Journal de la Société de Biologie, 193 (4), 411-420 (1999)

Le temps de la conscience, la conscience du temps

par Viviane Pouthas

Unité de Neurosciences Cognitives et Imagerie Cérébrale, UPR 640 LENA-CNRS, Hôpital de la Salpêtrière, 47, Boulevard de l'Hôpital, 75651 Paris Cedex, France
e.mail: lenavp@ ext.jussieu.fr – Téléphone : 33 1 42 16 14 14 – Fax : 33 1 44 24 39 54

Reçu le 22 octobre 1999

RÉSUMÉ

Le temps modèle nos activités quotidiennes : nous devons évaluer la durée des événements auxquels nous sommes confrontés pour anticiper les changements significatifs de notre environnement et régler notre action par rapport à ces changements. Pourtant, il n'y a pas de modalité sensorielle dévolue à la perception du temps et la question se pose de savoir quels sont les mécanismes qui sous-tendent la prise de conscience que le temps s'écoule et l'évaluation du temps écoulé. En prenant pour cadre de référence les modèles qui postulent l'existence d'un « timer » interne et en combinant les apports de la psychologie expérimentale, de la neuropsychologie et de l'imagerie cérébrale, cet article propose une brève revue d'études qui ont examiné les différentes composantes – base de temps, compteur et mémoire – du « timer ». Ces études ont cherché d'une part à caractériser les relations entre les changements observés dans l'estimation du temps et l'évolution des différentes composantes du "timer" avec l'âge ou leurs altérations pathologiques. D'autre part, elles ont tenté de spécifier les bases neurales de ces composantes. Il ressort de cette brève revue de question que " ce timer ", s'il existe, ne marque pas un temps objectif mais une multitude de temps subjectifs.

SUMMARY Time of consciousness, consciousness of time

Time shapes our behavior : we must estimate the duration of events in our environment in order to anticipate changes and time our activity in function of these changes. However, there is no sensory modality devoted to the perception of time, therefore the question is to know which mechanisms underlie the consciousness that time flows and allow us to estimate time precisely. This article proposes a brief overview of psychological, neuropsychological and brain imaging studies which rely on theoretical models postulating the existence of an internal timer . These studies examine the different components – time base, counter and memory – of this timer : particularly they are aimed at characterising the relationships between the evolution of these components with age or their pathological alterations and changes in temporal judgements. They also attempt to specify the neural bases of these components. From this brief overview comes the idea that, if an internal timer exits, it does not mark objective time but a multitude of subjective times.

INTRODUCTION

En premier lieu, il n'est pas inutile de rappeler que le temps est une notion extrêmement complexe, à l'étude de laquelle finalement peu de chercheurs du domaine de la psychologie ou des neurosciences se sont attelés. En 1977, Richelle s'interrogeait pour savoir si ce n'était pas la vieille inquiétude face au Dieu Chronos qui retenait les scientifiques. Le temps est, en effet, une notion extrêmement complexe qui recouvre de nombreux concepts : simultanéité, succession, passé-présent-futur. Dans ce texte, nous examinerons les processus qui sous-tendent la prise de conscience que le temps s'écoule et permettent d'évaluer le temps écoulé. Si l'on en croit les phi-

losophes et psychologues du début du siècle (Janet, 1928 ; Guyau, 1890), la durée est la « matière première du temps ». Guyau affirmait que « le temps est à l'origine, l'intervalle conscient entre le besoin et sa satisfaction » et Janet (1928) écrivait « nous ferions l'expérience du temps dans l'attente, cette étape préparatoire qui sépare le besoin de son apaisement ». Mais par quels mécanismes estimons-nous la longueur du délai qui nous sépare de l'événement attendu ? En d'autres termes, comment percevons-nous et prenons-nous conscience de la durée, alors que, comme l'a souligné E. Klein (1995), « le temps n'est une matière à aucun de nos sens ». Il faut préciser que les durées étudiées sont de quelques centaines de millisecondes à quelques dizaines de secondes voire, quelques minutes.

1. Le temps modèle notre quotidien

Nombre de nos activités et de nos comportements quotidiens révèlent notre compétence à évaluer le temps écoulé, et ceci dès les débuts de la vie. Nous devons traiter en permanence la durée des événements auxquels nous sommes confrontés, nous pouvons ainsi anticiper les changements significatifs et régler notre action par rapport à ces changements. C'est par exemple le cas lorsque, sans l'aide d'une horloge, nous estimons la durée de cuisson d'un plat. Nous savons également évaluer la durée des feux de signalisation sur le chemin que nous empruntons chaque jour et anticipons le retour au vert ou au rouge de ces feux (pour nous préparer à redémarrer notre voiture ou à traverser). Le musicien, quant à lui sait régler précisément la durée des notes et allonger ou raccourcir ces durées de façon à créer des effets expressifs. Nous pourrions multiplier les exemples, mais un nous paraît particulièrement illustratif, celui d'une conversation, entre gens policés bien sûr. Chaque fois que nous parlons à un interlocuteur, nous allons produire des sons dont nous allons contrôler la durée, de même que celle des silences entre les mots et entre les phrases. Nous évaluerons ces mêmes durées quand notre interlocuteur nous répondra et nous reprendrons notre tour de parole quand nous aurons jugé que la pause après sa dernière phrase est suffisamment longue. On a d'ailleurs montré que, dès la première année de la vie, lors des interactions entre un bébé et une personne de son entourage, les vocalisations alternées sont beaucoup plus fréquentes que les vocalisations simultanées. Les enfants préverbaux sont capables de respecter des silences comme des adultes compétents linguistiquement. Mais la question est de savoir quel est le processeur qui permet de traiter l'information temporelle car, comme nous l'avons déjà souligné, il n'y pas de modalité sensorielle dévolue à la perception du temps. Selon Gibson (1975) « on peut percevoir les événements mais pas le temps » (*"Events are perceivable but time is not"*). Nous pourrions avancer l'idée que nous avons une connaissance procédurale du temps : nous saurions comment percevoir le temps et comment agir dans le temps sans savoir que nous percevons le temps et sans savoir que nous agissons dans le temps. Pourtant, nous mémorisons les caractéristiques temporelles de nos gestes quotidiens ou des événements de notre environnement. Pour que de tels comportements soient possibles, il faut que les durées puissent être codées, mémorisées, reproduites de manière stable. Est-ce le temps (l'information temporelle) ou sont-ce les événements que le temps contient que l'on code ?

2. Le temps : une information dérivée ou une information per se ?

Deux conceptions théoriques s'affrontent sur ce point. Selon la première il n'y a pas d'intérêt à rechercher l'existence d'un quelconque mécanisme interne. Le plus souvent la durée est une information dérivée d'autres informations, par exemple de la vitesse et de l'espace lorsque le joueur de tennis doit prévoir le moment où il va frapper la balle. De plus, il est tout à fait rare que le temps soit « pur », en d'autres termes vide de tout événement. L'évaluation de la durée d'un intervalle dépend du traitement que l'on applique à cet (es) événement(s), qualifié d'information non temporelle. La durée estimée dépendrait de la quantité d'informations non temporelles traitées pendant la période à évaluer (Ornstein, 1969). Le temps subjectif résulterait d'une reconstruction.

Par contre, selon la seconde conception, la durée constitue une information en soi et indépendante, qui serait traitée par un mécanisme spécialisé « une horloge interne ». En d'autres termes le temps serait évalué par des mécanismes chronométriques spécifiques (Treisman, 1963 ; Church, 1984). Ce serait d'ailleurs le cas très tôt dans la vie, comme le suggère l'étude de Mendelson et Ferland (1982). Ces auteurs ont familiarisé des nourrissons de 4 mois à un rythme auditif et leur ont ensuite présenté une marionnette qui ouvrait la bouche selon le même rythme ou à un rythme différent. Les nourrissons reconnaissent le rythme auquel ils ont été familiarisés : ils regardent en effet beaucoup plus la marionnette qui « parle » à un rythme différent, comme si il y avait une incongruité entre ce qu'ils ont entendu précédemment et ce qu'ils voient maintenant. Ces résultats suggèrent que le jeune nourrisson est doté de mécanismes spécifiques qui lui permettent « d'abstraire » l'information temporelle des caractéristiques de la modalité sensorielle dans laquelle un événement ou un signal est présenté (auditif dans le cas présent), de la coder, de la mémoriser et de la comparer à l'information temporelle qu'il a abstraite d'une stimulation présentée dans une seconde modalité (visuelle dans ce cas).

Actuellement, on assiste à un certain consensus entre les deux conceptions théoriques : si l'évaluation du temps est rétrospective, alors elle sera fondée sur une reconstruction du temps mis à effectuer telle ou telle opération ; des mécanismes chronométriques spécifiques ne seraient mis en jeu que lorsque le sujet est dans une situation dans laquelle il est prévenu (estimation prospective) qu'il aura à estimer précisément la durée d'un stimulus ou qu'il devra régler précisément la durée d'un geste pour effectuer la tâche qui lui est demandée (Block, 1990, Hicks, Miller & Kinsbourne, 1976 ; Hicks, 1992). En résumé, chaque action ou chaque événement dure un certain temps, mais nous ne sommes pas toujours obligés de contrôler ce temps, dans ce cas le « timer » interne ne serait pas mis en route. Par contre, il serait activé quand ce contrôle est nécessaire.

3. Modèle d'un « timer » interne

Nous prendrons pour exemple celui de Church (1984), modèle le plus élaboré et auquel il est le plus souvent fait référence actuellement. Il doit cependant beaucoup à ses prédécesseurs, particulièrement à celui de Treisman (1963). Selon ce modèle, une base de temps produit des impulsions dont la nature reste encore à élucider (nous y reviendrons). Ces impulsions seraient stockées dans un accumulateur (compteur), lorsque l'interrupteur est fermé. La latence de fermeture de cet interrupteur serait fonction de l'attention accordée au temps. Le contenu de l'accumulateur serait stocké en mémoire de travail ou en mémoire à long terme en fonction de la situation. Un comparateur effectuerait la comparaison entre la valeur stockée dans l'accumulateur (si le temps doit être évalué immédiatement) ou dans la mémoire de travail (si cette évaluation est légèrement différée) et celle contenue dans la mémoire de référence ou à long terme (valeur correspondant à des unités arbitraires comme la seconde ou à celle d'une durée encodée antérieurement dans des situations comparables). La décision (l'évaluation du temps écoulé) serait donnée à l'issue de cette comparaison (Fig. 1)

En combinant les apports de la psychologie expérimentale, de la neuropsychologie et de l'imagerie cérébrale nous allons maintenant considérer l'évolution des différentes composantes de ce « timer » au cours de la vie, leurs altérations pathologiques et leurs bases neurales.

4. Bases de temps

a) Nature ?

On ne connaît pas actuellement la nature de la base de temps ou des bases de temps : les candidats potentiels sont les réactions biochimiques, les bases de temps viscérales, les indices fonctionnels du SNC, les rythmes biologiques et les mouvements rythmés. Par contre, on a montré que l'on pouvait agir sur la vitesse de cette base de temps, soit par des manipulations pharmacologiques ou environnementales et que ces changements de vitesse induits influaient sur les jugements temporels. Ainsi, si l'on accélère la base de temps en perturbant la fonction dopaminergique au moyen d'un agoniste, tel que la métamphétamine (Meck, 1983 ; Rammsayer, 1989, 1993) ou en soumettant le sujet à des stimulations intenses (Boltz, 1994) on observe un raccourcissement de la durée subjective. Au contraire, si l'on administre un antagoniste de la fonction dopaminergique, tel que l'halopéridol, ou si l'on met le sujet dans des conditions relaxantes, on assiste à un allongement de la durée subjective.

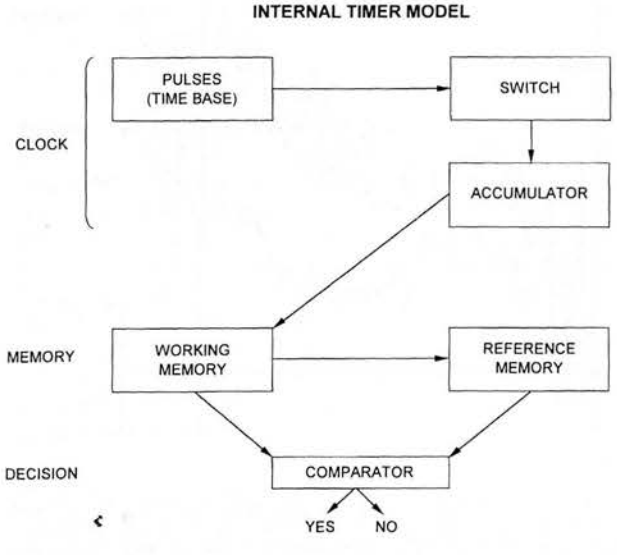

FIG. 1. – Modèle de « timer » interne (d'après Church, 1984).

b) Changements de vitesse au cours de la vie ?

On s'est posé la question de savoir si la vitesse de la base de temps change avec l'âge, ces changements potentiels pouvant influencer la durée subjective. Il faut d'abord souligner que le bébé est doté de nombreux rythmes biologiques et moteurs. Thelen soulignait en 1981 que la quantité et la diversité des mouvements répétitifs rythmiques sont si importantes que le nourrisson paraît suivre le dicton « si tu bouges, bouge en rythme ». Wolff (1967) avait proposé l'idée souvent reprise par d'autres chercheurs, que ces rythmes seraient sous le contrôle de microrythmes endogènes, précurseurs des bases de temps internes réglant les coordinations motrices des enfants plus âgés et des adultes.

Selon de nombreux auteurs, un moyen d'appréhender la vitesse de la base temps et de déterminer si celle-ci change en fonction de différentes conditions consiste à analyser le tempo spontané, celui que l'on recueille lorsque l'on demande à une personne de taper avec la main le plus régulièrement possible à la vitesse qu'elle préfère. On a ainsi pu montrer que la vitesse du tempo moteur spontané ralentit avec l'âge : les intervalles interfrappes sont en moyenne de 450 ms à 6 ans, de 600 ms à 8 ans, de 650 ms à partir de 10 ans et de 735 ms chez des adultes âgés de plus de 60 ans (Drake & Baruch, 1995 ; Vanneste *et al.*, 1999 soumis).

Plus on est âgé, plus la cadence que l'on adopte spontanément est lente. Ces résultats suggèrent donc que le rythme de la base de temps interne ralentit avec l'âge. Mais, des études ont mis en évidence que de très jeunes enfants sont capables de ralentir la cadence de leurs activités rythmiques, que ce soit de leur succion (DeCasper et Sigafoos, 1983 ; Provasi, 1988 ; Pouthas, 1990) ou de leurs mouvements de bras ou jambes (Rovee-Collier, 1993) pour déclencher des événements agréables - voix de leur mère, musique ou mouvements d'un mobile. De même, si les personnes âgées adoptent spontanément des rythmes plus lents que ceux des jeunes adultes, elles sont capables de maintenir régulièrement une cadence apprise même si cette cadence est très rapide (Vanneste *et al.*, 1999 soumis). Comment s'opèrent ces réglages ? L'hypothèse proposée est celle d'une calibration : si l'intervalle entre chaque mouvement d'un tempo spontané correspond à *n* battements de l'horloge d'une personne et que l'on demande à cette personne de synchroniser ses mouvements avec une cadence plus rapide ou plus lente, en d'autres termes de raccourcir ou d'allonger l'intervalle,

elle va évaluer le nombre de battements intervenant dans ce nouvel intervalle cible, ce nombre sera inférieur ou supérieur à *n*. D'ailleurs, quand la synchronisation avec une cadence arbitraire est réussie, on ne peut pas mettre en évidence des différences de vitesse de la base de temps, ni un éventuel dysfonctionnement de cette base de temps.

5. L'accumulation et le comptage des impulsions

Nous n'avons que des preuves indirectes du fonctionnement de ce mécanisme de base de l'évaluation du temps. Mais, deux études récentes menées en EEG nous fournissent des indices de ce fonctionnement. Préalablement à l'exposé de ces deux études, nous allons décrire brièvement les corrélats électrophysiologiques de l'estimation de durées brèves. De nombreux travaux ont en effet montré qu'une onde électrique de polarité négative (la **V**ariation **C**ontingente **N**égative, VCN) se développe sur le scalp au niveau fronto-central, lorsque le sujet est engagé dans une tâche d'estimation de durées courtes. Ainsi, on a mis en évidence cette déviation lente de polarité négative dans plusieurs conditions expérimentales. Celle-ci survient pendant le délai qui sépare deux événements significatifs, lorsque la durée de ce délai est prévisible (par exemple, dans une situation de temps de réaction lorsqu'il y a un délai fixe entre un signal préparatoire S1 et un signal de réponse S2). Cette VCN serait corrélative de l'anticipation par le sujet du second signal et de la préparation à y répondre. On a par ailleurs montré que tout protocole où il y a développement d'une VCN contient un traitement de la durée, même si celui-ci n'est qu'implicite ou indirect.

a) Relation entre la durée du stimulus et la durée de la VCN (Pouthas et al., *1998)*

Dans cette étude les sujets devaient mémoriser la durée d'allumage d'une diode, (700 ms) qu'on leur présentait à plusieurs reprises (durée modèle ou standard). Ensuite, dans une phase test, ils devaient juger si la durée présentée (490 ms, 595 ms, 700 ms, 805 ms, 910 ms) était la durée standard ou différente de cette durée standard, qu'elle soit plus courte et plus longue. Comme le montre la figure 2 l'amplitude de l'onde VCN ne dépend pas de la durée puisque les tracés se recouvrent jusqu'au maximum de cette onde. Par contre, on observe un décalage dans le moment de résolution de la VCN, en d'autres termes dans le moment de son retour à la ligne de base. De plus, si l'on analyse de façon plus détaillée ces résultats, on voit que ce retour à la ligne de base est relativement plus tardif après l'extinction de la diode pour les stimuli de durées inférieures au standard que pour les stimuli de durées supérieures au standard. Ceci témoignerait du fait que la résolution de la VCN ne dépend pas seulement de la durée du stimulus (de son extinction en l'occurrence), mais du jugement que la durée standard est ou n'est pas encore écoulée. Les résultats de l'expérience que nous allons rapporter maintenant indexent de façon encore plus claire les relations entre certaines caractéristiques de la VCN et le jugement porté sur le temps écoulé.

b) Relation entre l'amplitude de la VCN et la qualité du jugement temporel (Macar et al., *1999)*

Dans cette étude, les sujets étaient entraînés à évaluer une durée de 2,5 secondes entre deux stimuli visuels brefs. Au cours de l'apprentissage, on leur présentait des durées plus brèves ou plus longues et on leur donnait un feedback sur la justesse ou non de leur jugement. Puis, au cours de la phase test, alors que les durées étaient de 2,5 s, on continuait de demander aux sujets si ces durées étaient égales à 2,5 s, plus brèves ou plus longues sans leur donner de feedback. Les auteurs ont ainsi mis en évidence une relation paramétrique entre l'amplitude de la VCN et le type de jugement porté par le sujet alors même que la durée objective était toujours la même (voir Fig. 3). Selon les auteurs, les changements du contenu de l'accumulateur que reflètent les changements d'amplitude de la VCN dériveraient des fluctuations spontanées du niveau d'activation ou d'attention d'un essai à l'autre. Si ce niveau s'accroît, il y aura un plus grand nombre

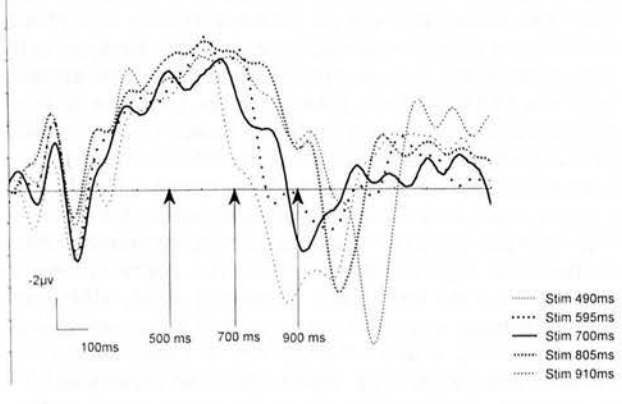

FIG. 2. – Amplitude moyenne de l'onde lente négative (Variation Contingente Négative, VCN) observée au niveau fronto-central dans une tâche de discrimination de durées brèves (d'après Pouthas *et al.*, 1998).

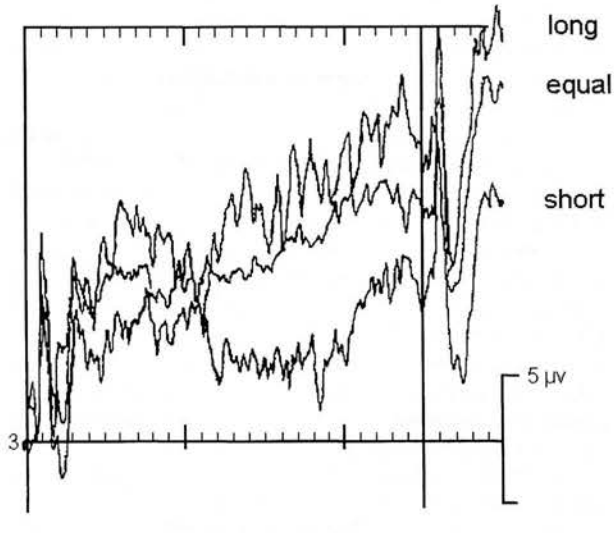

FIG. 3. – Amplitude moyenne de l'onde lente négative (Variation Contingente Négative, VCN) observée au niveau fronto-central en fonction du type de jugement – plus courte, égale, plus longue – d'une durée objective de 2,5 secondes (voir texte) (d'après Macar *et al.*, 1999).

d'unités accumulées et la durée sera jugée plus longue que la référence stockée, à l'inverse, si ce niveau diminue le nombre d'unités accumulées sera plus petit et la durée sera jugée plus courte. Cette dernière expérience montre l'importance des processus attentionnels dans la prise de conscience du temps écoulé.

6. Attention et perception du temps

Lorsque nous avons décrit le modèle du « timer », nous avons déjà évoqué rapidement le rôle que pouvait jouer l'attention dans l'estimation du temps, en mentionnant l'hypothèse selon laquelle la latence de fermeture de l'interrupteur dépendrait du niveau d'attention portée à la durée. De plus, les modèles attentionnels se référant aux modèles de « timer » postulent que l'estimation de la durée serait fonction de la quantité de ressources de traitement allouée à l'information temporelle, cette quantité pouvant diminuer si on demande au sujet de traiter simultanément plusieurs types d'informations : temporelles et non temporelles, comme c'est le cas dans les situations de double tâche. Les études que nous avons menées dans un but de comparaison entre les jugements temporels de personnes âgées et ceux de jeunes adultes confirment le rôle de l'attention sur la durée subjective.

Lorsqu'une tâche requiert simplement de reproduire le plus précisément possible la durée d'un stimulus (son ou lumière) ou celle d'un intervalle entre deux stimuli brefs que l'on a préalablement mémorisée (tâche simple), les résultats ne montrent pas d'altération des performances temporelles avec l'âge : les évaluations d'une même durée sont aussi précises et aussi stables d'un essai à l'autre chez des sujets âgés (60-80 ans) que chez des jeunes adultes (20-30 ans) (Vanneste *et al.*, 1999). En revanche, si l'encodage de la durée de l'intervalle modèle est perturbé par une tâche interférente (double-tâche), c'est-à-dire si le sujet doit partager son attention entre deux opérations mentales concurrentes (l'évaluation de la durée d'affichage d'un rectangle sur l'écran d'un ordinateur et la lecture de chiffres qui s'inscrivent à un rythme aléatoire sur ce rectangle), les personnes âgées reproduisent des durées à la fois significativement plus courtes et plus variables que celles des jeunes adultes (Fig. 4).

Nous avons également observé des effets d'interférence dans une situation où l'attention doit être partagée entre deux tâches de même nature. Lorsqu'il s'agit d'encoder une, deux ou trois durées parmi trois durées présentées (Vanneste & Pouthas, 1999), la sous-estimation des durées et la variabilité des jugements sont d'autant plus importantes que le nombre de durées à encoder simultanément est élevé. Ce phénomène est particulièrement accentué chez les sujets âgés, qui sous-estiment davantage les durées. Cette sensibilité aux effets d'interférence observée chez les personnes âgées confirme l'hypothèse d'une relation entre la réduction globale de leur capacité attentionnelle et la perte de précision de leurs évaluations de durées brèves et en conséquence apporte une validation expérimentale aux modèles attentionnels selon lesquels l'estimation de la durée serait fonction de la quantité de ressources de traitement allouée à l'information temporelle.

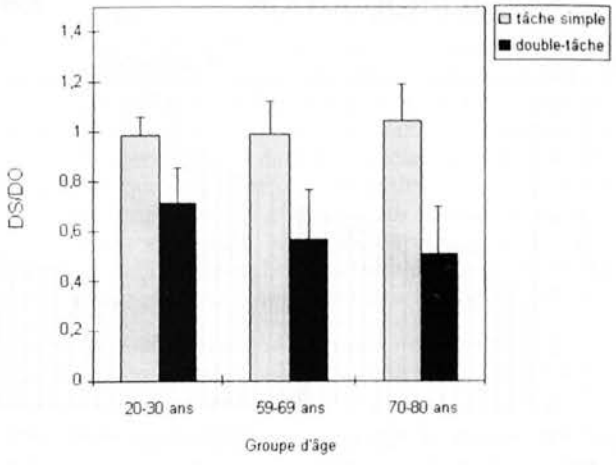

FIG. 4. – Quotients Durée Subjective/Durée Objective (DS/DO) obtenus par les trois groupes d'âge dans les deux types de tâche (d'après Vanneste *et al.*, 1999).

Par contre, lorsque les sujets âgés doivent produire des intervalles correspondant à une durée définie, c'est-à-dire attendre que le temps qu'ils estiment, corresponde à x secondes, tout en effectuant une tâche interférente de lecture de chiffres, leurs performances ne se distinguent plus de celles de jeunes adultes (Vanneste *et al.*, 1999). Bien que le coût attentionnel de la production et la reproduction de durées soit comparable, les deux types de situation pourraient impliquer des processus de mémoire différents : dans la tâche de reproduction, le sujet doit mémoriser une donnée nouvelle à savoir, la durée de l'intervalle modèle ; dans la tâche de production, il se forme une représentation de la durée à produire en se référant à des unités conventionnelles mémorisées de longue date, qui font partie de sa base de connaissance et sont contenues en mémoire sémantique.

8. Temps et mémoire : le modèle de l'amnésie

L'étude des patients amnésiques est riche d'enseignement pour la compréhension des processus mnésiques qui sous-tendent le traitement de l'information temporelle. L'ensemble des recherches montre une altération de l'évaluation du temps écoulé chez ces patients (Richards, 1973 ; Williams *et al.*, 1989). En tâche de reproduction, ce déficit se traduit par une dissociation entre une estimation correcte des durées courtes (inférieures à 10-15 secondes) et une sous-estimation des durées longues (généralement supérieures à 15-20 secondes). Par contre, en situation de production de durées, nous n'avons pas observé de différences entre les évaluations du patient amnésique étudié (AC) et celles de sujets témoins (Perbal *et al.*, 1999) (Fig. 5).

Nous avons avancé un certain nombre d'hypothèses explicatives pour rendre compte de cette double dissociation, en fonction des durées, d'une part, et des tâches temporelles requises, d'autre part. La sous-estimation des durées longues observée chez les patients amnésiques en tâche de reproduction pourrait provenir de la difficulté

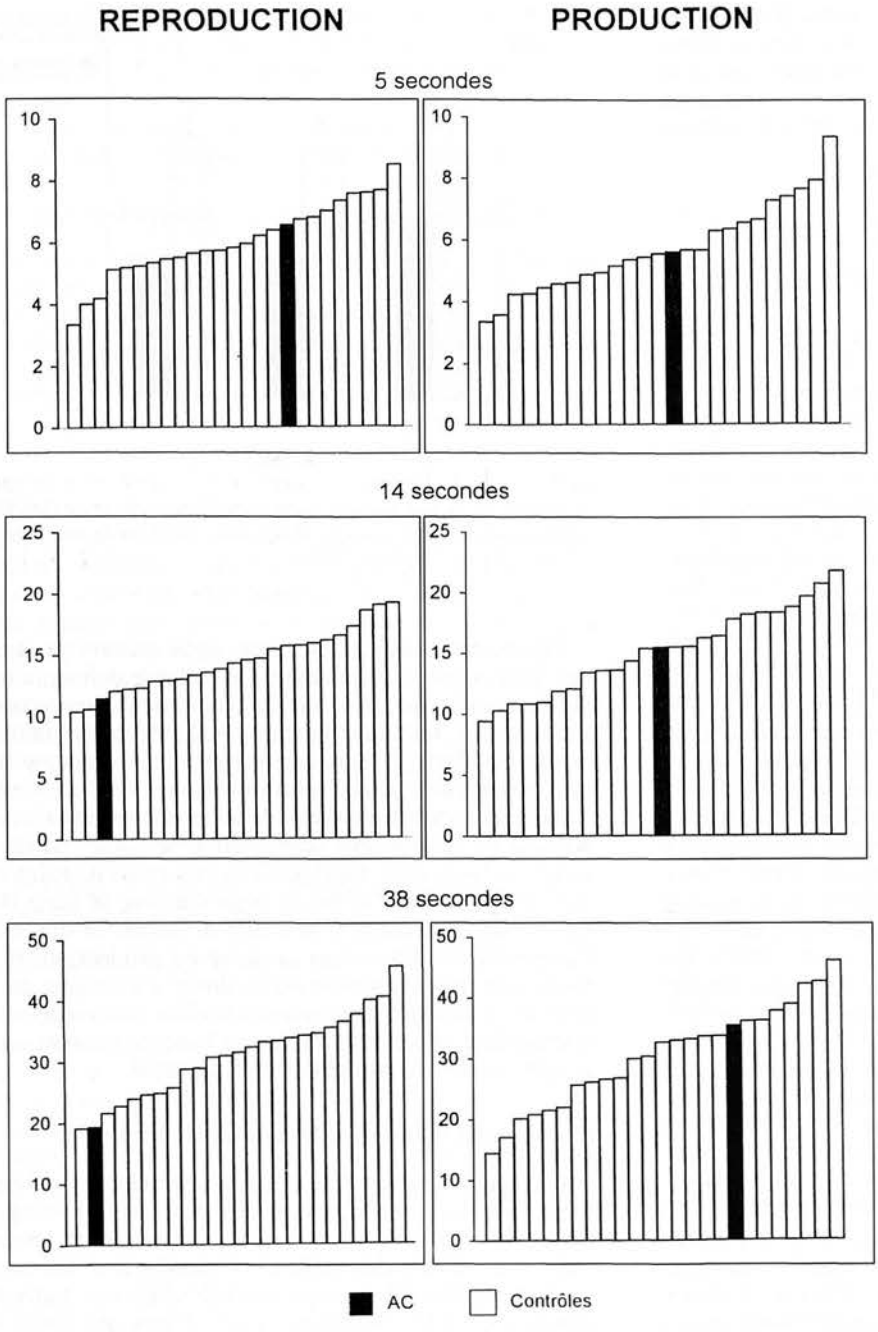

FIG. 5. – Comparaison des évaluations de durées de 5, 14 et 38 secondes données dans deux conditions – reproduction et production – par un patient amnésique (AC) et des sujets témoins.

qu'ils rencontrent à récupérer l'information contenue en mémoire à long terme : pour les durées longues, il y aurait un dépassement des capacités d'un stockage à court terme. Néanmoins, si l'évaluation des durées par les patients amnésiques est limitée en raison d'une récupération en mémoire à long terme altérée, on peut se demander pour quelle raison les reproductions de durées, qui excèdent ce qui peut être contenu dans un stock de mémoire à court terme, n'ont pas toute la même valeur et conservent une certaine échelle relative. Ainsi chez AC le patient, que nous avons étudié, les reproductions de 14 secondes étaient de 11,4 secondes en moyenne et celle de 38 secondes étaient de 19,3 secondes en moyenne. Nous n'avons pas observé de recouvrement entre ces jugements, c'est-à-dire que les estimations de la durée longue n'étaient jamais inférieures à celle de la durée moyenne. Chez un autre patient BW (Williams *et al.*, 1989) les auteurs ont obtenu : 9,7, 11,3 et 19,4 secondes pour 30, 60 et 120 secondes respectivement. L'estimation de durées longues pourrait reposer sur une représentation catégorielle. La gradation en court, moyen et long serait conservée chez les patients amnésiques et la reproduction consisterait à ajouter une certaine valeur à la durée moyenne pour atteindre la durée longue.

En situation de production, nous n'avons pas observé de déficit pour notre patient (AC) dont la mémoire de travail et la mémoire sémantique sont préservées : la représentation en mémoire sémantique de ce qu'est une seconde ou une minute et la mise en œuvre des ressources attentionnelles de la mémoire de travail permettraient le maintien des unités temporelles tout au long de la tâche. En effet, dans la tâche de production il y a continuité dans le processus d'évaluation, il n'y a pas d'interruption dans ce processus comme c'est le cas dans la tâche de reproduction. L'interruption intervenant entre la phase d'encodage et celle de reproduction proprement dite rend nécessaire une récupération en mémoire.

9. Les bases neurales du « timer »

Nous venons d'examiner le rôle que jouent les processus attentionnels et mnésiques dans l'évaluation du temps écoulé, mais une question fondamentale est de connaître la part de spécificité de ces processus dans le traitement de la durée par rapport au traitement d'autres dimensions de notre environnement. Un des moyens d'approcher ce problème est d'étudier les substrats neuraux du « timer » interne, en utilisant notamment les données des études en neuropsychologie et en imagerie cérébrale. En fait, on ne dispose que de données encore très fragmentaires sur ces substrats neuraux, comparativement à l'ensemble des données disponibles sur ceux de la perception visuelle ou du langage. Mais les travaux se multiplient et suscitent actuellement beaucoup d'intérêt. Pour résumer de façon très schématique l'état actuel des connaissances, trois groupes de structures cérébrales seraient impliquées lorsqu'il est crucial que nous évaluions la durée pour effectuer une tâche : ce sont le cervelet, les noyaux gris centraux et le cortex frontal. En ce qui concerne le cervelet, des travaux neuropsychologiques (Ivry *et al.*, 1988 ; Ivry & Keele, 1989) ont révélé une mauvaise discrimination de durées brèves (inférieures à la seconde) et une grande irrégularité des mouvements de la main ou des doigts dans des tâches rythmiques chez des patients cérébelleux. D'autre part, des études en Tomographie par Émission de Positons (TEP) ont mis en évidence une activation du cervelet dans une tâche de discrimination d'intervalles temporels (Jueptner *et al.*, 1995 ; Maquet *et al.*, 1996). Quant aux noyaux gris centraux, les données d'études pharmacologiques ou lésionnelles chez l'animal (pour revue Meck, 1996) montrent des distorsions dans les jugements temporels à la suite de lésions ou de perturbations par des drogues (agoniste-métamphétamine ou antagoniste-halopéridol) de la fonction dopaminergique du système nigro-striatal. Ces données sont cohérentes avec les résultats d'études neuropsychologiques sur des patients parkinsoniens (Malapani *et al.*, 1998). Pour ce qui est du cortex frontal, des travaux pharmacologiques chez l'animal montrent qu'il y a une dégradation des jugements temporels lorsqu'on altère la fonction cholinergique du cortex frontal. De plus, comme nous l'avons décrit ci-dessus (p. 8) de nombreux travaux en électroencéphalographie (EEG) ont montré qu'une onde électrique de polarité négative (la **V**ariation **C**ontingente **N**égative, VCN) se développait sur le scalp au niveau fronto-central, lorsque le sujet est engagé dans une tâche d'estimation de durées courtes (Bruder *et al.*, 1992 ; Casini & Macar, 1996 ; Elbert *et al.*, 1991). Mais, à nouveau, se pose la question de la spécificité de l'implication de ces structures dans le traitement du paramètre « temps » de notre environnement. En effet, on sait que les noyaux gris centraux et le cervelet jouent un rôle dans les mécanismes de contrôle moteur et que les structures frontales sous-tendent les processus attentionnels et mnésiques impliqués dans de nombreuses situations. Nous allons rapporter de façon succincte deux recherches qui visaient à apporter des éléments de réponse à la question de la spécificité.

a) Corrélats électrophysiologiques du traitement de l'information temporelle et de l'information spatiale (Schubotz & Friederici, 1997)

Dans le but d'étudier comment la durée, en tant qu'information temporelle spécifique, est stockée et manipulée en mémoire, Schubotz & Friederici (1997) ont enregistré l'activité électrique cérébrale (ERPs) alors que des sujets devaient maintenir en mémoire de travail une information temporelle ou une information spatiale – durée ou localisation d'un stimulus auditif. Les auteurs postulaient que, si les modèles à composantes multiples de la mémoire de travail sont valides et que les dimensions de base sont traitées séparément par des sous-systèmes spécifiques, des différences topographiques de l'activité ERP devaient être observées en fonction du type d'information maintenue en mémoire. Les résultats confirment cette hypothèse : une activité négative se développe dans la zone pariéto-occipitale du scalp lors du maintien en mémoire de la localisation d'un son et dans la zone frontale pour le maintien de la durée d'un son (Fig. 6). Les auteurs concluent que le lobe préfrontal sous-tendrait les opérations de mémoire de travail impliquées dans le traitement de l'information temporelle.

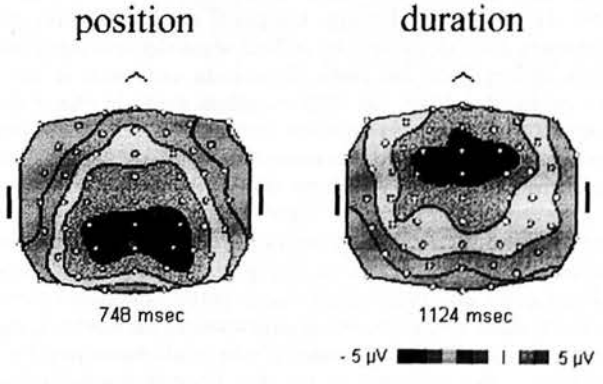

FIG. 6. – Topographie de l'activité électrique cérébrale négative (en noir) lors d'une période de maintien en mémoire de travail d'une information sur la localisation d'un son ou sur la durée de ce son (d'après Schubotz & Federici, 1997).

b) Étude de la spécificité des bases neurales de la perception du temps : études en TEP et en EEG (Maquet et al., *1996 ; Pouthas* et al., *1999)*

Nous avons contrasté deux situations de discrimination : dans la première (décrite ci-dessus p. 8), les sujets devaient mémoriser la durée d'allumage d'une diode (700 ms) qu'on leur présentait à plusieurs reprises (durée modèle ou standard). Ensuite, dans une phase test, ils devaient juger si la durée présentée (490 ms, 595 ms, 700 ms, 805 ms, 910 ms) était la durée standard ou différente de cette durée standard, qu'elle soit plus courte et plus longue. Dans la seconde situation, on leur présentait à plusieurs reprises une intensité standard (15 cd/m^2) qu'ils devaient ensuite discriminer dans une phase test parmi cinq stimuli, le standard lui même et quatre autres niveaux. Il faut souligner que le standard était le même dans les deux conditions (700 ms et 15 cd/m^2). Nous avons enregistré au moyen de la TEP les variations du débit sanguin cérébral par rapport à une situation témoin sans discrimination. Les résultats montrent une activation du cortex préfrontal droit, du gyrus cingulaire, du lobule pariétal droit et des gyri fusiformes dans les deux tâches de discrimination. L'absence de différence entre les zones activées lors des tests de durée et d'intensité (bas de la Fig. 7) serait due à la similitude des processus de traitement de l'information impliqués dans les deux tâches, en d'autres termes l'activation enregistrée serait corrélative des processus attentionnels et des processus mnésiques engagés dans chacune des tâches.

Nous avons ensuite réalisé la même étude en EEG. Des différences ont été observées dans la polarité et la topographie des composantes tardives des potentiels évoqués en fonction de la dimension du stimulus sur laquelle portait la discrimination : une négativité frontale dans la tâche de durée (VCN) et une positivité pariéto-occipitale (P300) dans la tâche d'intensité. La modélisation des générateurs de l'activité électrique au moyen du logiciel BESA (Scherg, 1992) a abouti à la même conclusion que l'étude TEP, à savoir : le réseau neuronal activé lors d'une tâche de discrimination de durée est le même que celui activé lors d'une tâche de discrimination d'intensité. Toutefois, le décours temporel de l'activation de certaines aires de ce réseau diffère sensiblement dans les deux tâches. Ceci est particulièrement vrai pour le cortex préfrontal droit. En effet, pendant toute la phase de comparaison entre le modèle mémorisé et le stimulus test (entre 350 et 800 ms environ) cette structure n'est active qu'en durée (voir haut de la Fig. 8). De plus, on a observé un parallélisme entre le décours temporel de cette activation et l'onde corrélative de l'estimation de la durée (voir Fig. 2 et bas de la Fig. 8). Ces résultats suggèrent que l'aire préfrontale droite serait spécifiquement activée dans une tâche de discrimination de durée. Ceci est cohérent avec les données d'une étude neuropsychologique : des patients ayant des lésions préfrontales droites sont très perturbés quand il s'agit de discriminer des durées brèves ce qui n'est pas le cas de patients ayant le même type de lésions, mais à gauche (Harrington *et al.*, 1998). D'autres études doivent être menées où l'on fera varier la demande attentionnelle et la charge en mémoire pour valider l'hypothèse d'une implication spé-

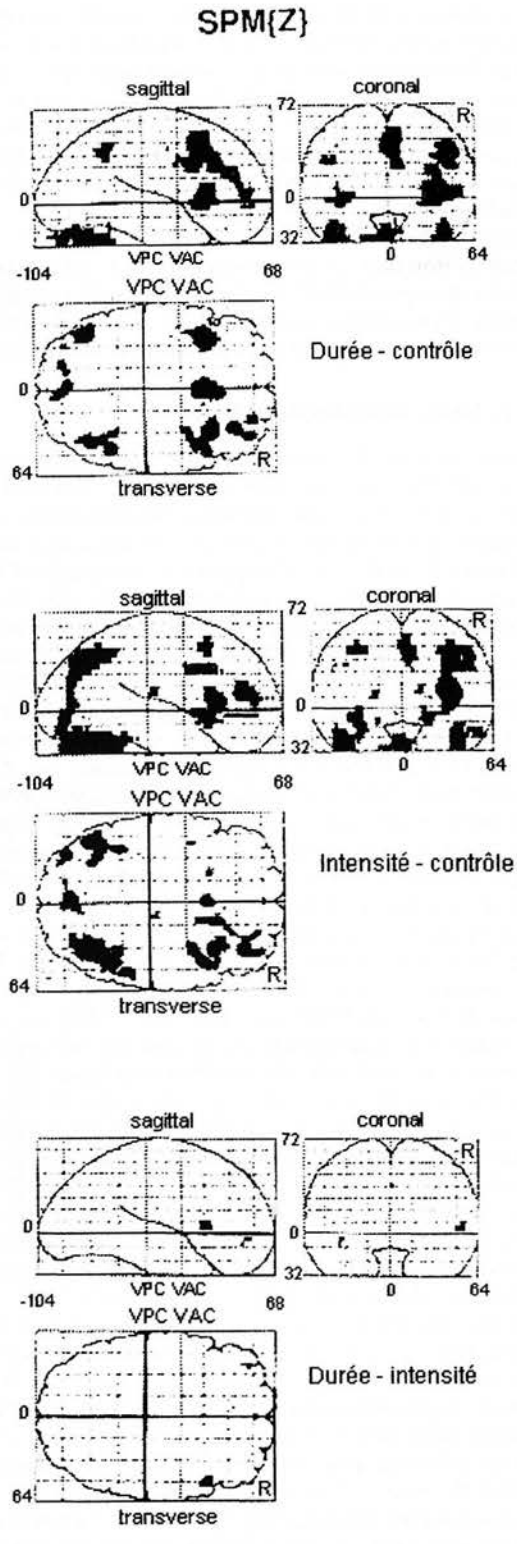

FIG. 7. – Augmentation significative du débit sanguin cérébral lors d'une tâche de discrimination de durée par rapport à une situation témoin (haut de la figure), lors d'une tâche de discrimination d'intensité par rapport à une situation témoin (milieu de la figure), lors de la tâche de discrimination de durée par rapport à la tâche de discrimination d'intensité (d'après Maquet *et al.*, 1996).

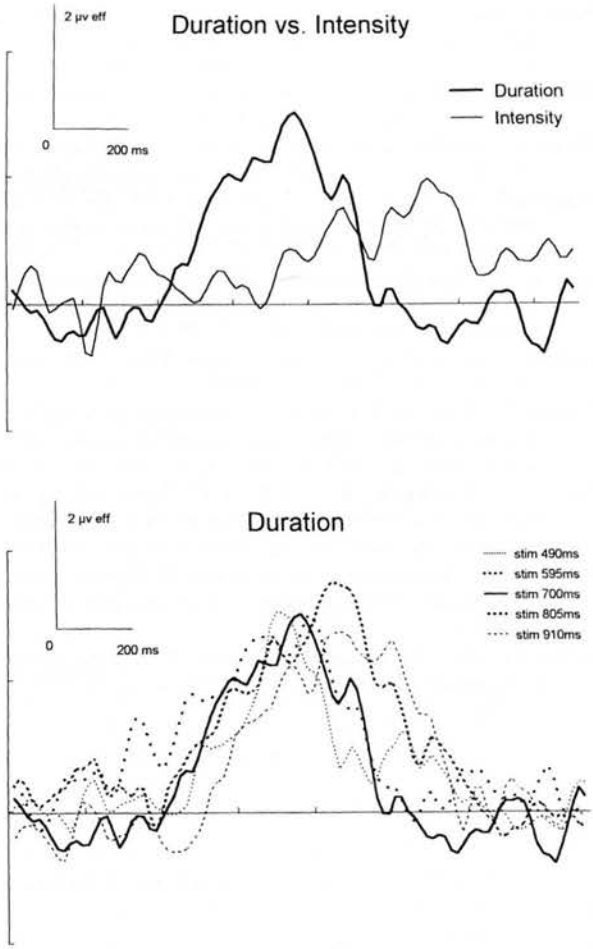

FIG. 8. – Comparaison du décours temporel de l'activité du dipole situé dans le cortex préfrontal droit lors d'une tâche de discrimination de durée et lors d'une tâche de discrimination d'intensité (haut de la figure). Décours temporel de l'activité de ce dipole pour les cinq durées dans la tâche de discrimination de durée (bas de la figure) (d'après Pouthas *et al.*, 1999).

cifique de l'aire préfrontale droite lors de la formation de jugements temporels.

10. CONCLUSION

De la confrontation des études de psychologie cognitive, de neuropsychologie et d'imagerie cérébrale ainsi que de la synthèse de leurs résultats émergera certainement une idée plus claire du temps de la conscience. Mais, si une horloge (des horloges) de la conscience existe(nt), elles sont sans doute « molles » comme celles de Dali, car elles ne marquent pas un temps objectif mais une multitude de temps subjectifs.

BIBLIOGRAPHIE

Block R. A., *Cognitive models of psychological time*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, 1990.

Boltz M. G., Changes in internal tempo and effects on the learning and the remembering of event durations. *J exp Psychol : Learning, Memory and Cognition*, 1994, *20*, 1154-1171.

Bruder G. E., Towey J., Friedman D., Erhan H., Jasiukaitis P. & Tenke C., Lateral asymetries of event-related potential slow waves. *J. Psychophysiol.*, 1992, *6*, 97-110.

Casini L. & Macar F., Prefrontal slow potentials in temporal compared to nontemporal tasks. *J. Psychophysiol.*, 1996, *10*, 225-264.

Church R. M., Properties of the internal clock. In : J. Gibbon & L. Allan (Eds.), *Timing and and time perception*, Academy of Sciences, New York, 1984, *423*, 566-582.

DeCasper A. J. & Sigafoos A. D., The intrauterine heartbeat: a potent reinforcer for newborns. *Infant behavior and Development*, 1983, *6*, 12-25.

Drake C., & Baruch C., 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*, 1995, *4*, 555-569.

Elbert T., Ulrich R., Rockstroh B. & Lutzenberger W., The processing of temporal intervals reflected by CNV-like brain potentials. *Psychophysiology*, 1991, *28(6)*, 648-655.

Gibson J. J., Events are perceivable but time is not. In : J. T. Fraser & N. Lawrence (Eds.), *The Study of Time*, *2* Springer, Berlin, 1975.

Guyau J.-M., *La genèse de l'idée de temps*. Félix Alcan, Paris, 1890.

Harrington D. L. Haaland K. Y. & Knight R. T., Cortical networks underlying mechanisms of time perception. *J Neurosci*, 1998, *18(3)*,1085-1095.

Hicks R. E., Prospective and retrospective judments of time: A neurobehavioral analysis. In : F. Macar, V. Pouthas & W. J. Friedman (Eds.), *Time, Action and Cognition: Towards Bridging the Gap*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992, 119-129.

Hicks R. E., Miller, G. W. & Kinsbourne, M., Prospective and retrospective judgments of time as a function of information processed. *Am J Psychol*, 1976, *89*, 719-730.

Ivry R., Keele S. W. Timing functions of the cerebellum. *Journal of Cognitive Neuroscience* 1989, *1*,136-152.

Ivry R., Keele S.W. & Diener H., Differential contributions of the lateral and medial cerebellum to timing and to motor execution. *Exp Brain Res*, 1988, *73*, 167-180.

Janet P., *L'évolution de la mémoire et de la notion de temps*. Chahine, Paris, 1928.

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

Klein, E. *Le temps*. Flammarion « Dominos », Paris, 1995.

Macar F., Vidal F., & Casini L., The supplementary motor area in motor and sensory timing : evidence from slow brain potential changes. *Exp. Brain Res.*, 1999, *125*, 271-280.

Malapani C., Rakitin B. C., Levy R., Meck W. H., Deweer B., Dubois B. & Gibbon J., Coupled temporal memories in Parkinson's disease: a dopamine-related dysfunction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1998, *10(3)*, 316-331.

Maquet P., Lejeune H., Pouthas V., Bonnet M., Casini L., Macar F., Timsit-Berthier M., Vidal F., Ferrara A., Degueldre C. *et al.*, Brain activation induced by estimation of duration: a PET study. *Neuroimage*, 1996, *3*, 119-126.

Meck W. H., Selective adjustment of the speed of internal clock and memory processes. *J exp Psychol : Animal Behav. Processes*, 1983, *9*, 171-201.

Meck, W. H., Neuropharmacology of timing and time perception. *Cognitive Brain Research*, 1996, *3*, 227-42.

Mendelson M. J., & Ferland M., Auditory-visual transfer in four-month-old infants. *Child Development*, 1982, *53*, 1022-1027.

Ornstein R. E., *On the Experience of Time*, Penguin, Middlesex, England, 1969.

Perbal S., Pouthas V. & Van der Linden M. Estimation de la durée et systèmes de mémoire : Étude d'un patient amnésique. *Revue Neurologique*, 1999, 155.

Pouthas V., Temporal regulation of behavior in humans : A developmental approach. In : D. E. Blackman & H. Lejeune (Eds.), *Behaviour Analysis in theory and practice: Contributions and controversies*, Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1990, 33-52.

Pouthas V., Ferrandez A. M., Fiori N., Bouchet F., & Renault B., Brain potentials evoked by processing of temporal information. *Journal of Psychophysiology*, 1998, *12 (3)*, 309.

Pouthas V., Garnero L., Ferrandez A. M. & Renault B., Specificity of the time perception neural bases: Spatial and temporal imaging of brain activity during visual discrimination tasks using fusion of ERP and PET data. Submitted to *Hum Brain Mapping*, 1999.

Provasi J., *Capacités et apprentissages de régulations temporelles chez le nourrisson dans l'activité de succion*. Thèse de Doctorat, Université René Descartes Paris, 1988.

Rammsayer T., Is there a common dopaminergic basis of time perception and reaction time ? *Neuropsychobiology*, 1989, *21*, 37-42.

Rammsayer T., On dopaminergic modulation of temporal information processing. *Biol. Psychol.*, 1993, *36*, 209-222.

Richards W., Time reproductions by H.M. *Acta Psychologica*, 1973, *37*, 279-282.

Richelle M., L'animal et le temps. In : Fraisse *et al.* (Eds.), *Du Temps Biologique au Temps Psychologique*. Presses Universitaires de France, 1977, 73-128.

Rovee-Collier C., La mémoire du nourrisson. In : V. Pouthas & F. Jouen (Eds.), *Les comportements du bébé : expression de son savoir*, Mardaga, Liège, 1993, 127-145.

Scherg M., Functional imaging and localization of electromagnetic brain activity. *Brain Topogr*, 1992, *5*, 103-111.

Thelen E., Rhythmical behavior in infancy: an ethological perspective. *Developmental Psychol.*, 1981, *17*, 237-257.

Schubotz R. & Friederici A. D., Electrophysiological correlates of temporal of temporal and spatial information processing. *NeuroReport*, 1997, *8*, 1981-1986.

Treisman M., Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the « internal clock ». *Psychological Monographs*, 1963, *77*, N° 576.

Vanneste S. & Pouthas V., Timing in aging: The role of attention. *Exp Aging Res*, 1999, *25(1)*, 49-67.

Vanneste S., Perbal S. & Pouthas V., Estimation de la durée chez des sujets jeunes et âgés : rôle des processus attentionnels et mnésiques. *L'Année Psychologique*, 1999, *99*, 385-414.

Vanneste S., Pouthas V, & Wearden J. H., Temporal control of rhythmic performance: A comparison between young and old adults. Submitted to *Exp. Aging Research*, 1999.

Williams J. M., Medwedeff C. H. & Haban G. Memory disorders and subjective time estimation. *J. Clin. and Exp. Neuropsychol.*, 1989, *11*, 713-723.

Wolff P. H., The role of biological rhythms in early psychological development. *Bulletin of the Menninger Clinic*, 1967, *31*, 197-218.