tempi les plus rapides d'une paire pris dans une gamme de 100 à 1 500 ms (Baruch, Panissal-Vieu & Drake, 2004). D'un point de vue moteur, il est généralement observé que ralentir un comportement, c'est-à-dire l'inhiber, est plus difficile à obtenir chez les enfants que de l'accélérer ; par exemple, lors d'interactions sociales, les bébés sont capables d'accélérer leurs interactions avec leurs parents, mais se mettent à pleurer si ceux-ci ralentissent les interactions (Condon & Sanders, 1974). De la même manière, chez les bébés de 2 mois, il faut une longue séance d'apprentissage pour obtenir un ralentissement de l'activité de succion (Pouthas, Provasi & Droit, 1996 ; Provasi, 1988). Une étude a cependant montré qu'à partir de 4 ans, les enfants sont capables de ralentir leur rythme de frappes lorsqu'ils doivent se synchroniser avec des tempi de 600 ms ou 800 ms (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Cette difficulté à inhiber un comportement explique une partie des résultats obtenus dans des tâches de production, mais pas ceux obtenus pour des tâches de perception (les bébés ne discriminant pas un tempo plus lent que le standard, Baruch & Drake, 1997). Ces résultats soulignent l'importance de considérer les tempi plus lents que le rythme propre du participant différemment des tempi plus rapides. En testant par la même procédure ces 2 types de variation, notre étude doit permettre de vérifier l'hypothèse selon laquelle il existe une différence développementale dans le traitement des tempi selon qu'ils soient plus rapides ou plus lents que le TMS.

Notre étude a donc concerné 3 groupes d'âge (1½, 2½ et 3½ ans) et s'est décomposée en 2 séances (accélération et décélération), chaque séance comportant chacune 3 phases (TMS1, Synchronisation, TMS2).

Pour chaque séance, la 1^{re} phase (TMS1) enregistrerait la valeur initiale du TMS. Cette valeur a permis de caractériser le TMS ; elle a aussi servi de valeur de référence pour chaque participant. La 2^{ème} phase était une phase de synchronisation avec un tempo auditif dont le tempo était modifié progressivement au cours des essais. Cette phase a été conçue pour déterminer la variation de tempo à partir de laquelle l'enfant était capable de modifier son rythme de frappes. Pendant la séance d'accélération, les tempi devenaient de plus en plus rapides par rapport au TMS de l'enfant. Inversement, pendant la phase de décélération, les tempi devenaient de plus en plus lents. L'objectif de la 3^e phase (TMS2) était de mesurer l'influence des tempi auditifs sur le TMS.

Comme nous l'avons déjà mentionné, nous faisons l'hypothèse que, à ces âges, le TMS serait autour de 430 ms, avec une faible variabilité inter-individuelle, celle-ci augmentant avec l'âge. Nous pensons aussi observer une augmentation de la régularité du TMS avec l'âge. De la même manière, concernant le seuil de traitement (phase de synchronisation), les données de la littérature nous permettent de penser que les participants les plus âgés seront capables de modifier leur rythme de frappes dès que les tempi varieront de plus de 15 % par rapport à leur TMS. Le rythme de frappes devrait être modifié plus significativement pour la tâche d'accélération que pour celle de décélération. Une différence développementale devrait être observée aussi bien pour la séance accélération que pour celle de décélération. Enfin, si les enfants sont capables de modifier leur rythme de frappes pendant la phase de synchronisation (quelle que soit la séance), alors le TMS devrait être différent de celui mesuré initialement.

MÉTHODE

Participants

85 enfants ont participé à l'expérience : 23 enfants de 1½ ans (14 filles et 9 garçons ; âge moyen : 1 an et 7 mois, SD : 1 mois, écart : 1 an 5 mois-1 an 9 mois), 26 enfants de 2½ ans (11 filles et 15 garçons ; âge moyen : 2 ans et 4 mois, SD : 2 mois, écart : 2 ans 1 mois-2 ans 7 mois) et 36 enfants de 3½ ans (15 filles et 21 garçons ; âge moyen : 3 ans et 6 mois, SD : 2,5 mois, écart : 2 ans 11 mois-3 ans 11 mois).

20 autres enfants ont été exclus de l'échantillon final en raison de leur manque de participation. Les enfants de 3½ ans ont été recrutés dans une école maternelle (Paris, France). Les enfants des 2 autres groupes d'âge ont été recrutés dans une crèche municipale (Marly le Roi, France). Les parents des enfants ont préalablement été informés de la procédure et ont ensuite donné leur consentement par écrit.

Matériel et stimuli

L'expérience se déroulait à l'écart des autres enfants et de leurs activités. L'enfant, seul avec l'expérimentateur, était placé devant un écran d'ordinateur 14 pouces (relié à son unité centrale). Cet écran était incliné en arrière (30° par rapport à sa position normale verticale) dans un support en bois de manière à être visible et accessible à l'enfant. Une plaque transparente de Plexiglas recouvrait totalement l'écran. Elle était calée par le support en bois et reposait sur des coins de caoutchouc. Un capteur de pression était fixé sous cette plaque, en bas de l'écran, afin de détecter les frappes sur la plaque de Plexiglas (les caoutchoucs évitant les rebonds). Le capteur transmettait le temps (t) de chaque frappe avec une précision de l'ordre de la milliseconde. Le capteur détectait aussi bien les frappes très légères que les frappes fortes ; cependant, l'enfant ne devait se servir que d'une main, du côté de son choix et de la façon qu'il souhaitait (main à plat, bout des doigts ou poing fermé).

Un programme délivrait des stimulus auditifs et visuels selon les phases expérimentales et en fonction des frappes. Les stimulus auditifs étaient des sons de 100 ms, représentatifs du cri d'un animal. Les stimulus visuels, utilisés comme renforcement, étaient des images (15 × 15 cm) de l'animal correspondant au stimulus auditif. Neuf animaux différents ont été utilisés (abeille, canard chiot, grenouille, oisillons, phoque, poule, singe, tourterelle). Le même animal (son et image) était utilisé au cours d'un essai (30 stimulations successives). L'animal variait d'un essai à l'autre (14 essais minimum).

Procédure

L'expérience comportait 2 séances : une séance « Accélération » et une séance « Décélération ». Chaque enfant a participé aux 2 séances qui n'avaient pas lieu le même jour (écart moyen entre les 2 séances : 2,54 jours – SD : 2,37). L'ordre des séances a été contrebalancé entre les participants. Chaque séance était divisée en 3 phases, nommées « TMS1 », « Synchronisation » et « TMS2 ». Chaque phase comptait un nombre défini d'essais. Un essai correspondait à l'enregistrement de 30 frappes successives. Pendant les phases de TMS1 et TMS2, chaque frappe faisait apparaître l'image de l'animal simultanément à son cri. Pendant la phase de synchronisation, le son était diffusé à un certain ISI. Si la frappe de l'enfant intervenait dans la fenêtre temporelle définie pour le renforcement, alors l'image s'affichait de façon synchronisée avec le son.

La Figure 1 représente l'occurrence du renforcement. La fenêtre temporelle pour le renforcement était définie comme suit : elle débutait avant le début du son, pendant un délai représentant 15 % de l'ISI et s'achevait à la fin de la diffusion du son. Cette fenêtre temporelle incluait donc les frappes anticipées, normales lors d'une bonne synchronisation (Gérard & Rosenfeld, 1995) et les frappes synchronisées, arrivant pendant la diffusion du son. Si la frappe intervenait pendant la période d'anticipation, alors, l'image apparaissait de façon synchrone au son (et donc après la frappe) ; par contre, si la frappe se produisait pendant le son, l'image apparaissait instantanément et disparaissait à la fin du son

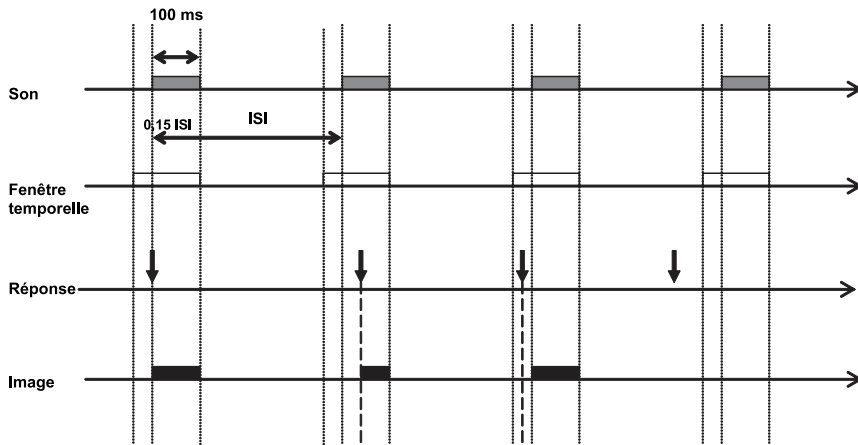


Figure 1. Protocole.

Figure 1. Protocol.

(elle apparaissait donc pour une durée inférieure ou égale à 100 ms). Toutes les frappes produites en dehors de cette fenêtre n'étaient pas renforcées.

Les consignes verbales étant comprises différemment à 1½ et 3½ ans, nous avons choisi d'utiliser une procédure de renforcement car elle ne nécessite qu'un minimum d'instructions verbales. Les procédures de renforcement s'avèrent efficaces dans le cadre d'une tâche temporelle chez le jeune enfant (Darcheville, Rivière & Wearden, 1992 ; Pouthas, 1995 ; Pouthas & Jacquet, 1983 ; Provasi & Bobin-Bègue, 2003) mais aussi chez le bébé (Darcheville, Rivière & Wearden, 1993). Pour limiter au maximum les instructions verbales, l'expérimentateur faisait une démonstration devant l'enfant au début de chaque séance¹. Les seules instructions verbales ont donc été données au début de la séance : « regarde l'écran, je vais te montrer comment jouer ». L'adulte effectuait alors, selon son propre rythme et le plus régulièrement possible, 20 frappes dont chacune faisait apparaître de façon synchrone l'image et le son d'un animal (démonstration équivalente aux phases de TMS). Le nombre de frappes a été choisi de façon à obtenir un rythme stable avec peu de variabilité intra-individuelle tout en palliant à l'impatience de l'enfant. Après la démonstration, l'instruction était : « maintenant, à toi de jouer ».

¹ La démonstration est en effet plus informative que les instructions verbales chez l'enfant : il a été montré que l'enfant imitait la structure générale de l'action et non pas ses détails : les paramètres comme l'amplitude du mouvement, la force, la vitesse et la position de la main sont propres à la personne qui effectue le geste et ne sont pas imités par l'enfant (Byrne & Russon, 1998)

Tableau I. Détails de la procédure expérimentale**Table I.** Experimental design

PHASE		CONDITIONS		
		Nombre de frappes	Condition du renforcement	Valeur des ISI (phase de synchronisation)
Démonstration :	Essai	20 frappes	Toutes les frappes	
TMS 1	Essai	30 frappes	Toutes les frappes	
Calcul du TMS de l'enfant (à partir du dernier essai de la phase de TMS1)				
Synchronisation	Essai 1	30 sons	Frappes synchronisées seulement	TMS \pm 0 %
	Essai 2	30 sons	Frappes synchronisées seulement	TMS \pm 5 %
	Essai 3	30 sons	Frappes synchronisées seulement	TMS \pm 10 %
	Essai 4	30 sons	Frappes synchronisées seulement	TMS \pm 15 %
	Essai 5	30 sons	Frappes synchronisées seulement	TMS \pm 20 %
	Essai 6	30 sons	Frappes synchronisées seulement	TMS \pm 25 %
	Essai 7	30 sons	Frappes synchronisées seulement	TMS \pm 30 %
	Essai 8	30 sons	Frappes synchronisées seulement	TMS \pm 35 %
	Essai 9	30 sons	Frappes synchronisées seulement	TMS \pm 40 %
	Essai 10	30 sons	Frappes synchronisées seulement	TMS \pm 45 %
	Essai 11	30 sons	Frappes synchronisées seulement	TMS \pm 50 %
TMS 2	Essai	30 frappes	Toutes les frappes	-

L'enchaînement des phases et des essais était déterminé par l'expérimentateur, à la convenance de l'enfant, assurant ainsi un niveau minimum d'attention stable tout au long de l'expérience. La séance durait ainsi moins de 15 minutes.

Chaque séance suivait la procédure illustrée dans le Tableau I. La 1^{re} phase (TMS1) était constituée de 4 essais maximum pour obtenir des frappes suffisamment régulières (4 essais étaient souvent nécessaires chez les enfants de 1½ ans). Le dernier essai servait à déterminer le TMS de l'enfant (par le calcul de la médiane des IRI).

La phase de synchronisation était constituée de 11 essais successifs, au cours desquels la valeur des ISI était modifiée. Pour les 2 séances, les ISI du 1^{er} essai de synchronisation correspondaient au TMS de l'enfant (soit 0 % de variation). Les IRI des essais suivant variaient par incrément de 5 % : pour la séance « Accélération », la valeur des ISI diminuait de 0 % à 50 % au cours des 11 essais par incrément de 5 % (l'enfant devait donc accélérer ses frappes au cours des essais pour obtenir un renforcement visuel) et pour la séance « Décélération », les ISI augmentaient de 0 à 50 % par incrément de 5 % (l'enfant devait donc ralentir ses frappes pour obtenir un renforcement visuel).

La dernière phase consistait à enregistrer de nouveau leur TMS (1 essai).

RÉSULTATS

Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont concerné le rythme de frappes et sa régularité (variabilité intra-individuelle). Le rythme de frappes était déterminé par la médiane des IRI pour chaque essai de chaque participant. La médiane est une valeur plus appropriée que la moyenne car elle ne prend pas en compte les valeurs extrêmes. De plus, les IRI supérieurs à 1 500 ms ont été éliminés du calcul car ils sont assimilés à des pauses, comme lorsque l'enfant n'est plus concentré sur la tâche. Les IRI inférieurs à 150 ms ont aussi été supprimés car ils ne sont pas issus de 2 frappes successives ; ils ont été enregistrés, par exemple, lorsqu'un enfant frappait avec ses 2 mains, ce qui arrivait parfois (McAuley *et al.*, 2006).

Concernant la phase de synchronisation, comme les ISI ont été calculés à partir de la valeur du TMS initial (dernier essai de la phase de TMS1) nous avons utilisé la médiane réduite des IRI pour pouvoir comparer tous les essais et tous les participants :

$$\frac{\text{Médiane des IRI de l'essai}}{\text{Médiane des IRI en TMS1}}$$

Pour analyser statistiquement la régularité des frappes, nous avons déterminé leur variabilité pour chaque essai de chaque participant à partir du coefficient suivant :

Q1 et Q3 représentant respectivement le 1^{er} et 3^e quartiles des IRI.

Pour les analyses concernant les phases de TMS1, seul le dernier essai a été utilisé.

$$\frac{(Q3 - Q1) \times 100}{\text{Médiane des IRI}}$$

Analyses préliminaires^{1 2} : Absence d'influence sur le TMS initial (TMS1) de l'enfant de la phase de démonstration

Une analyse préliminaire a été faite pour vérifier que le TMS des participants n'a pas été influencé par la démonstration de l'expérimentateur. Le TMS de l'expérimentateur (moyenne = 752 ms, SD = 144) et le TMS1 de l'enfant (moyenne = 469 ms, SD = 133) ont été comparés pour chaque séance de chaque participant avec un test T de Student. Le résultat montre que le TMS des enfants était significativement plus rapide que celui de l'expérimentateur : $t(158) = 18,64, p < .001$. De plus, les frappes de l'expérimentateur (moyenne = 14,12, SD = 12,67) étaient plus régulières que celles des participants (moyenne = 25,41, SD = 23,17) : $t(158) = -5,62, p < .0001$. Ces résultats démontrent que le rythme de frappes de l'enfant était bien différent du rythme adopté par l'expérimentateur lors de la démonstration.

Analyse du TMS initial (TMS1)

Le Tableau II présente les valeurs médianes des IRI et les variabilités intra-individuelles et leurs écart-types respectifs pour les 3 groupes d'âges. Une ANOVA ($S < \hat{\text{Age}}_3 > \times \text{TMS1}_1$) ne révèle aucun effet d'Âge : le TMS reste constant entre 1½ et 3½ ans. La valeur moyenne à ces âges est de 473 ms (SD : 143 ms).

¹ Les analyses préliminaires n'ayant révélé aucun effet de Sexe, ce facteur a été retiré des analyses finales présentées dans cet article.

² La comparaison des médianes des IRI et de la variabilité au cours de la phase de TMS1 par 2 ANOVA ($< \text{Ordre}, \times \hat{\text{Age}}_3 > \times \text{TMS1}_2$) ne montre pas d'effet de l'Ordre de passage des séances : les TMS1 sont comparables d'une séance à l'autre pour chaque participant.

Tableau II. Tempo Moteur Spontané : médiane et variabilité en fonction de l'âge**Table II. Spontaneous Motor Tempo : median and variability in function of age**

	TMS (SD)	Variabilité* (SD)
1½ ans	447 ms (83,5)	32,0 (28,1)
2½ ans	465,1 ms (134,2)	29,7 (26,4)
3½ ans	494,9 ms (173,3)	18,3 (14,2)

*Variabilité des frappes définie par le coefficient suivant :
$$\frac{(Q3-Q1) \times 100}{\text{médiane}}$$

L'analyse de la variabilité inter-individuelle de la valeur du TMS (comparaison de variance de Snédécour) montre que celle-ci augmente entre 1½ et 2½ ans [$F(25,22) = 2,58, p < .05$] et entre 1½ et 3½ ans [$F(35,22) = 4,25, p < .01$]. À 3½ ans, le TMS s'échelonne de 386 ms (1^{er} quartile) à 577 ms (3^e quartile) alors que l'écart entre le 1^{er} et le 3^e quartile est nettement moins important à 1½ ans (respectivement 400 ms et 476 ms).

L'analyse de la régularité des frappes au cours du TMS ($(Q3-Q1)/\text{médiane}$) par une ANOVA ($S < \hat{\text{Age}}_3 > \times \text{TMS}_{1_1}$) montre un effet principal de l'Âge [$F(2,157) = 6,18, p < .005$] : les enfants de 3½ ans produisent des frappes plus régulières que les enfants de 1½ ans (test post-hoc de Tukey, $p < .005$) et de 2½ ans ($p < .05$).

Cette analyse révèle donc que le TMS entre 1½ et 3½ ans reste constant autour d'une valeur de 473 ms. Avec l'âge, il devient plus régulier et plus variable d'un individu à l'autre.

Analyse de la phase de synchronisation

Les analyses de la phase de synchronisation (les 11 essais) ont porté d'une part sur la médiane des IRI et d'autre part sur la variabilité des frappes. La comparaison de ces 11 essais avec ceux des phases de TMS sera présentée ultérieurement.

Séance Accélération

Une ANOVA ($S < \hat{\text{Age}}_3 > x \text{Essai}_{11}$) portant sur la médiane réduite des IRI de chaque essai de la phase de synchronisation a été réalisée pour comparer l'influence relative des différents ISI. Elle montre un effet principal de l'Âge [$F(2,48) = 5.77, p < .01$] : les enfants de 3½ ans sont globalement plus rapides que les enfants de 1½ ans (tests post-hoc de Tukey $p < .05$). L'analyse montre également une interaction entre l'Âge et les Essais [$F(20,480) = 2.26, p < .005$] : l'influence du tempo de la stimulation sur le rythme de frappe est fonction de l'âge de l'enfant et de l'importance de la modification du rythme, comme l'illustre la Figure 2.

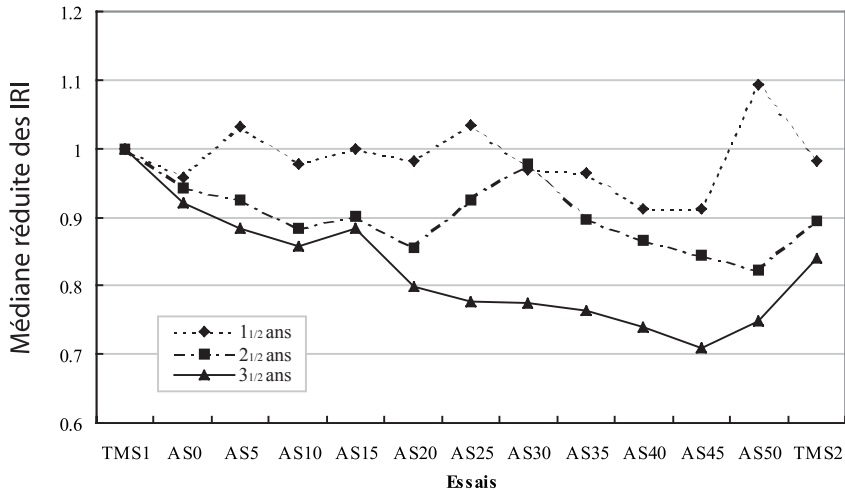


Figure 2. Médiane réduite des IRI au cours de la séance Accélération.

Figure 2. Reduced median of IRI – Acceleration session.

AS = essai de la phase de synchronisation de la séance Accélération

Pour chaque essai, nous avons analysé les différences des médianes réduites des IRI entre les groupes d'âge (tests post-hoc de Tukey). Jusqu'à 15 % d'accélération du tempo de la stimulation auditive (c'est-à-dire jusqu'au 4^e essai), les médianes réduites des IRI ne sont pas significativement différentes entre les 3 groupes d'âge : le rythme de frappes des enfants de 3½ ans ne diffère pas de celui des plus jeunes. Dès le 5^e essai (20 % d'accélération du tempo), la valeur de la médiane réduite est plus faible chez les enfants de 3½ que chez les enfants de 1½ ans (des essais

20 % à 50 %, tous $p < .05$) suggérant ainsi que les enfants de 3½ ans accélèrent significativement leur rythme de frappes par rapport aux enfants de 1½ ans. Le rythme de frappes à 2½ ans est intermédiaire entre ceux des 2 autres groupes d'âge : indépendamment de l'essai, leur rythme de frappes n'est pas significativement différent de celui des enfants de 1½ et 3½ ans.

Pour chaque âge, nous avons analysé les différences des médianes réduites des IRI entre les essais (tests post-hoc de Tukey). À 1½ et 2½ ans, il n'existe pas d'effet des Essais : le rythme de frappes à ces âges n'est pas dépendant du tempo des stimulations auditives. À 3½ ans, le rythme de frappes reste équivalent de l'essai 1 à l'essai 4 (de 0 % à 15 % d'accélération du tempo auditif), (test post-hoc de Tukey). Au-delà du 5^e essai (20 % d'accélération du tempo auditif), leur rythme de frappes est significativement plus rapide que celui enregistré à l'essai 1 (0 %). À partir de l'essai 6 (25 % d'accélération du tempo auditif), la valeur de la médiane réduite des IRI ne décroît plus significativement entre 2 essais successifs (les enfants n'accélèrent pas davantage le rythme de frappes). Par ailleurs, la médiane réduite des IRI diminue significativement entre le 4^e et le 5^e essai (entre 15 % et 20 % d'accélération du tempo auditif), suggérant une accélération des frappes entre ces 2 essais. Ces résultats suggèrent l'existence d'un seuil entre 15 % et 20 %. De plus, comme illustré Figure 2, au 5^e essai, lorsque le tempo auditif est 20 % plus rapide que le tempo initial, le rythme de frappes est 20 % plus rapide que le TMS initial.

La variabilité des frappes au cours des essais de la séance Accélération a été représentée Figure 3. Cette variabilité (i.e. la régularité des frappes au cours d'un essai, définie plus haut par le coefficient $(Q3-Q1)/\text{médiane}$), a été analysée par une ANOVA ($S < \text{Âge}_3 > \times \text{Essai}_{11}$) et montre que la régularité des frappes augmente avec l'âge [$F(2,48) = 3.19, p < .05$] : indépendamment de l'essai, les enfants de 3½ ans ont des frappes plus régulières que les plus jeunes (test post-hoc de Tukey, $p < .05$). À 2½ ans, la régularité des frappes est intermédiaire à celles des 2 autres groupes d'âge. Il existe aussi un effet des Essais [$F(10,480) = 3.10, p < .001$] ainsi qu'une interaction entre l'Âge et les Essais [$F(20,480) = 1.84, p < .05$] liés à une augmentation de la variabilité des frappes à 1½ et 2½ ans en fonction des essais (voir Figure 3).

Cette phase de synchronisation où les tempi auditifs étaient accélérés progressivement au cours des essais a permis de montrer que les enfants, indépendamment de leur âge, ont le même rythme de frappes tant que les stimulations auditives diffèrent de moins de 15 % de leur propre rythme. Lorsque les tempi auditifs deviennent plus rapides, seuls les enfants de 3½ ans parviennent à accélérer leurs frappes, tout en conservant un rythme de frappes plus régulier que les enfants plus jeunes.

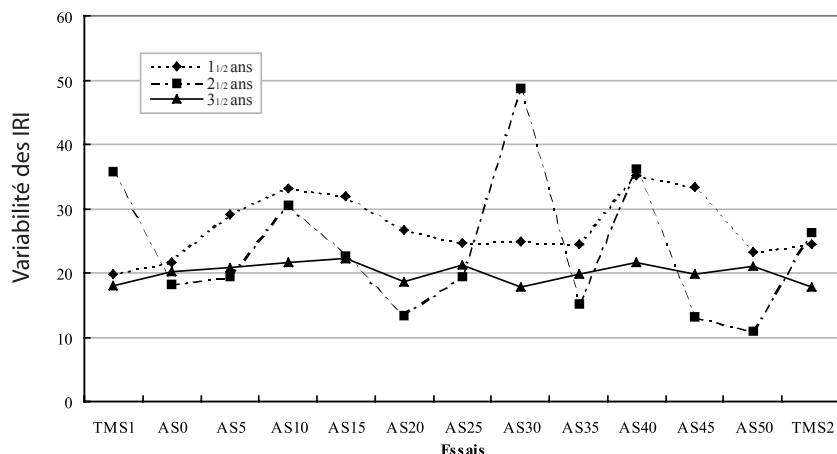


Figure 3. Variabilité des IRI au cours de la séance Accélération.

Figure 3. IRI variability – Acceleration session.

AS = essai de la phase de synchronisation de la séance Accélération.

Séance Décélération

La Figure 4 illustre, pour les 3 groupes d'âges, la médiane des IRI en fonction des essais de la séance Décélération. L'analyse des médianes réduites des IRI au cours des essais (ANOVA : $S < \hat{A}ge_3 \times \text{Essai}_{11}$) révèle un effet principal des Essais [$F(10,490) = 3.93, p < .0001$] : la valeur de la médiane réduite des IRI augmente au cours des essais. Il n'existe aucun effet de l'Âge ni d'interaction entre l'Âge et les Essais. Ces résultats suggèrent que les enfants, indépendamment de leur âge, ralentissent leur rythme de frappes au cours des essais. Les analyses post-hoc (Tukey) montrent qu'entre le 1^{er} et le 4^e essai (de 0 % à 15 % de ralentissement du tempo auditif), le rythme de frappes est équivalent. Par contre, à partir du 5^e essai (ralentissement de 20 % du tempo auditif), le rythme de frappes ralenti par rapport à celui observé au cours du 1^{er} essai (respectivement du 5^e au dernier essai, comparativement au 1^{er} essai : tous $p < .05$) et ce pour tous les groupes d'âge confondus.

Il est à remarquer que les rythmes de frappes les plus lents sont observés pour les 9^e et 10^e essais (40 % et 45 % de ralentissement du tempo auditif) et non pas pour le 11^e essai (50 % de ralentissement du tempo auditif) ; pendant le 9^e essai, le rythme de frappes est plus lent que ceux des 1^{er}, 2^e et 3^e essais (tous $p < .01$; respectivement 0 %, 5 %, 10 %

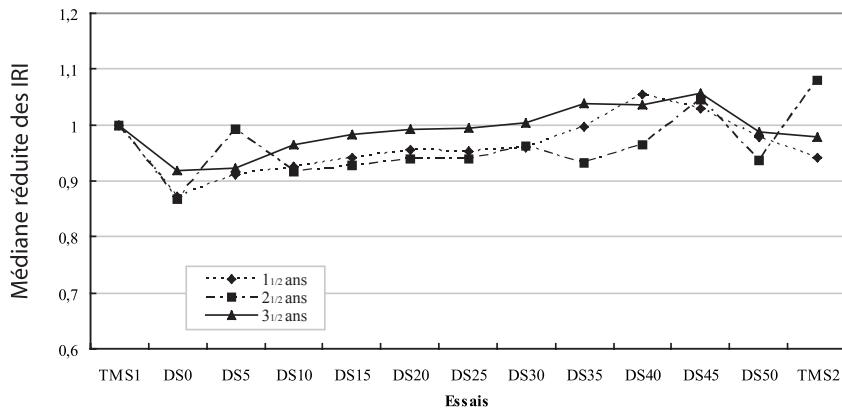


Figure 4. Médiane réduite des IRI au cours de la séance Décélération.

Figure 4. Reduced median of IRI – Deceleration session.

DS = essai de la phase de synchronisation de la séance Décélération

de ralentissement du tempo auditif). De même, le rythme de frappes enregistré au cours du 10^e essai est plus lent que ceux des 6 premiers essais, à savoir entre 0 % et 25 % de ralentissement du tempo auditif (tous $p < .05$).

La Figure 5 représente la valeur de la variabilité des frappes au cours des essais de la séance Décélération. L'analyse de la variabilité des frappes (ANOVA : $S < \hat{A}ge_3 > \times \text{Essai}_{11}$) ne révèle aucun effet notable : la régularité des frappes est équivalente quelle que soit la variation des ISI.

Contrairement à la phase de synchronisation de la Séance Accélération, tous les enfants ralentissent significativement leurs rythmes de frappes à partir d'un ralentissement de 20 % du tempo auditif, sans modification de la variabilité des frappes.

Comparaison des phases de synchronisation des séances Accélération et Décélération

La Figure 6 illustre les médianes réduites des IRI en fonction des 11 essais de synchronisation (moyennées sur les 3 groupes d'âges) des 2 séances. Les médianes réduites des IRI ont été comparées essai par essai entre les 2 séances (ANOVA : $S < \hat{A}ge_3 > \times \text{Essai}_{11} \times \text{Séance}_2$). L'interaction $\hat{A}ge \times \text{Séance}$ [$F(2,43) = 5.90, p < .01$] confirme que les enfants de 3 1/2 ans ont globalement un rythme de frappes plus rapide pendant la séance

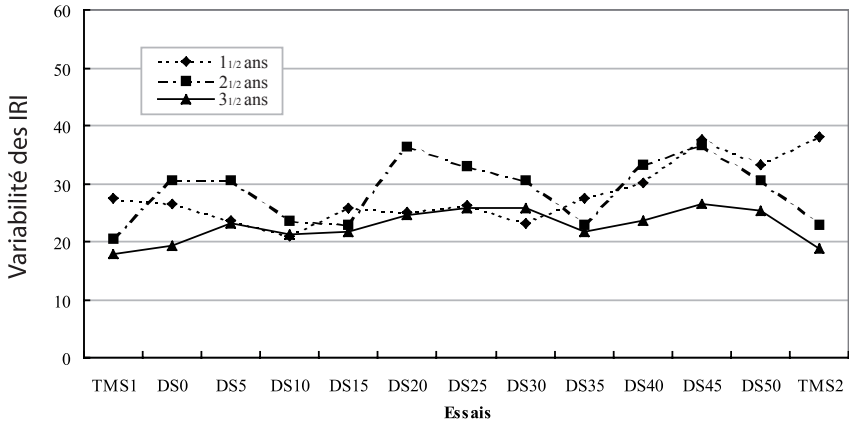


Figure 5. Variabilité des IRI au cours de la séance Décélération.

Figure 5. IRI variability – Deceleration session.

DS = essai de la phase de synchronisation de la séance Décélération.

d'accélération que pendant celle de décélération (test post-hoc de Tukey, $p < .005$), ce qui n'est pas observé à 1½ et 2½ ans (test post-hoc de Tukey, tous $p > .82$). Cette analyse révèle une interaction Essai \times Séance [$F(10,430) = 4.30, p < .0001$] : les enfants, indépendamment de leur âge, ont un rythme de frappes significativement plus rapide pour la séance Accélération que pour la séance Décélération, mais seulement pour les essais avec une variation de tempo importante : 8^e, 9^e et 10^e essais (tous $p < .001$; respectivement 35 %, 40 % et 45 % de variation du tempo auditif). Il est à noter que les rythmes de frappes des derniers essais (50 % de variation du tempo auditif) ne sont pas significativement différents entre les 2 séances. Un autre résultat important révélé par cette interaction est l'absence de différence du rythme de frappes entre le 1^{er} essai de la séance Accélération et le 1^{er} essai de la séance Décélération (0 % de variation du tempo auditif).

L'analyse comparée essai par essai, de la régularité des frappes (coefficient $(Q3-Q1)/\text{médiane}$) entre les 2 séances, révèle plusieurs effets et interactions. L'effet principal est celui des Séances [$F(1,44) = 6.03, p < .05$] qui montrent que globalement les frappes des enfants sont plus régulières au cours de la séance Accélération qu'au cours de celle de Décélération. L'interaction entre les Essais et les Séances [$F(10,440) = 2.42, p < .01$] précise que cette différence est observable (test post-hoc de Tukey) pour les

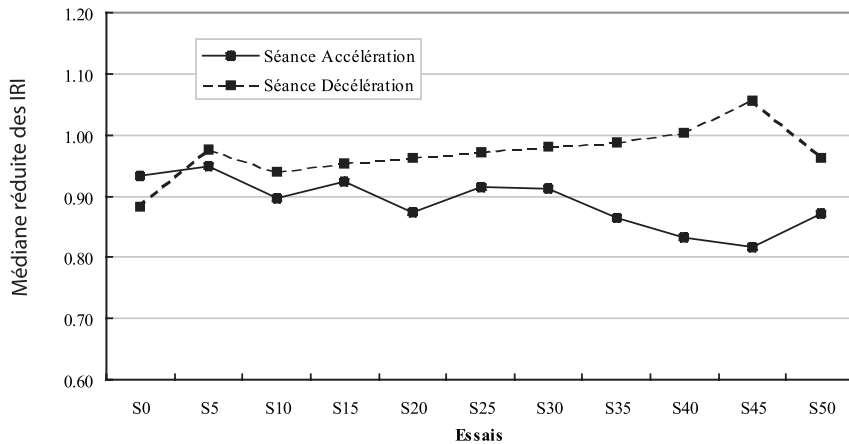


Figure 6. Médiane réduite des IRI de la phase de synchronisation en fonction des séances tout âge confondu.

Figure 6. Reduced median of IRI during each synchronization phase whatever the age.

5^e, 10^e et dernier essais (tous $p < .05$; respectivement 20 %, 45 % et 50 % de variation du tempo auditif).

Comparaison entre les phases

Effet d'un tempo auditif : TMS initial vs. 1^{er} essai de la phase de synchronisation

Afin de comparer l'influence d'un tempo auditif sur le rythme de frappes, nous avons comparé le TMS initial avec le 1^{er} essai de la phase de synchronisation (0 % de variation du tempo auditif), pour lequel l'ISI était le TMS de l'enfant (que ce soit pour la séance Accélération ou Décélération). L'ANOVA a donc pris en compte les données des 2 séances ($S < \hat{A}ge_3 > \times Séance_2 \times Phase_2$). Compte-tenu du protocole, il était prévisible que les résultats ne montrent aucun effet des séances. L'effet des Phases [$F(1,72) = 28.66, p < .0001$] confirme que, indépendamment de leurs âges, les enfants accélèrent leur rythme de frappes en présence d'un tempo auditif identique à leur TMS. La même ANOVA conduite sur la régularité des frappes (coefficient $(Q3-Q1)/médiane$) confirme toujours que les enfants les plus âgés frappent plus régulièrement que les plus jeunes (effet principal de l'Âge, $F(2,72) = 4.12, p < .05$; test post-hoc de Tukey, $p < .05$).

Effet de la phase de synchronisation sur le rythme de frappes spontané : TMS initial vs. TMS final

Pour chaque séance, 2 ANOVA ($S < \hat{\text{Age}}_3 > \times \text{Phase}_2$) ont été réalisées, l'une sur la médiane réduite des IRI et l'autre sur la régularité des frappes (coefficient (Q3-Q1)/médiane).

Concernant la séance Accélération, l'ANOVA portant sur la médiane réduite des IRI montre qu'il existe un effet principal de l'Âge [F (2,69) = 4.12, $p < .05$] : les enfants de 3½ ans ont des TMS plus rapides que les enfants de 1½ ans (test post-hoc de Tukey : $p < .05$). Il existe également un effet général des Phases [F (1,69) = 27.81, $p < .0001$] : Le TMS2 étant plus rapide que le TMS1 (test post-hoc de Tukey : $p < .0005$). Enfin il existe une interaction entre ces 2 facteurs [F (2,69) = 4.12, $p < .05$] : Les enfants les plus âgés ont un TMS2 significativement plus rapide que les plus jeunes (test post-hoc de Tukey, $p < .05$) et les enfants de 3½ ans ont un TMS2 plus rapide que leur TMS1 (test post-hoc de Tukey, $p < .0005$) alors que le TMS2 des enfants plus jeunes n'est pas différent de leur TMS1 (test post-hoc de Tukey, tous les $p > .05$), voir Figure 2. Concernant la régularité des frappes, l'ANOVA révèle un effet de l'Âge [F (2,69) = 3.53, $p < .05$] : les frappes deviennent plus régulières avec l'âge.

Au cours de la séance Décélération, l'ANOVA ne révèle aucun effet principal ni interaction sur la médiane réduite des IRI : le rythme de frappes en TMS2 est comparable à celui observé en TMS1 ; la phase de synchronisation n'a donc pas induit de modification dans le rythme de frappes spontané (Figure 4). En ce qui concerne la régularité des frappes, l'ANOVA révèle un effet de l'Âge [F (2,71) = 5.50, $p < .01$] : les frappes deviennent plus régulières avec l'âge. De plus, il existe un effet des Phases [F (1,71) = 4.64, $p < .05$] : les frappes de la phase de TMS2 sont plus irrégulières que les frappes de la phase de TMS1.

Comparaison du dernier essai de la phase de synchronisation (50 % de variation du tempo auditif) et du TMS final (TMS2)

L'idée est ici de comparer le rythme de frappes et sa régularité observés à la fin de la phase de synchronisation (lorsque le tempo diffère de 50 %) avec le rythme de frappes (et sa régularité) observé immédiatement après (en l'absence du tempo auditif) au moyen de 2 ANOVA ($S < \hat{\text{Age}}_3 > \times \text{Phase}_2$).

Pour la séance Accélération, le rythme de frappes observé pour les 3 groupes d'âge pendant le dernier essai de la phase d'accélération n'est pas différent de celui enregistré en TMS2 ; ce résultat en souligne

un autre : les enfants de 3½ ans qui ont accéléré leurs frappes pendant la phase de synchronisation conservent ce rythme même en l'absence de tempo auditif. Aucune modification de la régularité des frappes n'est observée entre ces 2 essais successifs.

Le même résultat est observé pour la séance de Décélération : le rythme de frappes en présence d'un tempo auditif décéléré de 50 % est comparable à celui enregistré en l'absence de celui-ci. De la même manière, aucune modification de la régularité des frappes n'est observée.

Comparaison entre les 2 séances des TMS finaux (TMS2)

Nous avons analysé l'influence relative de la phase de synchronisation sur le TMS selon que les ISI soient accélérés ou décélérés (ANOVA : $S < \text{Âge}_3 > \times \text{Séance}_2$). Un effet principal de la Séance [$F(1,67) = 10.68$, $p < .005$] confirme que le rythme de frappes en TMS2 de la séance Accélération est plus rapide que celui de la séance Décélération. Une interaction Âge \times Séance [$F(2,67) = 5.17$, $p < .01$] révèle qu'à 1½ ans, les TMS2 de la séance Accélération et de la séance Décélération ne sont pas différents. À 2½ et 3½ ans, le TMS2 de la séance Accélération est plus rapide que celui de la séance Décélération (test post-hoc de Tukey, tous les $p < .05$). La régularité augmente toujours avec l'âge [$F(2,67) = 3.30$, $p < .05$].

DISCUSSION

Les principaux résultats de notre étude ont montré que, dès 1½ ans, les enfants sont capables de produire spontanément un rythme de frappes régulier en l'absence de tout indice temporel. Entre 1½ et 3½ ans, la valeur du TMS est en moyenne de 460 ms. Par contre, avec l'âge, les différences inter-individuelles de la valeur du TMS augmentent. Pendant la même période, la régularité des frappes augmente ; elle est essentiellement liée à une diminution de la variabilité motrice avec l'âge. L'interaction avec un tempo auditif du même rythme que le TMS de l'enfant (S_0) induit une accélération du rythme de frappes. Lorsque le tempo auditif devient plus rapide (AS_5 à AS_{50}), le rythme de frappes des enfants de 1½ et 2½ ans n'évolue pas. Par contre, à 3½ ans, les enfants deviennent capables d'accélérer leur rythme de frappes, à condition que le tempo auditif soit au moins 20 % plus rapide que leur propre rythme. Cette accélération des frappes persiste en l'absence du

tempo auditif (TMS2). Lorsque le tempo auditif est ralenti au cours des essais, les enfants ralentissent leur rythme de frappes (par rapport à celui enregistré avec un tempo auditif équivalent à leur TMS) à partir de 20 % de décélération du tempo. Toutefois, il n'est jamais plus lent que le propre TMS de l'enfant.

Évolution du Tempo Moteur Spontané

Cette étude a permis de confirmer l'existence d'un tempo endogène dès l'âge de 1½ ans. Ce tempo a une valeur de 460 ms au cours des 4 premières années de la vie, mais les différences inter-individuelles augmentent avec l'âge. De plus, sa régularité s'améliore avec l'âge. Ces données valident nos 3 hypothèses concernant les caractéristiques du TMS entre 1½ et 3½ ans, à savoir la valeur du TMS, sa variabilité inter-individuelle et sa régularité. Nous avons comparé la valeur du TMS observée dans notre étude à celles de la littérature concernant les enfants de moins de 4 ans. L'étude la plus comparable est celle de Provasi & Bobin-Bègue (2003) qui utilise une procédure similaire. Ces 2 études tendent à montrer que la valeur moyenne du TMS reste constante à 450 ms entre 1½ et 4½ ans.

Ainsi, le TMS des jeunes enfants est plus rapide que celui des adultes conformément à l'hypothèse selon laquelle le TMS ralentit avec l'âge (McAuley *et al.*, 2006). Cependant, nos résultats ne permettent pas de penser que le ralentissement débute dès le plus jeune âge. Cette hypothèse est cohérente avec l'augmentation de la variabilité inter-individuelle de la valeur du TMS avec l'âge : à 1½ ans, elle est comprise entre 400 et 476 ms alors que chez l'adulte elle est comprise entre 300 et 800 ms (Frasse, 1974). Les étapes développementales conduiraient à augmenter l'empan de la période de référence (McAuley *et al.*, 2006). Notre étude a permis de mettre en évidence une augmentation de cette variabilité inter-individuelle en deux ans. Cette évolution est particulièrement rapide. Ce résultat suggère donc que, chez le jeune enfant, le processeur temporel ne soit capable de produire qu'une gamme réduite d'intervalles et probablement, ne soit aussi capable de traiter qu'une gamme réduite d'intervalles. Au cours du développement et avec l'expérience, la gamme d'intervalles produits et perçus deviendrait plus importante. Cette hypothèse est en accord avec l'hypothèse développementale du modèle de Drake *et al.* (2000) : dans le contexte du développement des attentes rythmiques, l'utilisation d'un unique oscillateur évoluerait vers le couplage de multiples oscillateurs, permettant à l'auditeur d'accéder à une plus grande gamme de tempi. Depuis peu, McAuley *et al.* (2006) font l'hypothèse d'une région d'entraînement (appelée « entrainment region ») qui serait

étroite vers les plus jeunes âges, deviendrait plus étendue au cours du développement pour redevenir plus étroite vers la fin de la vie.

En ce qui concerne l'influence d'un tempo auditif sur le rythme de frappes, le premier résultat à mentionner concerne l'influence d'un tempo auditif équivalent au TMS du participant ; en présence d'un tempo auditif identique à son propre tempo, le rythme de frappes enregistré est plus rapide que le TMS initial. Les frappes deviennent aussi moins régulières (augmentation de la variabilité des frappes lors du 1^{er} essai de synchronisation des 2 séances). Ces résultats suggèrent que le tempo auditif interagisse avec le processeur temporel. Chez le nourrisson, Bobin-Bègue *et al.* (2006) ont aussi observé, cette accélération d'un rythme endogène, le rythme de succion non-nutritive, en présence d'un tempo auditif équivalent au TMS. Dans cette expérience, les bébés n'étaient soumis à aucun renforcement suggérant que les tempi auditifs influencent le tempo moteur spontané et probablement la période de référence. Donc, dès la naissance, la perception d'un tempo auditif interfère avec l'expression de la période de référence en générant des intervalles plus courts. Ce phénomène pourrait être relié aux capacités de synchronisation avec les événements extérieurs : une bonne synchronisation nécessite une anticipation (Gérard & Rosenfeld, 1995).

Les tempi auditifs, qu'ils soient plus rapides ou plus lents que le TMS induisent, dès 1½ ans, une plus grande irrégularité des frappes (augmentation de la variabilité pendant la phase de synchronisation) sans modifier le rythme de frappes. Cette perturbation due à la présence d'un tempo auditif a déjà été observée dans l'expérience de Provasi & Bobin-Bègue, (2003). Ce résultat laisse supposer que les tempi auditifs sont perçus et interfèrent avec le TMS. À moins qu'il ne s'agisse d'un effet lié à des interférences attentionnelles, on peut supposer qu'à ces âges, les enfants ne soient pas encore capables de produire d'autres valeurs d'intervalles temporels que celui de leur TMS et qu'en essayant de se synchroniser avec les tempi auditifs par le biais de la tâche, ils ne parviennent qu'à perturber leurs rythme de frappes. Cette hypothèse est en accord avec l'hypothèse développementale de Drake *et al.* (2000) et la théorie de la région d'entraînement de McAuley *et al.* (2006) selon lesquelles les jeunes enfants ne peuvent pas produire une large gamme d'intervalles (ce qui est en accord avec nos résultats sur le TMS). À 3½ ans par contre, les enfants ont été capables d'accélérer leur rythme de frappes suggérant un développement de cette capacité à produire d'autres valeurs d'intervalles temporels que leurs propres valeurs. D'un point de vue développemental, ces résultats soulignent aussi que la perception d'intervalles plus rapides que le TMS est fonctionnelle avant leur production effective.

L'ensemble de ces résultats vont dans le sens des travaux sur la perception des rythmes montrant qu'à un âge très précoce, le nourrisson est capable de discriminer des patterns rythmiques (Demany, McKenzie & Vurpillot, 1977 ; Lewkowicz & Marcovitch, 2006 ; Trehub & Hannon, 2006). Nos résultats suggèrent l'existence d'une étape développementale au cours de laquelle la production d'intervalles est perturbée par la perception d'un tempo externe, c'est-à-dire qu'elle devient plus irrégulière. Cette étape se termine à 3½ ans lorsqu'il s'agit de produire des intervalles plus rapides que le TMS. À cet âge, la variabilité des frappes est équivalente quelle que soit la phase expérimentale. La production d'intervalles plus longs que le TMS ne semble être possible qu'après 3½ ans. Comme nous en avons émis l'hypothèse, ce décalage dans l'acquisition des capacités à produire des durées plus longues est probablement moins dû à une différence de traitement de ces 2 types de durées (plus longues ou plus courtes que le TMS) qu'à une évolution différente liée aux contraintes biomécaniques et à la difficulté à inhiber des comportements.

Conformément à nos prédictions, nos résultats ont montré que les enfants de 3½ ans sont capables de modifier leur rythme de frappes en fonction d'un tempo auditif mais seulement si celui-ci diffère de plus de 15 % de leur propre rythme. Ce seuil dans la modification du comportement a été observé aussi bien pour des tempi plus rapides que des tempi plus lents (la comparaison étant faite par rapport au rythme de frappes enregistré en présence d'un tempo auditif, S0). Cependant, les modifications comportementales observées ne sont pas les mêmes du fait du décalage développemental mentionné ci-dessus entre la capacité à produire des intervalles rapides ou lents.

La valeur de ce seuil de 15 % est cohérente avec les observations de Provasi & Bobin-Bègue (2003) faites avec le même type de procédure ; elle est similaire à la valeur de seuil trouvée en perception (tâche de discrimination) comprise entre 10 % et 20 % chez les enfants de plus de 3 ans (Bobin-Bègue & Provasi, 2005). Le seuil est donc comparable en perception et en production. Ce résultat souligne donc l'existence d'un seuil dans le traitement des durées, lié au mécanisme central : si la différence entre la période de référence et le tempo à produire est trop faible, alors cette valeur d'intervalle ne peut être produite (même si cette durée est perçue).

Ce seuil n'a pas été mis en évidence dans des tâches de production avant l'âge de 3½ ans. Cependant, nous savons que l'enfant détecte des différences de tempi dès le plus jeune âge (Baruch & Drake, 1997) ; Ce seuil s'affine au cours du développement jusqu'à atteindre un seuil optimal de 3 % chez l'adulte très entraîné (Drake & Botte, 1993). En ce

qui concerne le seuil de production, nous ne l'avons pas mis en évidence avant l'âge de 3½ ans. Ces résultats suggèrent que le traitement perceptif se mette en place avant le traitement productif, tout comme les recherches le montrent dans d'autres domaines (Lécuyer, 2004).

Les maximum de différence dans les rythmes de frappes entre les 2 séances ont été observés pour les essais de 35 % à 45 % de variation, c'est-à-dire lorsque le tempo auditif varie largement par rapport au tempo propre de l'enfant. Cette différence n'a pas été observée pour les essais à 50 % de variation. Il est à noter que l'essai à 50 % de variation est une tâche particulière ; en effet, pour la séance accélération, un enfant tapant à son propre rythme (en AS50) voit toutes ses frappes renforcées, et ce, sans modifier son comportement. Pour la séance de décélération (DS50), frapper à son propre rythme permet d'obtenir un renforcement 1 fois sur 3. Ainsi, lorsque le tempo auditif est 2 fois plus rapide ou 1,5 fois plus lent que le rythme spontané, une stratégie peu coûteuse est de conserver son propre rythme. Le même type de stratégie a été observé par Provasi & Bobin-Bègue (2003) chez les enfants de 4 ans qui devaient se synchroniser avec un tempo auditif de 800 ms. Le rôle particulier du ratio 1 : 2, c'est-à-dire lorsque le tempo est 2 fois plus rapide ou 2 fois plus lent, a également été souligné par Drake et Gérard (1989). Globalement, ces résultats montrent que pour le jeune enfant, accélérer son propre rythme est plus facile que le décélérer. L'ensemble de nos résultats suggère que ces 2 types de traitement suivent les mêmes étapes de développement. La première étape est que la présence d'un tempo externe perturbe le mécanisme du traitement temporel. Cette étape se traduit par une plus grande variabilité des frappes sans qu'il puisse être observé de modification dans leur rythme. La seconde étape correspond à la capacité à modifier son rythme de frappes en fonction du tempo externe, à condition que celui-ci soit au-delà d'un seuil de 15 % ; au cours de cette étape, la régularité des frappes est comparable à celle d'une tâche de TMS. Pour ce qui concerne les intervalles plus courts que le TMS, la première étape se déroule autour de 1½ ans et la seconde autour de 2½ ans. Pour la décélération, ces étapes ont lieu plus tard et nous n'avons pu observer dans notre expérience que la première étape à 3½ ans. À 4 ans, les enfants sont capables de modifier leur rythme de frappes en fonction de tempi auditifs plus lents et leurs frappes sont plus régulières que celles qui sont produites pour la même tâche par des enfants de 2½ ans (Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Comme il l'a été mentionné plus haut, ce décalage développemental peut être dû à des facteurs non-temporels et notamment la difficulté à inhiber des comportements chez le jeune enfant.

Une dernière analyse concerne l'influence d'un tempo auditif sur le tempo moteur spontané. Le TMS étant considéré comme une expression comportementale de la période de référence, la phase de TMS2 nous permet donc d'évaluer l'influence des tempi auditifs sur cette période de référence. Comme nous en avons fait l'hypothèse, cette modification ne s'observe que si le rythme de frappes a été modifié au cours de la phase de synchronisation (tout comme l'ont observé Provasi & Bobin-Bègue, 2003). Notre protocole expérimental ne permet pas de connaître la variation minimale qui induit une modification de la période de référence ; il peut simplement être montré qu'une variation de 50 % par rapport au TMS est nécessaire à 3½ ans. Compte-tenu des résultats évoqués précédemment, nous faisons l'hypothèse que toute variation supérieure à 15 % (valeur du seuil) peut induire cette modification de la période de référence. D'autre part, cette influence n'est que transitoire : les TMS1 sont comparables d'une séance à l'autre. Les informations temporelles externes modifient donc la période de référence transitoirement (Droit-Volet & Wearden, 2002), probablement pour permettre la production d'intervalles différents de la période de référence.

L'ensemble de ces résultats fournit un certain nombre d'hypothèses sur le développement des capacités de régulation des productions rythmiques et devraient contribuer à la compréhension des mécanismes responsables des activités rythmiques et plus largement au processus de traitement temporel. Cependant, ces résultats soulèvent d'autres questions notamment concernant l'existence d'un lien entre le mécanisme de production des durées et le tempo moteur spontané, ainsi que sur l'impact des tempi auditifs sur la période de référence.

BIBLIOGRAPHIE

- Baruch, C., & Drake, C. (1997). Tempo discrimination in infants. *Infant Behavior and Development*, 20, 573-577.
- Baruch, C., Panissal-Vieu, N., & Drake, C. (2004). Preferred perceptual tempo for sound sequences : Comparison of adults, children, and infants. *Perceptual and Motor Skills*, 98, 325-339.
- Baudoin, A., Vanneste, S., & Isingrini, M. (2004). Age-related cognitive slowing : The role of spontaneous tempo of processing speed. *Experimental-Aging-Research*, 30, 225-239.
- Bobin-Bègue, A., & Provasi, J. (2005). Tempo discrimination in 3- and 4-years-old children : performances and threshold. *Current Psychology Letters*, 16.
- Bobin-Bègue, A., Provasi, J., Marks, A., & Pouthas, V. (2006). Influence of an auditory tempo on the endogenous rhythm

- of non-nutritive sucking. *European Review of Applied Psychology*, 56.
- Boltz, M.G. (1994). Changes in internal tempo and effects on the learning and remembering of events durations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 20, 1154-1171.
- Byrne, R. W., & Russon, A. E. (1998). Learning by imitation : a hierarchical approach. *Behavioral and Brain Sciences*, 21, 667-721.
- Condon, W. S., & Sander, L. W. (1974). Synchrony demonstrated between movements of the neonates and adult speech. *Child Development*, 45, 456-462.
- Darcheville, J. C., Rivière, V., & Wearden, J. H. (1992). Fixed-interval performance and self-control in children. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 57, 187-199.
- Darcheville, J. C., Rivière, V. & Wearden, J. H. (1993). Fixed-interval performance and self-control in infants. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 60, 239-254.
- Demany, L ; Mc Kenzie, B., & Vurpillot E. (1977). Rhythm perception in early infancy. *Nature*, 266, 718-719.
- Drake, C., & Baruch, C. (1995). De la mesure de la sensibilité temporelle aux modèles d'organisation temporelle : hypothèses et données sur l'acquisition des capacités temporelles auditives. *L'Année Psychologique*, 95, 555-569.
- Drake, C., & Botte, M-C. (1993). Tempo sensitivity in auditory sequences : evidence for a multiple-look model. *Perception & Psychophysics*, 54, 277-286.
- Drake, C., & Gérard, C. (1989). A psychological pulse train : How young children use this cognitive framework to structure simple rhythms. *Psychological Research*, 51, 16-22.
- Drake, C., Jones, M. R., & Baruch, C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences : attunement, referent period, focal attending. *Cognition*, 77, 251-288.
- Droit-Volet, S. & Wearden, J. (2002). Speeding up an internal clock in children ? Effects of visual flicker on subjective duration. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55B, 193-211.
- Fraisse, P. (1974). *Psychologie du rythme*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Fraisse, P., Chambron, H., & Oléron, G. (1954). Note sur la constance et l'évolution génétique du tempo spontané moteur. *Enfance*, 25-34.
- Gérard, C., & Rosenfeld, M. (1995). Pratique musicale et régulation temporelle. *L'Année Psychologique*, 95, 571-591.
- Grondin, S. (1993). Duration discrimination of empty and filled intervals marked by auditory and visual signals. *Perception & Psychophysics*, 54, 383-394.
- Grondin, S., Meilleur-Wells, G., Ouellette, C., & Macar, F. (1998). Sensory effects on judgments of short time-intervals. *Psychological Research*, 61, 261-268.
- Jacquet, A-Y., Gérard, C., & Pouthas, V. (1994). *Rythmes et synchronisation chez le jeune enfant*. Poster Cogni-Seine, Troisième Journée Scientifique du Réseau Cogni-Seine, Programme cognisciences du CNRS, 6 juin 1994.
- Jones, M.R. (1976). Time, our lost dimension : toward a new theory of perception, attention and memory. *Psychological Review*, 83, 323-355.
- Jones, M.R., & Boltz, M. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychological Review*, 96, 459-491.
- Lécuyer, R. (2004). *Le développement du nourrisson*. Paris : Dunod.
- Lejeune, H. & Macar, F. (1994). Régulations temporelles. In M. Richelle, J. Requin & M. Robert (Eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale*, 2, 859-923.
- Lewkowicz, D.J. & Marcovitch, S. (2006). Perception of audiovisual rhythm and its invariance in 4- to 10- month-old infants. *Developmental Psychobiology*, 48, 288-300.
- McAuley, J.-D., Jones, M.R., Holub, S., Johnston, H.M., & Miller, N.S. (2006). The time of our lives : life span development of

- timing and event tracking. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135, 348-367.
- Miller, N.S., & McAuley, J.-D. (2005). Tempo sensitivity in isochronous tone sequences: The multiple-look model revisited. *Perception & Psychophysics*, 67, 1150-1160.
- Moussay, S., Dosseville, F., Gauthier, A., Larue, J., Sesboüe, B., & Davenne, D. (2002). Circadian rhythms during cycling exercise and finger-tapping task. *Chronobiology International*, 19, 1137-1149.
- Penney, T.B., & Tourret, S. (2005). Les effets de la modalité sensorielle sur la perception du temps. *Psychologie Française*, 50, 131-143.
- 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.A. Sloboda (Eds.), *Naissance et Développement du Sens Musical*, PUF, 133-163.
- Pouthas, V., & Jacquet, A.-Y. (1983). Attente et adaptation à la durée chez l'enfant dans la psychogénèse du temps: cinq approches. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 3, 397-407.
- Pouthas, V., Provasi, J., & Droit, S. (1996). Biobehavioral rhythms: development and role in early human ontogenesis. In J. T. Fraser & M. P. Soulsby (Eds.), *Dimensions of time and Life, The study of time VIII*, International universities press.
- Provasi, J. (1988). *Capacités et apprentissage de régulations temporelles chez le nourrisson dans l'activité de succion*. Thèse de Psychologie non publiée, Université René Descartes-Paris 5.
- Provasi, J., & Bobin-Bègue, A. (2003). Spontaneous motor tempo and rhythmical synchronization in 2½ and 4-years-old children. *International Journal of Behavioral Development*, 27, 220-231.
- Thelen, E. (1979). Rhythmical stereotypies in normal human infants. *Animal Behavior*, 27, 699-715.
- Trehub, S.E., & Hannon, E.E. (2006). Infant music perception: Domain-general or domain-specific mechanisms? *Cognition*, 100, 73-99.
- 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, 41-70.
- Treisman, M., Faulkner, A., Naish, P. L. N., & Brogan, D. (1990). The internal clock: evidence for a temporal oscillator underlying time perception with some estimates of its characteristics frequency. *Perception*, 19, 705-743.
- Tse, C.Y., & Penney, T.B. (2006). Preattentive timing of empty intervals is from marker offset to onset. *Psychophysiology*, 43, 172-179.
- Vanneste, S., Pouthas, V., & Wearden, J. H. (2001). Temporal control of rhythmic performance: a comparison between young and old adults. *Experimental Aging Research*, 27, 83-102.