Le rôle de l'attention dans le contrôle de l'interférence : une approche comportementale et neuropsychologique

Isabel Suárez del Chiaro

▶ **To cite this version:**

Isabel Suárez del Chiaro. Le rôle de l'attention dans le contrôle de l'interférence : une approche comportementale et neuropsychologique. Neurosciences [q-bio.NC]. Aix Marseille Université, 2013. Français. NNT : 2013AIXM4785 . tel-01446155

HAL Id: tel-01446155
https://amu.hal.science/tel-01446155

Submitted on 21 Feb 2017

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.

AIX-MARSEILLE UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES DE LA VIE ET DE LA SANTE

Le rôle de l'attention dans le contrôle de l'interférence : une approche comportementale et neuropsychologique.

THESE

Présentée et soutenue publiquement le 12 décembre 2013 par

Isabel Suárez Del Chiaro

En vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité : Neurosciences

Membres du jury :

Dr. Laurence Casini. *Directrice de Thèse*. Maître de Conférences à l'Université d'Aix Marseille.
Dr. Thierry Hasbroucq. *Co-Directeur de Thèse*. Directeur de Recherches au CNRS, Marseille.
Dr. Wery Van den Wildenberg. *Rapporteur*. Assistant Professor, University of Amsterdam, Pays-Bas.
Dr. Juan Lupiañez. *Rapporteur*.Professor. University of Granada, Espagne.
Dr. Samuele Cortese. *Examinateur*. Pédopsychiatre. University of Cambridge,UK.

« Se donner du mal pour les petites choses,
c'est parvenir aux grandes, avec le temps».

Samuel Beckett

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement Laurence Casini, ma directrice de thèse, même si ces quelques mots ne sont pas suffisants pour exprimer toute ma gratitude. Et bien ! J'ai eu beaucoup de chance de travailler avec toi Lolo! Ça a été un véritable plaisir de faire un si dur chemin à tes côtes. Je te remercie pour ta disponibilité, les compétences scientifiques que tu as partagé avec moi, tes qualités humaines, ta rigueur professionnelle : (Isa, il faut que ce soit parfait !..), pour les innombrables échanges (Isa, je pense que tu n'as pas compris !...), pour m'avoir initiée au monde de la psychologie cognitive (Cette version de l'article est meilleure, mais il manque encore des choses!) et les neurosciences (Il faut que tu aies finit de marquer l'EMG pour le mois prochain!...) et surtout pour la confiance que tu m'accordé (Isa, tu m'a envoyé la mauvaise version! celle-là n'est pas corrigée …). Ah ! Laurence, tu as pour toujours marque ma vie privée et professionnelle, j'espère que tu ne m'oublieras pas et j'espère que l'on aurra d'autres aventures ensemble !

Je tiens à remercier mon « *Chef chéri* » Thierry Hasbroucq, j'ai eu de la chance de travailler avec toi. Merci de m'accueillir au sein de cette équipe et merci pour la confiance que tu m'as accorde. Merci aussi de ta sagesse, de tes conseils, de ta disponibilité. Merci de m'avoir appris que les erreurs sont nécessaires pour notre apprentissage (Isa, tu as fait une connerie! bon, ce n'est pas grave…) et que les chemins difficiles sont nécessaires pour qu'on puisse grandir en tant que personne. (Isa, il faut souffrir dans la vie !...) Eh oui ! Ce sera un plaisir de continuer à travailler avec toi!

I would like to thank all members of the Jury for having kindly agreed to evaluate my work. I am honored!

Je tiens à remercier Bruno Poucet de m'avoir accueilli au sein du Laboratoire de Neurosciences Cognitives et de m'avoir procuré un très bon cadre scientifique (Il faut que vous assistiez au séminaire, ça nous coûte cher !) et une excellente ambiance (C'est quand le prochaine pot ?).

Merci à Boris Burle, pour toutes les fois où je suis venu te voir pour te poser « une » question. Merci pour les nombreux conseils que tu m'as donné. « Isa, pour arriver à comprendre quelque chose de grand il faut d'abord comprendre quelque chose de petit ». On avait discuté de l'effet Simon bien sur! Merci aussi de avoir partagé ta passion et ta rigueur scientifique (Isa, Tu devrais essayer de faire un test *T* à la main, tiens la formule!).

Merci à Franck Vidal, pour les discussions très enrichissantes que nous avons partagées. J'ai toujours admire la manière simple, calme et convaincant avec laquelle tu m'expliquais les choses (A tel point, que j'ai bien fait une thèse sur le rôle de l'attention dans le contrôle de l'interférence).

Merci Karen, pour toute l'aide que tu m'as aporté pendant cette thèse. Merci aussi pour ton amitié qui est un cadeau précieux que je vais bien garder. (dans une boite magique !)

Merci Marianne Amalric pour nos échanges autour de la dopamine et des patients. Merci aussi pour tes qualités humaines et les conversations toujours enrichissantes que nous avons souvent entamées.

Une gros merci à toi chère Luciana qui t'ai toujours battue avec l'administration du CNRS pour que nous puisons être rémunérés à temps et que nos missions se déroulent dans les meilleurs conditions.

Merci à Nicolas, Mathieu, Matthew, Sarah, Anne-Laure, Leny, Jasmine, Rugile, Davide, Eléonore, Paul, Candie, Brandon, Seb, Laure, Manon et MG. Je tiens à vous dire que si je pars avec quelque chose de cette thèse c'est avec tous les souvenirs ces bons moments que nous avons vécu ensemble, ça a été une plaisir de vous avoir rencontrés, merci les amis !

En particulier, merci à Nicolas (Mon frère de thèse) Mathieu (ma peste préféré!) pour les enrichissantes discussions scientifiques et existentiels que nous avons parfois éntames. Matthew Thanks a lot for helping me with my *technical* problems!

Merci à Jennifer Coull pour les livres et articles qu'elle m'accorde pour la rédaction de cette thèse.

Merci à chacun des membres du LNC, vous qui faites de ce laboratoire un endroit très sympathique. ce fût un véritable plaisir d'avoir pu évoluer dans ce laboratoire au milieu de plusieurs thématiques telles que, la navigation spatiale, la mémoire, la musique, la dynamique sensori-motrice, les ganglions de la base, les noyaux sous-thalamiques, l'attention et le temps. Merci aussi pour vos geste quotidiens de gentillesse qui rendent la journée plus agréable (J'en remplirais bien des tonnes pour chacuns, mais je n'ais pas la place, malheureusement les gens doivent aussi lire le contenu de cette thèse)

Merci à ceux qui sont partis, en particulier à Christelle Baunez, merci pour les conversations qui m'ont toujours apportes des connaissances. Rémy, merci pour les programmes que tu m'as fourni et nos conversations politiques.

Merci à Franck Chaillan et Francesca Sargolini, pour leur bonne humeur et les moments décontractés que j'ai passé avec vous.

Gracias al grupo de Neurosciencias de la Universidad de Antioquia, espécialmente, a los doctores Francisco Lopera y David Pineda por su apoyo durante mi estancia en Medellin.

Gracias a mi familia de Francia, Mayi, Jean Pierre y Louis, por haberme hecho parte de sus vidas. Les agradezco todo lo que ustedes me han apoyado en este camino.

Gracias amigas, Lore, Luzma, Fabi, Lina, Ana, por nuestras tardes de « dossiers »en las que recobramos la alegría caracteristica de nuestras tierras. Niñas ! Que delicia es poder reirse de la vida!!! Gracias!

A mi familia, gracias ! En especial mis hermanos, quiero agradecerles todo su apoyo y amistad. Gracias por nuestros grupos de « desocupadas » y « Flia Suarez » y esos mensajes cotidianos que me regalan la fuerza necesaria para seguir adelante, sobretodo las fotos y videos de los pinderitos. Gracias Toi ! por tus correcciones de Ingles y Javi por los chistes flojos.

A mis padres, gracias por absolutamente todo ! espero que este pequeño « logro » pueda de alguna manera compensar la tristeza que es estar lejos de ustedes.

Finalmente, quiero agradecerle a la persona que se merece todos los agradecimientos juntos ! a ti Pierre-Alexandre, mi compañero de viaje, mi mejor amigo y gran amor, gracias por ser el motor de mi vida !

Table des matières

AVANT PROPOS 6

Introduction générale 8

Chapitre I 9

Traitement de l'information et contrôle de l'interférence. 9

1. Quelques mots sur le traitement de l'information 9

2. La contribution de la chronométrie mentale 10

3. Le contrôle de l'interférence et la tâche de Simon 13

4. Interprétations théoriques de la diminution de l'effet d'interférence avec l'allongement des TR 27

5. Les effets séquentiels 31

Chapitre II 32

Le Trouble déficitaire de l'attention avec/ou sans hyperactivité (TDA/H) 32

1. Evolution de l'étiologie du TDA/H au cours de l'histoire 32

2. Caractéristiques diagnostiques du TDA/H 34

3. Les aspects cliniques du TDA/H 36

4. Un survol des théories explicatives 37

5. Le TDAH chez l'adulte 46

6. Substrats neurobiologiques du TDAH 47

Chapitre III 52

L'ATTENTION 52

1. La notion d'attention 52

2. Les fonctions de l'attention 53

3. La notion d'attention divisée et de ressources attentionnelles 60

4. Substrats neurobiologiques de l'attention 67

5. Le rôle de l'attention dans l'estimation du temps 71

Contribution expérimentale 76

Contribution expérimentale 1 79

A dual-task paradigm to study the interference reduction in the Simon task. 79

Contribution expérimentale 2 113

New tools for evaluating the control interference in adults with ADHD. 113

Contribution expérimentale 3 142
The cognitive structure of time estimation impairments in adults with ADHD. 142

Discussion générale 165
Discussion générale 166
1. L'attention joue-t-elle un rôle dans le contrôle de l'interférence ? 166
2. Que nous apprennent les patients avec un TDA/H sur le contrôle de l'interférence ? 172
3. Que nous apprennent ces études sur le TDA/H? 177

Perspectives et projets 181
1. Le contrôle de l'interférence. 182
2. Le Trouble déficitaire d'attention et hyperactivité (TDA/H) 184
3. Généralisation des outils utilisés à d'autres pathologies du contrôle cognitif 186

Bibliographie 187

AVANT PROPOS

Le contrôle de l'interférence est à l'œuvre dans nos actions de tous les jours. Il nous permet de sélectionner les actions pertinentes pour la réalisation d'un but dans un environnement saturé d'informations provenant de sources diverses. Néanmoins, la question de savoir si ce processus nécessite des ressources attentionnelles ou pas reste posée. Pour y répondre, nous avons organisé notre travail en deux parties, la première basée sur une approche comportementale s'intéresse au contrôle de l'interférence en situation de restriction attentionnelle (protocole de double-tâche) et la deuxième centrée sur l'étude de patients étudie ce même contrôle chez des individus présentant un trouble de l'attention avec hyperactivité (TDAH).

Ce manuscrit se décompose en trois parties. La première, introductive, comprend elle-même trois chapitres, chacun présentant les éléments de base essentiels à la compréhension des hypothèses et des protocoles développés dans la partie expérimentale. Le premier chapitre décrit les principales notions et modèles en lien avec le traitement de l'information et le contrôle de l'interférence ainsi que les outils méthodologiques qui y sont liés. Dans un second chapitre, nous avons présenté quelques informations concernant le TDA/H. Le troisième chapitre est consacré aux processus attentionnels.

La deuxième partie de cette thèse expose les contributions expérimentales sous la forme de trois articles expérimentaux. Le premier article regroupe 4 expériences comportementales utilisant le paradigme de la double tâche et a pour objectif l'étude de la relation existant entre attention et contrôle de l'interférence, il fait l'objet d'une soumission à *Experimental Psychology*. Le deuxième article, en préparation en vue d'être soumis à *Neuropsychology,* compare les capacités de contrôle de l'interférence chez des patients adultes présentant un

TDA/H à celles d'un groupe d'adultes contrôles et met en évidence l'intérêt d'utiliser à la fois la dynamique temporelle des processus et l'activité électromyographique (EMG). Finalement, le troisième article, sous presse dans *Cognitive Neuropsychology*, interprète les déficits de patients avec un TDA/H dans une tâche de bissection temporelle dans le cadre du modèle de l'horloge interne.

Enfin, ce mémoire se termine par une dernière partie qui correspond à une discussion générale et à la présentation de quelques perspectives de recherche.

Introduction générale

Chapitre I

Traitement de l'information et contrôle de l'interférence.

1. Quelques mots sur le traitement de l'information

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués dans le cadre de la théorie du traitement de l'information, largement influencée par le modèle de communication de Shannon et Weaver (1948). Ce modèle apporte pour la première fois une notion quantifiable de la quantité d'informations transmises dans un système de communication, l'unité de mesure étant le bit. Il propose également que lorsqu'une source émet un message, celui-ci est transformé en signal susceptible d'être transporté par un canal, puis décodé par un récepteur qui reconstitue le message à partir du signal.

Ces travaux ont constitué un repère incontournable dans l'histoire de la psychologie cognitive et ont largement influencé les psychologues dans leur manière d'envisager le traitement de l'information par le cerveau, qui l'ont alors fortement assimilé à un ordinateur. Les différents modèles ont donc abouti à une conception selon laquelle, lors de sa transmission, l'information subissait une série de transformations internes pour aboutir à la production d'une réponse. Nous inscrivant dans cette lignée, nous considérons que le système nerveux reçoit en entrée une information sensorielle, le stimulus, qu'il transforme puis stocke en représentations dites «transitoires ou complexes» pour finalement les convertir en un comportement moteur déterminé, la réponse. L'ensemble des transformations ayant lieu entre le stimulus et la réponse constitue la chaîne sensori-motrice.

On suppose que le traitement de l'information à l'entrée et à la sortie est réalisé par le système nerveux périphérique, tandis que le traitement intermédiaire est réalisé par le système nerveux central, ce qui a permis d'établir une distinction entre les étapes dites périphériques, qui sont

les étapes sensorielles et celles d'exécution de la réponse, et les étapes de traitement intermédiaire dites «centrales» (Luce, 1986; Sander, 1998).

La structure de ces opérations internes n'étant pas directement observable, elle a longtemps été considérée comme opaque, on parlait alors de « boîte noire ». Mais actuellement l'organisation de ces opérations peut être inférée à partir de certains indices comportementaux et physiologiques qui sont quantifiables. Ainsi, pour mieux comprendre la nature de certaines de ces opérations internes, des outils comportementaux et électrophysiologiques ont été utilisés dans cette thèse. Nous les présenterons plus en détails dans les parties suivantes.

2. La contribution de la chronométrie mentale

La chronométrie mentale est un paradigme de la psychologie expérimentale qui permet d'étudier le décours temporel du traitement de l'information par le système nerveux. L'impact important de cette approche sur les travaux d'aujourd'hui provient, en grande partie, des travaux de recherche menés dans les années 1860 par le médecin et professeur en physiologie F.C. Donders (Donders, 1868). L'utilisation des protocoles expérimentaux de temps de réaction mettant en œuvre la contrainte de vitesse associés à la méthode soustractive ont été déterminants pour inférer le temps minimal nécessaire aux opérations mentales ayant lieu entre un stimulus et une réponse.

L'approche chronométrique utilise le temps de réaction (TR) comme variable dépendante. Cette variable comportementale correspond à l'intervalle de temps qui s'écoule entre la présentation d'un stimulus sensoriel et l'amorce de la réponse, lorsque cette réponse doit être fournie le plus rapidement possible, c'est-à-dire sous pression temporelle. Du fait de la contrainte temporelle, on considère alors que le TR est une mesure quantifiable du temps nécessaire à l'élaboration d'une réponse par des processus mentaux non observables. En

d’autres termes, pour réaliser correctement la tâche demandée, le sujet doit réaliser un certain nombre d’opérations mentales organisées en séquence temporelle. L’objet de la chronométrie mentale est l’analyse de l’organisation dynamique de ces opérations mentales à l’aide de la mesure du TR.

Suite notamment aux travaux de Donders, il est maintenant relativement admis que le nombre d’étapes intermédiaires entre le stimulus et la réponse dépend de l’incertitude à l’égard des événements sensoriels et moteurs. Dans les protocoles de TR, on peut distinguer les tâches de TR simple et les tâches de TR de choix. Dans la tâche de TR simple, il n’existe pas d’incertitude événementielle, c'est-à-dire que le sujet connaît à l’avance le stimulus qui sera présenté et la réponse motrice à produire. A la différence, dans les tâches de TR de choix, il existe une incertitude événementielle car le sujet ne connaît pas à l’avance la réponse qui devra être produite puisque plusieurs réponses seront possibles en fonction des stimuli présentés. Il est classiquement rapporté que les TR des sujets sont plus rapides dans les tâches de TR simple que dans les tâches de TR de choix. Pour expliquer cette différence, il a été proposé qu’un nombre différents d’étapes était impliqué dans les deux situations. Dans les tâches où le sujet connaît à l’avance la réponse qu’il doit produire (TR simple), on distingue simplement trois étapes de traitement : une étape sensorielle, une étape décisionnelle et une étape d’exécution de la réponse. En revanche, dans les tâches où le sujet ne connaît pas à l’avance la réponse qu’il doit fournir (TR de choix), le traitement se décompose classiquement en cinq étapes : 1/ détection du stimulus, 2/ identification du stimulus, 3/ sélection de la réponse, 4/ programmation de la réponse, 5/ exécution de la réponse motrice (Theios, 1975).

Un point important cependant avec ces protocoles de TR est de ne pas oublier que toutes ces inférences sont basées sur le fait que le sujet doit donner sa réponse le plus rapidement possible tout en commettant le moins d’erreurs possible. En effet, on admet que le TR

représente le temps minimal nécessaire au sujet pour fournir une réponse adéquate du fait de la pression temporelle à laquelle il est soumis. Ceci implique que dans le traitement des résultats de TR, le taux d'erreurs est également une variable importante car elle peut renseigner sur les éventuels changements de stratégie adoptés par les sujets. En effet, il faut absolument s'assurer que le sujet a bien obéi à l'impératif de vitesse car il peut choisir de ralentir pour faire moins d'erreurs ou réciproquement de faire plus d'erreurs pour ne pas ralentir. Il est bien connu que la relation entre le TR moyen et la précision de la réponse suit une courbe dite « d'échange vitesse-précision » (Figure 1). Il arrive donc que la manipulation de certains facteurs affectant le TR entraîne également un changement de stratégie du participant vis-à-vis de ce compromis entre la vitesse et la précision. C'est pour cela qu'il est important d'étudier les variations de taux d'erreurs afin de s'assurer que les variations observées sur le TR ne proviennent pas d'un changement de stratégie.

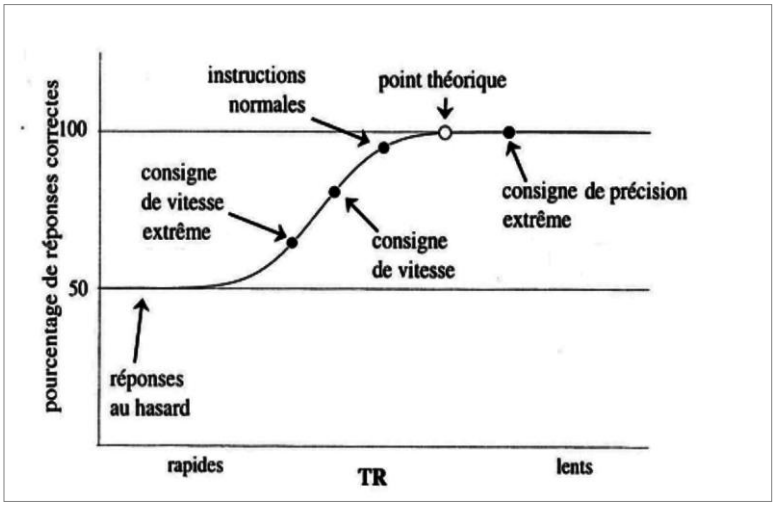


Figure 1. Courbe théorique d'échange vitesse-précision (« speed-accuracy-tradeoff ») : pourcentage de réponses correctes en fonction du TR.

3. Le contrôle de l'interférence et la tâche de Simon

Si l'on revient à des situations de la vie courante, on peut aisément se rendre compte que les situations sont souvent plus complexes que celles correspondant à des TR simple ou TR de choix. En effet, tous les jours nous devons nous adapter de manière efficace à la nouveauté et à la complexité de certains stimuli de l'environnement. Par exemple, imaginons que nous conduisons une voiture à vive allure et que de façon inattendue un piéton traverse la rue, alors nous sommes obligés d'adapter notre comportement pour éviter un accident. Or, cette adaptation comportementale n'est pas si simple et doit faire appel à la mise en jeu de mécanismes de contrôle (Baddeley & Delia Sala, 1996; Cohen, Dunbar & McClelland, 1990; Norman & Shallice, 1986).

En effet, si nous reprenons notre exemple, ces mécanismes interviendraient pour nous aider à focaliser notre attention sur les caractéristiques pertinentes du stimulus inattendu (par exemple, la position du piéton, la distance nous séparant de ce piéton, etc.) et inhiber les informations perceptuelles liées au contexte mais inappropriées (par exemple, la musique ou la radio) et/ou inhiber l'activation de comportements moteurs concurrents et inappropriés (par exemple, l'appui du pied sur l'accélérateur). L'activation adéquate de ces mécanismes de contrôle se traduirait alors par un déclenchement rapide de la bonne réponse motrice, ici l'appui sur la pédale de frein.

Les connaissances acquises à ce jour à propos de ces mécanismes de contrôle reposent sur l'utilisation de certaines méthodes expérimentales et d'indicateurs chronométriques et physiologiques plus particulièrement appliqués à l'étude de la performance dans des tâches de TR de choix. Parmi les différentes tâches de TR de choix les plus fréquemment utilisées pour étudier le contrôle de l'interférence, on trouve les tâches de Stroop (Stroop, 1935), d'Eriksen (Eriksen & Eriksen, 1974) et de Simon (Simon, 1967). Dans le cadre de cette thèse, nous

avons utilisé uniquement la tâche de Simon, c'est pour cela que nous nous concentrerons sur ce paradigme dans le paragraphe suivant.

3.1. Le paradigme de la tâche de TR de Simon

Cette tâche et son singulier effet ont été présentés pour la première fois en 1967 par Simon et Rudell. Dans une version classique de la tâche de Simon, les participants doivent répondre le plus rapidement possible et en faisant le moins d'erreurs possible, à la caractéristique pertinente du stimulus, très souvent la couleur, le stimulus apparaissant soit à gauche, soit à droite d'un point de fixation central. La réponse à fournir est un appui de la main gauche ou de la main droite en fonction de la consigne préalablement donnée au sujet par l'expérimentateur (par exemple, répondre avec la main droite si la couleur du stimulus est verte et avec la main gauche si le stimulus est rouge). Dans cette tâche, on distingue donc deux types d'association stimulus-réponse: si le stimulus apparaît du côté ipsilatéral à la réponse préalablement établie, l'association est dite « compatible » et si le stimulus apparaît du côté controlatéral à la réponse, l'association est dite « incompatible » (Figure 2). Le résultat caractéristique de cette tâche est que le TR s'allonge et le taux d'erreurs augmente dans les essais incompatibles par rapport aux essais compatibles. Ce résultat qui a rapidement intéressé une large communauté scientifique est aujourd'hui connu sous le nom de « effet Simon» ou encore « effet de compatibilité » ou « effet d'interférence ».

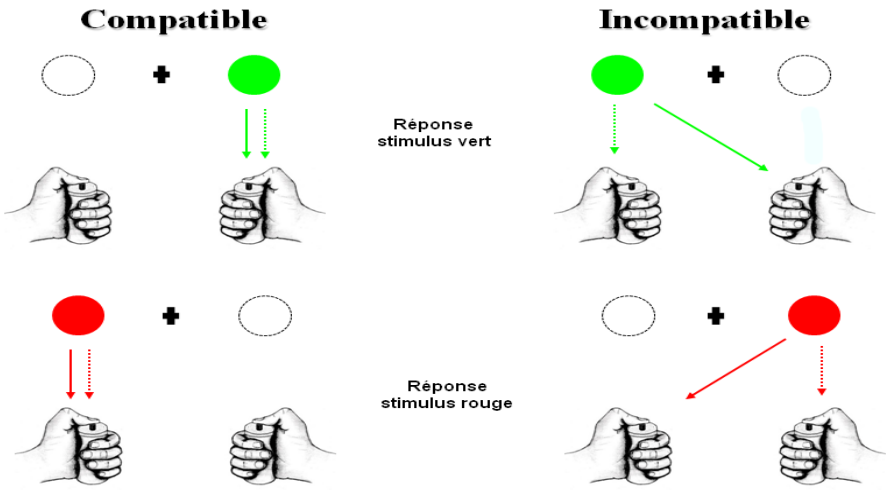


Figure 2.Tâche de Simon. Dans la version détection de la couleur de la tâche de Simon (représentée ici), le sujet a pour consigne de répondre à la couleur du stimulus (symbolisée par les ronds vert et rouge) et d'ignorer sa localisation spatiale. Dans cette illustration, les flèches pleines (verte et rouge) représentent la réponse associée à la couleur du stimulus et les flèches pointillées (vertes et rouges) représentent l'effet de la position du stimulus sur l'activation de la voie directe.

De nos jours, le modèle prépondérant pour rendre compte de cet effet est celui de la « double route » (de Jong et al., 1994; Eimer et al., 1995; Kornblum et al., 1990; Ridderinkhof, 2002a). Selon ce modèle, les attributs différents du stimulus que sont sa localisation et sa couleur sont traités par deux routes fonctionnellement distinctes et parallèles, une route directe et plutôt rapide et une autre route indirecte et plus lente, chaque route activant une des deux réponses définies comme possibles (Figure 3). L'attribut pertinent du stimulus, par exemple sa couleur, active la réponse requise par la route lente de manière contrôlée tandis que la position spatiale du stimulus, attribut non pertinent, amorce la réponse ipsilatérale par la route rapide et automatique (Kornblum et al., 1990; de Jong et al., 1994; Kornblum, 1994). Ainsi quand l'association stimulus-réponse est compatible, la position du stimulus amorce la réponse requise par la route rapide en facilitant ainsi son exécution, alors que lorsque l'association

stimulus-réponse est incompatible, la position du stimulus amorce, par la route rapide, la réponse non requise, tandis que la réponse requise est activée par la route lente. Les deux réponses se retrouvent donc en compétition.

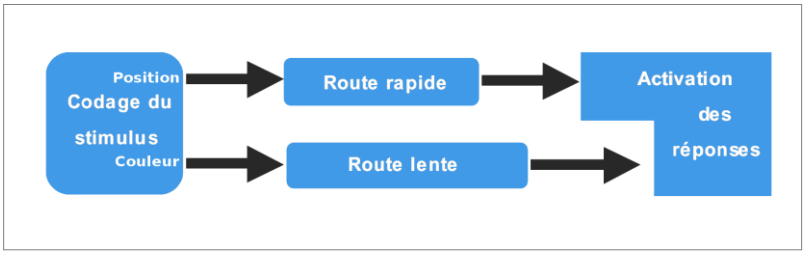


Figure 3. Schéma du modèle de la double route. Dans la tâche de Simon, la position du stimulus active la réponse ipsilatérale par la route directe et l'attribut pertinent du stimulus (couleur) active la réponse requise par la route lente (Adapté de Kornblum et al., 1990).

3.2. Analyses de distributions et dynamique de l'effet de compatibilité

Il est clair que dans la grande majorité des études les conclusions sont tirées de l'analyse des moyennes et écarts-types des temps de réaction et des taux d'erreur. Mais à côté de ces indices, il existe un outil particulièrement intéressant qui permet l'étude de la dynamique de ces deux variables : les analyses de distribution. Les indices obtenus grâce à ces analyses sont beaucoup plus fins que les simples indices de tendance centrale. En effet, on observe que dans certaines conditions expérimentales, l'absence d'effet sur la moyenne des temps de réaction ou des taux d'erreur ne reflète pas une absence d'effet du facteur manipulé, mais simplement l'impossibilité de mettre en évidence un effet en utilisant uniquement ces deux indices. L'analyse de distributions qui repose sur la « vincentisation » a été proposée initialement par Vincent (1912) et ensuite développée par Ratcliff (1979) et elle permet d'obtenir une estimation fiable de la distribution des observations obtenues dans une condition expérimentale.

3.2.1. L’analyse des distributions de temps de réaction (TR)

Classiquement, on représente la distribution d’un ensemble d’observations par la fonction de densité de probabilité ou par l’intégrale de cette fonction, la fonction de probabilité cumulée. Pour un ensemble de TR, la fonction de densité de probabilité fournit la probabilité que la réponse se produise pour une valeur donnée du TR. Selon cette technique, les temps de réaction sont d'abord classés en ordre croissant pour chaque sujet et pour chacune des conditions expérimentales utilisées dans la tâche. Ensuite les TR sont divisés en classes de même effectif (des quantiles) et la moyenne des TR est calculée pour chacune de ces classes. Le calcul du TR moyen de chaque quantile permet d’obtenir une distribution qui correspond à la fonction de probabilité cumulée (Figure 4A). Un moyen plus aisé de visualiser la dynamique temporelle de la différence entre les deux conditions expérimentales étudiées, c’est-à-dire comment cette différence évolue avec le temps, est de tracer des courbes de différence ou « courbe-delta » (Figure 4B). La courbe-delta représente la différence entre deux conditions expérimentales (par exemple, compatible ou incompatible) en fonction du temps de réaction (de Jong et al., 1994; Ridderinkhof et al., 2002a, 2002b). Lorsque la courbe-delta révèle des différences d’un quantile à l’autre, nous considérons que l’effet du facteur manipulé varie en fonction du TR, si elle ne varie pas d’un quantile à l’autre, nous considérons que l’effet manipulé est similaire pour l’ensemble des TR.

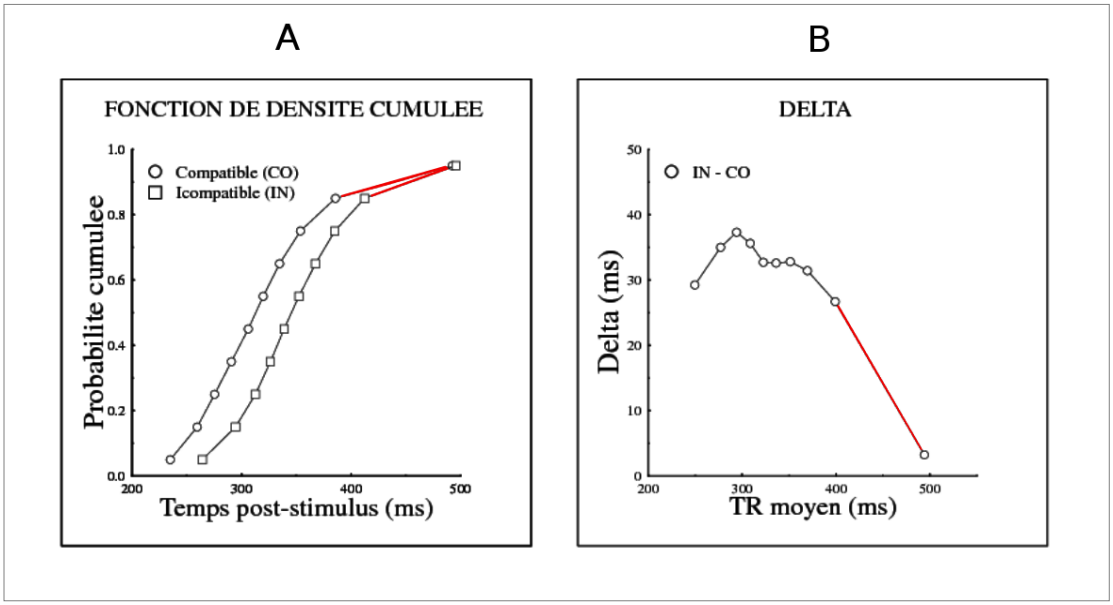


Figure 4. (A) Distributions de TR obtenues dans la tâche de Simon pour les associations compatibles (marqueurs ronds) et incompatibles (marqueurs carrés). Les deux distributions convergent c'est-à-dire que la différence entre les essais compatibles et incompatibles décroît avec l'allongement des TR (en rouge). **(B)** La courbe-delta correspondant à la différence entre les deux distributions. La convergence des distributions est visualisée par une courbe-delta de pente négative (en rouge). (Données issues de Davranche & McMorris, 2009).

Classiquement, dans les tâches de TR de choix, les courbes-delta sont uniformément croissantes avec le temps (Luce, 1986 ; Wagenmakers et al., 2005 ; Speakman et al., 2008). Ceci vient du fait que lorsque l'on représente deux distributions de TR correspondant à deux conditions expérimentales différentes, on observe classiquement que la variabilité croissant avec la moyenne, les deux distributions divergent pour les TR les plus longs. Or, dans la tâche de Simon, les distributions des TR des essais compatibles et incompatibles convergent, ce qui résulte en une courbe-delta qui décroît avec le temps (voir Figure 4). Ceci signifie donc que l'effet Simon décroît lorsque le TR augmente (de Jong et al., 1994; Ridderinkhof, 2002a ; Burle et al., 2002). La réduction de cet effet quand le TR augmente est particulièrement intéressante car, d'une part, elle est tout à fait inhabituelle si l'on considère l'effet de la plupart des autres manipulations expérimentales et, d'autre part, elle viole la règle selon laquelle la variabilité devrait augmenter en fonction du TR (Wagenmakers et al., 2005)

suggérant que des processus supplémentaires sont mis en jeu. Nous reviendrons un peu plus loin (**paragraphe 4**.) plus en détails sur les mécanismes responsables de cette décroissance de l'effet d'interférence avec le temps. Mieux comprendre leur nature et, plus particulièrement, savoir s'ils sont sous la dépendance de processus attentionnels est la question centrale de notre travail.

3.2.2. La fonction de précision conditionnelle (conditional accuracy function, CAF)

Il est également possible de s'intéresser à la dynamique des erreurs dans différentes conditions expérimentales (dans notre cas, essais compatible et incompatible) plutôt que simplement comparer les taux moyen d'erreurs obtenus pour chaque condition en utilisant la fonction de précision conditionnelle, aussi appelée CAF pour *conditional accuracy function*.

La CAF est obtenue à partir de l'analyse de la précision de la réponse en fonction du TR. Toutes les réponses, qu'elles soient correctes ou incorrectes, sont classées en ordre croissant en fonction de leur TR. Ensuite l'ensemble des observations est divisé en classes de même effectif (quantiles) pour chaque sujet et pour chaque condition expérimentale (essais compatible et incompatible) et le taux de réponses correctes moyen est calculé pour chaque classe et représenté en fonction du TR. Si nous observons les distributions de réponses correctes pour chaque type d'association, compatible ou incompatible, la différence la plus importante porte sur le taux de réponses correctes pour les TR les plus courts qui est plus faible pour les associations incompatibles que pour les associations compatibles (Figure 5). La probabilité de commettre des erreurs rapides dans les associations compatibles est presque nulle tandis qu'un nombre important d'erreurs rapides est observé dans les associations incompatibles. Ces observations suggèrent que les CAF pourraient fournir une mesure efficace de la force de l'activation de la réponse déclenchée automatiquement par la route

rapide et, plus précisément, que la pente du premier segment serait un outil très utile pour mieux comprendre les conditions modulant les processus de déclenchement automatique de la réponse (Ridderinkhof et al, 2002a ; 2004).

Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé la pente de ce premier segment pour étudier plus en détails la dynamique de cette activation dans les essais compatibles et incompatibles indépendamment.

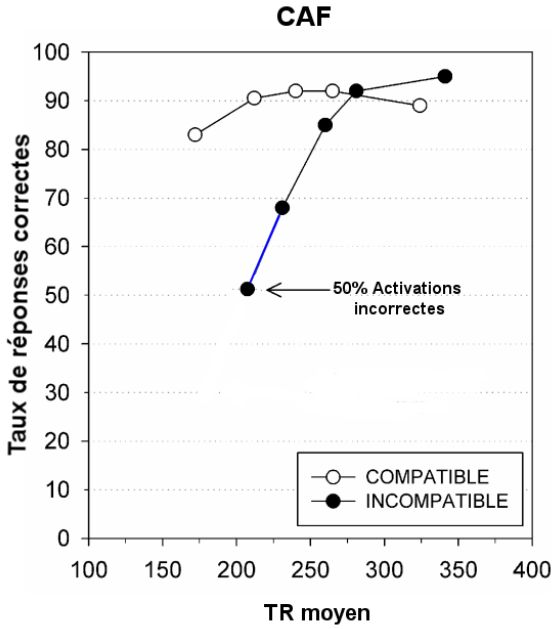


Figure 5. La CAF est obtenue à partir de l'analyse de la précision de la réponse en fonction du TR. Le taux de réponses correctes est représenté en fonction du TR moyen. La pente du premier segment des essais incompatibles (en bleu) montre un faible taux de réponses correctes.

3.3. Contribution des activités électromyographiques

L'électromyographie de surface (EMG) est une technique d'enregistrement de l'activité électrique musculaire qui permet de bénéficier d'indices physiologiques concernant la façon dont les opérations mentales se déroulent et notamment le contrôle de l'interférence. L'activité électrique enregistrée par l'EMG correspond à la dépolarisation des fibres musculaires produisant la contraction. De manière pratique, on enregistre la différence de potentiels entre deux électrodes de surface positionnées au-dessus du muscle d'intérêt, c'est-à-dire, en ce qui nous concerne, des muscles agonistes principaux impliqués lorsqu'on appuie avec les pouces sur un bouton de réponse, qui sont les muscles courts fléchisseurs des pouces.

3.3.1. Détection des erreurs cachées : les ébauches d'erreur

L'enregistrement de l'activité EMG dans les tâches de TR de choix avec conflit, comme la tâche de Simon, a permis de mettre en évidence que dans un certain nombre d'essais dont l'issue était une réponse correcte, l'on pouvait observer une activité EMG sous-liminaire dans le muscle impliqué dans la réponse erronée précédant l'activité EMG observée dans le muscle contrôlant la réponse correcte (Figure 6). Ces activités dans le muscle associé à la réponse incorrecte, trop faibles pour atteindre le seuil de déclenchement d'une réponse motrice (Smid et al., 1990), sont connues sous le nom d'« ébauches d'erreurs » (Hasbroucq et al., 1999). Elles pourraient être simplement des décharges musculaires spontanées sans lien avec la tâche, cependant différentes observations expérimentales ne vont pas dans ce sens. Premièrement, les TR des essais contenant des ébauches d'erreur sont plus longs que ceux des essais où il y a eu uniquement l'activation motrice de la réponse requise (Smid et al. 1990), ce qui suggère que le traitement est bien affecté par ces erreurs ce qui ne devrait pas être le cas dans le cas d'activités spontanées, deuxièmement, la fréquence des ébauches d'erreur est plus

importante dans les associations incompatibles que dans les associations compatibles (Allain et al., 2009), troisièmement, la latence des essais suivant ceux contenant une ébauche d'erreur est affectée de manière similaire à celle de ceux suivant une erreur (Allain et al., 2009). L'ensemble de ces observations a donc amené certains auteurs à proposer que les « ébauches d'erreur » seraient le reflet d'une activation incorrecte qui a été détectée, inhibée et corrigée avant d'atteindre l'intensité suffisante pour produire une erreur (Burle et al., 2002 ; Hasbroucq et al., 1999), c'est-à-dire en d'autres termes des « erreurs cachées » car non abouties. Il devient donc particulièrement pertinent de traiter ces essais comme des erreurs plutôt que comme des réponses correctes comme c'est le cas lorsque nous ne disposons pas de l'activité EMG. En outre, ces ébauches d'erreur seraient donc le témoin de la mise en œuvre d'un contrôle d'exécution en ligne lors de chaque essai (Burle et al., 2002) et à ce titre sont donc un indice physiologique particulièrement intéressant pour étudier le contrôle de l'interférence.

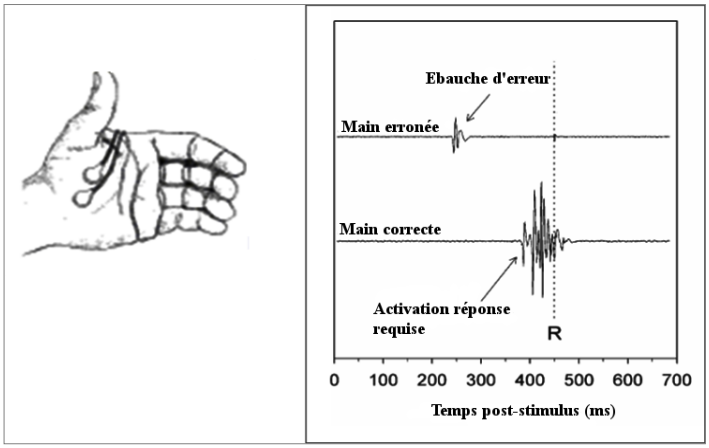


Figure 6. Activité EMG des muscles agonistes impliqués dans les deux réponses possibles. L'activité EMG de la main impliquée dans la réponse requise commence à environ 370 ms. Cette activité est précédée d'une activité musculaire de la main erronée qui commence à environ 260 ms. Cette activité EMG erronée est cependant trop faible pour produire une réponse mécanique. Elle est connue sous le nom d'« ébauches d'erreurs »

3.3.1.1.. L'activation des réponses impulsives révélée par les ébauches d'erreur

Comme nous l'avons décrit précédemment, les CAF fournissent une mesure efficace de la force de l'activation automatique des réponses dans les tâches de conflit. De façon similaire aux CAF, les CIAF (*conditional incorrect activation function*) peuvent être réalisées sur une catégorie de réponses que nous appellerons les activations incorrectes et qui correspondent alors à l'ensemble de toutes les erreurs d'activation qu'elles aient abouti à une réponse incorrecte ou qu'elles soient restées à l'état d'ébauches. Ceci devrait nous permettre une analyse plus fine de la dynamique des activations incorrectes (Van den Wildenberg et al., 2010).

Pour obtenir les CIAF, toutes les réponses, qu'elles soient correcte, erronée ou ébauche d'erreur, sont classées en ordre croissant selon leur TR, pour chaque sujet et pour chacune des conditions expérimentales (compatible et incompatible). Ensuite les TR sont divisés en classes de même effectif et le taux de réponses correctes est calculé pour chacune des classes en fonction du temps de réaction moyen. En 2010, Van den Wildenberg et collègues ont comparé les courbes obtenues avec les CAF et les CIAF dans une tâche de Simon. De manière très intéressante, ils ont montré que, comme avec les CAF, dans le cas des associations incompatibles, on observait sur les CIAF un taux d'activations incorrectes très faible pour les réponses les plus longues (autour de à 5 %) et nettement plus élevé pour les réponses les plus rapides, mais alors que pour les CAF ce taux était proche du hasard (50 %), il avoisinait avec les CIAF les 70 % (Figure 7). Un tel pourcentage d'activations incorrectes élimine l'idée que les erreurs partielles soient le fruit du hasard et au contraire indique clairement que ces activations incorrectes sont essentiellement provoquées par la position du stimulus et donc reflètent la force de l'activation de la réponse déclenchée par la dimension non pertinente du stimulus. De ce fait le taux global des activations incorrectes et également la pente du premier

quantile des CIAF semblent être des indices très utiles pour évaluer la force du déclenchement automatique de la réponse inappropriée.

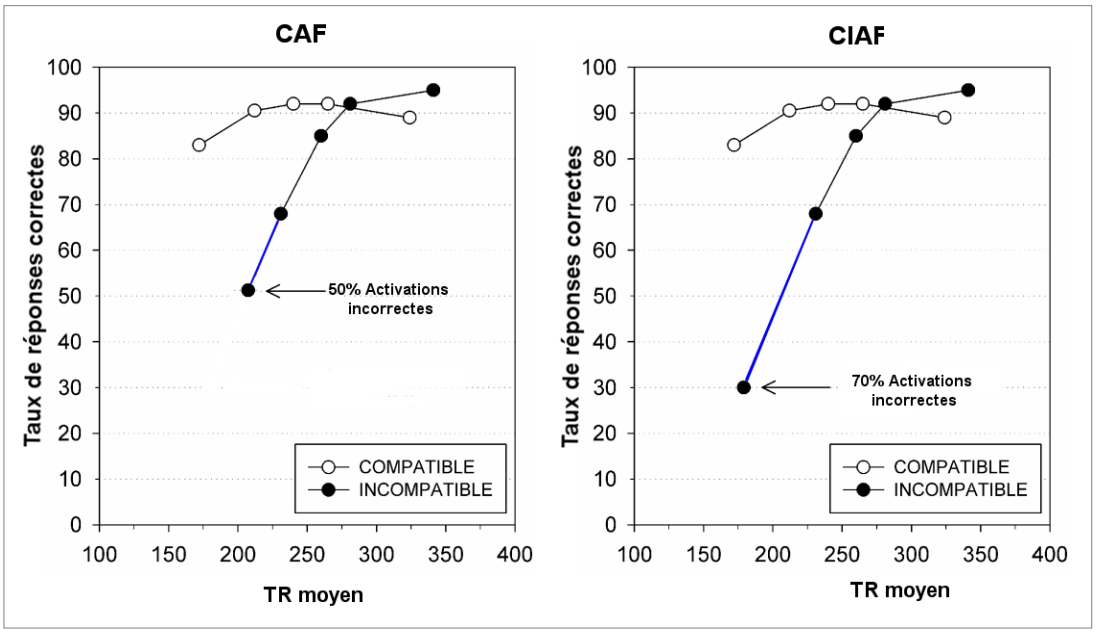


Figure 7. Les CAF et CIAF dans une tâche de Simon. Pour le premier segment des associations incompatibles (bleu) on observe un taux d'activations incorrectes plus élevé pour les réponses les plus rapides sur les CIAF (70 %) que sur les CAF (50 %).

3.3.1.2. La suppression des réponses impulsives révélée par les ébauches d'erreur

Dans la même logique, les ébauches d'erreur étant des activités déclenchées, détectées et corrigées, elles fournissent également une mesure directe de l'efficacité du système de contrôle de l'interférence permettant de supprimer l'activation d'une réponse incorrecte, le « taux de correction » (CR) (Burle et al., 2002). Celui-ci est défini par le rapport suivant :

$$CR = \frac{Nee}{Nee + Ner}$$

N*ee* reflète le nombre d'ébauches d'erreur et N*er* le nombre d'erreurs. Le taux de correction reflète donc le nombre d'activations incorrectes corrigées (essais avec ébauches) rapporté au nombre total d'activations incorrectes (essais avec erreurs + essais avec ébauches).

3.3.2. Indices chronométriques fournis par l'EMG

Par ailleurs, dans le cadre de la logique chronométrique, l'EMG fournit également des indices physiologiques des étapes intermédiaires du traitement de l'information. Le temps de réaction peut ainsi être divisé en plusieurs composantes chronométriques reflétant chacune des processus distincts. Par exemple, le TR des essais corrects est principalement fractionné en deux composantes majeures « le temps pré-moteur » et « le temps moteur » (Hasbroucq et al., 1995, 2002). Le temps pré-moteur (TPM) correspond à l'intervalle de temps entre la présentation du stimulus (S) et le début de l'activité EMG impliquée dans la réponse, et le temps moteur (TM) correspond à l'intervalle de temps entre le début de l'activité EMG et l'appui de la réponse (Figure 8).

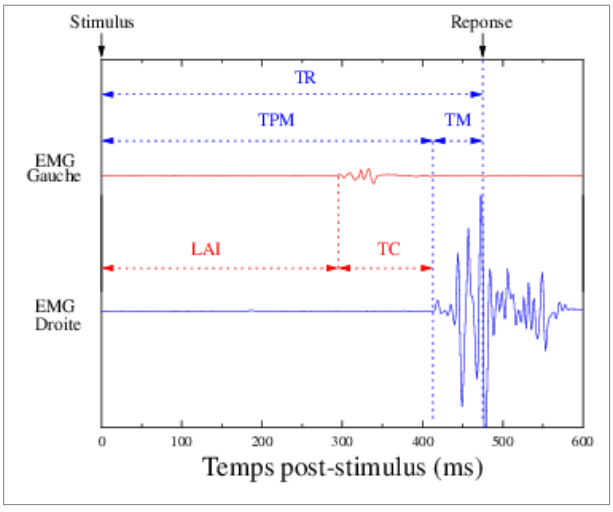


Figure 8. Activité EMG des muscles impliqués dans les deux réponses possibles. Dans cet exemple, la réponse correcte doit être donnée à droite. L'activité EMG du muscle impliqué dans la réponse correcte commence à environ 410 ms. Cette activité est précédée d'une activité musculaire subliminale du muscle impliqué dans la réponse de gauche qui commence à environ 300 ms. Cette activité EMG n'arrive pas au seuil de déclenchement

de la réponse mécanique. Grâce au début de l'activité EMG de la réponse correcte on peut fractionner le temps de réaction (TR) en deux composantes le temps prémoteur (**TPM** ; intervalle de temps entre le stimulus et le début de l'EMG de la réponse correcte) et le temps moteur (**TM** ; intervalle de temps entre le début de l'EMG de la réponse correcte et la réponse mécanique). Le temps de réaction des ébauches, peut être subdivisé en deux composantes: latence de l'activation incorrecte (**LAI**; intervalle de temps entre le stimulus et le début de l'activation de l'ébauche) et le temps de correction (**TC** ; intervalle de temps entre le début de l'activation de l'ébauche et le début de l'activité EMG de la réponse correcte.

Il est généralement admis que le TPM reflèterait plutôt des processus sensoriels et centraux (Hasbroucq et al., 2002), tandis que le TM reflèterait les processus périphériques liés à l'exécution de la réponse (Hasbroucq et al., 1995). Ces deux indices pouvant être modulés par des facteurs différents, ils sont considérés comme reflétant des processus indépendants (Burle & Bonnet, 1999 ; Hasbroucq et al., 1999 ; Hasbroucq et al., 2001). Par exemple, Hasbroucq et collaborateurs (2001) ont rapporté que l'effet de compatibilité du TR observé dans les tâches de conflit n'affectait pas le TM mais seulement le TPM, ce qui suggère que les composantes motrices du TR ne semblent pas être affectées par les situations de conflit. D'autres auteurs (Allain et al., 2004) ont fractionné le TR des erreurs et ont mis en évidence une diminution du TPM et un allongement du TM lors de celles-ci. Ainsi, l'ensemble de ces études soutiennent l'idée que la fragmentation du TR reflèterait des processus distincts.

En outre, il est également intéressant de fractionner le TR associé aux essais contenant des ébauches d'erreur dont nous venons de parler. Dans ce cas, le TPM est subdivisé en deux autres composantes : la latence de l'activation incorrecte (LAI) et le temps de correction (TC) (Burle, 2002). Comme illustré sur la figure 8 (en rouge), la LAI correspond à l'intervalle de temps entre la présentation du stimulus et le début de l'ébauche d'erreur et le TC à l'intervalle de temps entre le début de l'activation incorrecte et le début de l'activité musculaire de la réponse requise.

4. Interprétations théoriques de la diminution de l'effet d'interférence avec l'allongement des TR

Nous avons vu précédemment que les analyses de distribution étaient particulièrement pertinentes pour appréhender les mécanismes impliqués dans le contrôle de l'interférence. En particulier, l'analyse des distributions des TR révèle une réduction de l'effet d'interférence lorsque les TR s'allongent. Cet effet viole la règle selon laquelle la variabilité devrait augmenter en fonction du TR (Wagenmakers et al., 2005) et donc suppose la mise en jeu de mécanismes supplémentaires. En 2002a, Ridderinkhof a proposé une extension du modèle de la double-route afin d'expliquer cette décroissance de l'effet d'interférence pour les TR longs. Dans ce modèle connu sous le nom de modèle de la suppression de l'activation ("activation-suppression" model), il a ajouté une étape de suppression de l'activation de la réponse inappropriée par la route rapide (Figure 9). Cette suppression serait un processus actif sous contrôle cognitif supérieur ("top-down" control) qui aurait besoin de temps pour se mettre en place et ainsi annuler l'interférence générée par la capture automatique. Par conséquent, ce modèle prédit que la suppression n'ayant pas le temps de se mettre en place pour les TR les plus courts, l'expression de l'activation de la réponse automatique serait très prononcée dans ces essais. En revanche, pour les TR longs ce mécanisme serait efficace et donc pourrait stopper l'activation de la réponse automatique. Ainsi, lorsque cette inhibition n'a pas pu être mise en place, c'est-à-dire pour les TR rapides, on observe les effets de facilitation pour les essais compatibles et de retardement pour les essais incompatibles; en revanche lorsque celle-ci a eu le temps de se mettre en place, pour les TR longs, la route directe n'est plus activée et donc il n'y a ni effet de facilitation pour les essais compatibles, ni effet de retardement pour les essais incompatibles, ce qui a pour effet une disparition de l'effet Simon pour les TR

longs, expliquant la pente négative observée sur les courbe-delta (Burle et al., 2002; Ridderinkhof, 2002a; Ridderinkhof et al., 2004 ; Van den Wildenberg et al., 2010).

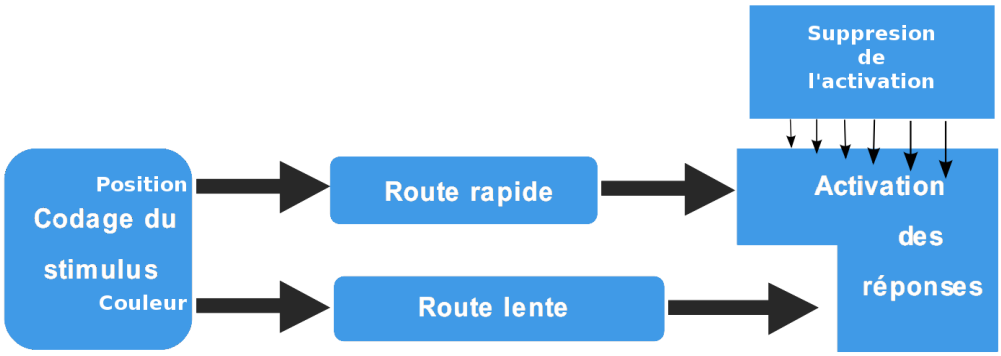


Figure 9. Extension du modèle de la double route par Ridderinkfof (2002). Selon le modèle de la double route, dans la tâche de Simon, la position du stimulus active la réponse ipsilatérale par la route directe et l'attribut pertinent du stimulus (couleur) active la réponse requise par la route lente. Ridderinkhof y a rajouté le module de suppression sélective de l'activation qui viendrait inhiber l'activation de la réponse ipsilatérale par la route directe.

Plusieurs études expérimentales ont fourni des arguments en faveur de l'hypothèse postulée par le modèle de suppression de l'activation. Par exemple, Stürmer et collaborateurs (2002) ont manipulé l'effet de la fréquence des essais incompatibles dans une tâche de Simon et ont observé une réduction de l'effet d'interférence suggérant un contrôle plus important. Reprenant cette idée, Ridderinkhof et collaborateurs (2002b) ont étudié la dynamique de la réduction de l'effet Simon et ont observé qu'elle était plus importante pour les TR les plus longs lorsque la fréquence des essais incompatibles augmentait, ce qui suggère un mécanisme de suppression plus fort. De plus, dans la même étude, les auteurs ont également rapporté que la pente négative de la courbe-delta survenait plus tôt dans les distributions de TR faites sur les essais qui suivaient un essai incompatible que dans celle faite à partir des TR des essais

suivant un essai compatible, ce qui est plutôt cohérent avec l'idée d'une suppression plus forte de l'activation déclenchée par la voie rapide après les essais incompatibles.

Ces conclusions apportèes par Ridderinkhof, ont été par la suite etendues par Burle et collaborateurs (2002) dans une étude evaluant les contributions des ebauches des erreurs, obtenues grâce à l'enregistrement electromyographique dans la decroissance de l'effet Simon pour les TR le plus lents. Ces auteurs ont comparait la distribution de TR contenant des ebauches d'erreurs a celle ne contenant pas des ebauches. Ils sont observe que pour la distribution ne contenant pas des essais avec ebauches, la decroissance de l'effet Simon pour les TR lents n'avait pas lieu, alors ce resultat suggere que les essais contenant des ebauches d'erreur contribuent à la reduction de l'effet Simon pour les TR lents et proportionne un fort argument vers l'idee que la decroissence de l'effet Simon pour les TR lents releve d'un mecanisme de contrôle.

Par la suite, Burle et collaborateurs (2005) ont aussi étudié la dynamique temporelle de ce mécanisme de suppression dans un protocole où il séparait dans le temps l'apparition des dimensions pertinente (couleur) et non pertinente (localisation) du stimulus, le délai entre les deux pouvant être variable. Ils ont montré que la courbe-delta prenait des valeurs négatives ce qui suggère une inversion de l'effet Simon quand l'information non pertinente était présentée avant l'information pertinente. Le fait que les TR les plus longs soient associés à une inversion de l'effet d'interférence soutient bien l'idée d'une suppression plus efficace pour ces TR.

Plus récemment, Wylie et collaborateurs (2010) ont réalisé une étude chez les patients parkinsoniens connus pour avoir une altération du contrôle cognitif, plus spécifiquement de la capacité à supprimer l'interférence. Ils ont étudié l'effet de la stimulation des noyaux sous-

thalamiques sur la pente de la courbe-delta et ils ont montré que la pente devenait plus négative lors de la stimulation de cette structure suggérant une amélioration du mécanisme de suppression.

A la suite de ces différentes études, on peut penser que la pente du dernier segment de la courbe-delta (correspondant aux TR les plus longs) est un outil très utile pour apprécier la force de la suppression de l'effet d'interférence. Ceci ne signifie pas que les effets de la suppression ne peuvent pas être apparents dans les segments plus précoces, mais cela dépend de plusieurs facteurs dont la force de l'activation de la réponse initiale, le nombre de segments et la force du mécanisme de suppression.

Les études discutées précédemment illustrent l'efficacité des analyses de distribution de TR associées aux courbes-delta pour analyser le contrôle de l'interférence. Cependant, même si le modèle de la suppression de l'activation fournit un cadre intéressant pour la compréhension de la dynamique temporelle des effets observés sur les TR, il existe dans la littérature d'autres hypothèses pouvant également rendre compte de la réduction de l'effet Simon au cours du temps. Hommel (1994) propose le modèle de « la décroissance spontanée » *(spontaneous decay)* selon lequel la réduction de l'effet Simon pour les TR les plus longs résulterait d'un processus de décroissance passive et spontanée de l'activation de la réponse déclenchée automatiquement par la route rapide, plutôt que d'un mécanisme soumis à un contrôle cognitif supérieur. Cependant, bien qu'une décroissance spontanée puisse éventuellement aboutir à une atténuation de l'effet de l'interférence, cette décroissance seule ne peut pas expliquer l'inversion de l'effet Simon rapporté dans certaines expériences (Burle et al., 2005; Wylie et al., 2010). Un effet d'interférence au dessous de la valeur 0 exigerait un processus actif de suppression de l'activation de la réponse déclenchée automatiquement par la route rapide.

5. Les effets séquentiels

Dans les tâches de conflit, l'effet d'interférence dépend fortement du contexte de la tâche. Les effets séquentiels en sont un très bon exemple. En effet, dans la tâche de Simon, il a été mis en évidence qu'après un essai compatible l'effet de Simon est très fort alors qu'il est fortement réduit après un essai incompatible (Praamstra et al., 1999 ; Ridderinkhof, 2002a, Hommel et al., 2004 ; Notebaert et al., 2001). Cette modulation séquentielle suggère que des mécanismes de contrôle proactif sont mis en œuvre afin d'ajuster le traitement de l'information (Botvinick et al., 2001 ; Gratton, et al., 1992 ; Ridderinkof, 2002). La réduction de l'effet Simon après un essai incompatible a été interprétée par Stürmer et collaborateurs (2002) comme la mise en évidence d'un mécanisme de contrôle. Ainsi, l'amorçage de la réponse automatique par la route rapide est supprimé dans l'essai en cours si, à l'essai précédent, la réponse incorrecte activée par cette route a été supprimée. Cette suppression rend compte de la réduction de l'effet Simon après une association incompatible. Il a été considéré que ce type de contrôle était de type proactif hors ligne alors que les processus évoqués dans les parties précédentes étaient de type réactif en ligne. Dans l'ensemble des études présentées dans ce mémoire, nous nous sommes concentrés essentiellement sur les processus réactifs en ligne et nous ne reviendrons donc pas sur ces processus proactifs hors ligne.

Chapitre II

Le Trouble déficitaire de l'attention avec/ou sans hyperactivité (TDA/H)

1. Evolution de l'étiologie du TDA/H au cours de l'histoire

Le trouble déficitaire de l'attention avec/ou sans hyperactivité (TDA/H) est un des troubles du comportement les plus fréquemment diagnostiqués chez l'enfant, avec un taux de prévalence supérieur à 5 % (Barkley et al., 1988; Polanczyk et al., 2007). Le trouble se caractérise par la présence de comportements inattentifs et/ou hyperactifs plus fréquents et persistants que chez des pairs du même âge. Les symptômes du TDA/H peuvent persister à l'âge adulte jusque dans 65% des cas occasionnant alors de forts dégâts au niveau tant professionnel que social et privé (Mannuzza & Hechtman, 1992; Klein & Mannuzza, 1991; Mannuzza et al., 1993; Thorley, 1984; Weiss & Hechtman, 1986; Wilens, Biederman & Spencer, 2002).

Les premières descriptions cliniques du TDA/H remonteraient à la fin du XIX siècle et apparaîtraient comme une forme pathologique d'instabilité psychomotrice. Cette idée sera d'ailleurs reprise bien plus tard, en 1892, par Charles Boulanger qui décrit dans sa thèse une population d'enfants caractérisés par « *un manque d'équilibre dans les facultés de l'esprit*». Ces enfants instables étaient incapables de maintenir leur attention sur une même activité pendant une longue période de temps. Cependant, c'est Bournonville en 1897 qui, pour la première fois, a proposé une description détaillée de ce trouble dans son traité médico-psychologique sur les différentes formes d'idiotie. Des années plus tard, le psychiatre Anglais Georges Still (1902) rapporte le cas d'enfants dont la plupart présentent des comportements qui, aujourd'hui, aboutiraient à un diagnostic de TDA/H. Ces enfants manquent de considération pour l'autorité et la norme malgré une éducation et une discipline qui entraîneraient l'obéissance chez d'autres enfants. De ce fait, ces observations ont suggéré une

prédisposition biologique « sous-tendant » cet état comportemental. Selon Still, ces prédispositions pourraient dans certains cas être héritées et dans d'autres être provoquées par des traumatismes pré ou postnataux. Cette hypothèse s'est trouvée renforcée lors de l'épidémie d'encéphalites qui a eu lieu aux Etats-Unis au début du XX^{ème} siècle, épidémie à la suite de laquelle les enfants survivants ont présenté des troubles du comportement liés aux dommages cérébraux. C'est ainsi que le terme de «Trouble du comportement post-encéphalitique» a été adopté pour regrouper ces divers symptômes.

Au cours des années qui ont suivi, les observations et les descriptions de ces troubles comportementaux ont encore évolué et le concept de « dommages minimes du cerveau » (*Minimal Brain Damage*, MBD) est alors apparu. Ce diagnostic demeurera répandu jusque dans les années soixante pour décrire les enfants qui manifestent des symptômes comportementaux d'hyperactivité ou d'impulsivité, même si leur histoire ne mentionne aucun indice de dommage cérébral.

C'est finalement en 1968 que pour la première fois une référence à l'hyperactivité est introduite dans le *Manuel diagnostic et statistique des désordres mentaux* (DSM-II, American Psychiatric Association, 1968) sous la référence de « trouble des réactions hyperkinétiques de l'enfance » mais c'est seulement dans le DSM-III (American Psychiatric Association, 1980) que l'on trouvera une définition cliniquement structurée de ce trouble. Ainsi dans la publication du DSM-III un nouveau terme est proposé : « Attention Deficit Disorder » (ADD) pour « Trouble du Déficit d'Attention » (TDA) qui inclut deux sous-types TDA avec hyperactivité et TDA sans hyperactivité, le comportement moteur excessif n'étant pas absolument nécessaire pour un diagnostic de TDA.

Finalement, une nouvelle modification intervient dans les années 90 et donne lieu à l'apparition d'une nouvelle version dans le DSM IV (American Psychiatric Association,

2000). Dans cette nouvelle version, le « / » fait son apparition "officielle" dans l'appellation « Trouble du Déficit de Attention/Hyperactivité » et des sous-types sont individualisés en fonction de la prédominance des symptômes d'inattention et d'hyperactivité ou d'impulsivité. Le diagnostic peut alors s'établir sous trois formes : TDA/H avec hyperactivité-impulsivité prédominante, TDA/H avec inattention prédominante ou TDA/H mixte dans lequel l'inattention et l'hyperactivité sont présentes de manière équivalente. En effet, bien que chez la plupart des sujets, les symptômes d'inattention et d'hyperactivité coexistent, chez certains, l'un ou l'autre mode de conduite est prédominant. Le DSM-IV identifie trois catégories d'enfants TDA/H selon qu'ils affichent une prédominance de symptômes liés à l'inattention (type inattentif), à l'hyperactivité-impulsivité (type hyperactif) ou une prédominance des deux types de symptômes (type combiné). Biederman et ses collaborateurs (1997) ont trouvé que, parmi un ensemble d'enfants d'âge scolaire présentant un TDAH, 60% étaient de type TDAH-combiné. La plupart des études ont rapporté que les individus ayant un TDA/H de type inattentif et ceux ayant un TDA/H de type combiné présentaient des différences quant à leurs caractéristiques épidémiologiques, leurs comportements et leurs comorbidités (Faraone, Biederman & Freedman, 2000; Faraone et al., 1998; Morgan et al., 1996). Ces observations ont amené certains auteurs à poser la question de savoir si ces deux sous-types ne pouvaient pas être deux troubles d'étiologie distincte (Barkley, 1997; Milich, Balentine & Lynam, 2001).

2. Caractéristiques diagnostiques du TDA/H

Ils existent différents critères cliniques du DSM IV qui permettent d'établir un diagnostic adéquat.

Critère A : Il faut qu'un nombre minimum de symptômes d'hyperactivité-impulsivité ou d'inattention entraînant une gêne fonctionnelle aient été présents avant l'âge de 7 ans bien que,

dans beaucoup de cas, le diagnostic ne soit porté que plusieurs années après leur apparition, en particulier dans le cas de sujets présentant le type avec inattention prédominante.

Critère B : La gêne fonctionnelle liée aux symptômes doit être manifeste dans au moins deux types d'environnement différents (par exemple, à la maison et à l'école ou au travail).

Critère C : On doit mettre clairement en évidence que les symptômes interfèrent avec le fonctionnement social, scolaire ou professionnel qui correspond au niveau de développement du sujet.

Critère D : La perturbation ne doit pas survenir exclusivement au cours d'un trouble envahissant du développement, d'une schizophrénie ou d'un autre trouble psychotique, et elle ne doit pas pouvoir être mieux expliquée par un autre trouble mental (par exemple, par un trouble de l'humeur, un trouble anxieux, un trouble dissociant ou un trouble de la personnalité).

Critère E : L'inattention peut se manifester dans le contexte scolaire, professionnel ou social. Les sujets atteints d'un déficit de l'attention/hyperactivité peuvent se montrer incapables de prêter attention aux détails, ou faire des fautes d'étourderie dans leurs devoirs scolaires ou d'autres tâches.

Selon le DSM IV, le diagnostic de TDA/H de type combiné doit être posé lorsque six symptômes d'inattention ou plus et six symptômes d'hyperactivité-impulsivité ou plus sont présents depuis au moins six mois, celui de TDA/H avec inattention prédominante lorsque six symptômes d'inattention ou plus, mais moins de six symptômes d'hyperactivité-impulsivité sont présents depuis au moins six mois et celui de TDA/H avec hyperactivité-impulsivité prédominante lorsque six symptômes d'hyperactivité-impulsivité ou plus, mais moins de six symptômes d'inattention sont présents depuis au moins six mois.

Parallèlement au DSM IV, on trouve également le CIM-10 (Classification internationale des troubles mentaux et des troubles du comportement, CIM-10/ICD-10, 1994) de l'organisation mondiale de la santé (OMS). Le CIM-10 est la proposition alternative au DSM la plus couramment utilisée. Elle répertorie le TDA/H dans la rubrique « Troubles du comportement et troubles émotionnels apparaissant habituellement durant l'enfance ou à l'adolescence ». Même si les symptômes (inattention, hyperactivité et impulsivité) sont décrits de manière similaire à celle du DSM, il existe quelques différences entre ces deux manuels de diagnostic, le CIM-10 requiert un degré plus important d'expression des symptômes et ne prend pas en compte de sous-types.

3. Les aspects cliniques du TDA/H

Comme énoncé précédemment, le TDA/H est actuellement caractérisé par une symptomatologie spécifique correspondant à la triade clinique suivante : inattention, hyperactivité et impulsivité.

3.1. Le déficit attentionnel

L'attention est un processus qui nous permet d'évoluer de manière adéquate dans notre environnement et de sélectionner de façon appropriée les informations pertinentes. Au niveau clinique, l'évaluation de l'attention est réalisée selon deux dimensions : l'intensité (attention soutenue, vigilance) et la sélectivité (attention sélective et partagée). Les enfants avec un TDA/H présentent un déficit de performance dans les tâches qui évaluent ces deux dimensions. Ainsi, le déficit d'attention se traduit par les comportements suivants: les enfants ne sont pas capables de prêter attention aux détails, font preuve de beaucoup d'étourderie, ont du mal à soutenir leur attention dans le travail ou dans les jeux, donnent l'impression de ne pas

écouter, ne se conforment pas aux consignes, ne mènent pas à terme leurs devoirs ou les tâches dans lesquelles ils sont engagés, ont du mal à organiser leurs travaux, évitent les activités qui nécessitent un effort soutenu, se laissent facilement distraire, ont des oublis fréquents, etc.

3.2. Le déficit d'impulsivité

L'impulsivité est considérée comme l'incapacité d'inhiber une action verbale ou motrice. Dans le TDA/H, un déficit d'impulsivité se caractérise par des comportements inappropriés tels que laisser échapper des réponses à une question qui n'a pas encore fini d'être posée, avoir du mal à attendre son tour, interrompre ses interlocuteurs, imposer sa présence, parler souvent trop et sans tenir compte des conventions sociales.

3.3. Le déficit d'hyperactivité

Il s'agit d'une exagération marquée d'un comportement moteur normal qui entrave le fonctionnement global de l'enfant. Cette activité motrice inappropriée se caractérise par des comportements tels que le fait de remuer souvent les pieds ou les mains, se lever souvent, courir ou grimper partout, avoir du mal à se tenir tranquille, agir comme si l'enfant était «monté sur ressorts».

4. Un survol des théories explicatives

Plusieurs théories cognitives ont tenté d'expliquer les différents déficits comportementaux associés au TDA/H. Tous les modèles proposés rendent potentiellement compte d'un ensemble minimal de caractéristiques du TDA/H (inattention, impulsivité, hyperactivité). Ils se sont pour la grande majorité basés sur le fait que les enfants avec un TDA/H présentent des

déficits importants dans différentes tâches exécutives et attentionnelles (Barkley, 1997; Tannock, 1998). C'est pourquoi avant de présenter les différents modèles, nous présenterons un résumé des études explorant les déficits attentionnels et des fonctions exécutives des individus avec un TDA/H.

4.1. Attention et fonctions exécutives dans le TDA/H

Les comportements des sujets avec un TDA/H ressemblent souvent à ceux des patients ayant des lésions frontales. Ils présentent souvent des symptômes suggérant des atteintes cognitives au niveau attentionnel et des fonctions exécutives (FE), déficits fréquemment associés aux lésions frontales. Plusieurs études utilisant les techniques d'imagerie fonctionnelle ont d'ailleurs confirmé l'atteinte de régions frontales dans le TDA/H (Tannock, 1998; Krain et al., 2006; Sowell et al., 2003).

4.1.1. Attention et TDA/H

L'intérêt pour un dysfonctionnement attentionnel chez les sujets avec un TDA/H est très récent. En effet, durant les années 1980 et 1990, plusieurs études ont rejeté l'idée de difficultés attentionnelles chez ces patients (O'Dougherty et al., 1984; Schachar et al, 1988; Sergeant et al., 1999; 1988; Van der Meere et al., 1987) et c'est seulement au cours de ces dernières années qu'il y a eu un regain d'intérêt pour cette question.

Certaines études ont rapporté un déficit de l'attention soutenue ou vigilance qui pourrait être caractérisé par un allongement et/ou une augmentation de la variabilité et/ou une augmentation des erreurs ou des omissions (absence de réponse) selon les tâches (Drechsler et al., 2005; Johnson et al., 2007; Stins et al., 2005; Heaton et al., 2001; Huang-Pollock, Nigg & Halperin, 2006; Shallice et al., 2002; Tucha et al., 2009; Tucha, et al., 2006; Willcut et al.,

2005; Wu et al., 2002). Parmi ces études, celle d'Epstein et collaborateurs (2003) est peut-être plus particulièrement à souligner. Ces auteur ont utilisé un échantillon important d'enfants présentant un TDA/H (817 enfants) pour corréler les performances obtenues au test de "Performance continue" (« continuous performance test », CPT) classiquement utilisé pour étudier l'attention et l'impulsivité et les symptômes comportementaux du TDA/H. De plus, pour évaluer la performance des sujets, ces auteurs ont également utilisé des indices issus de la théorie de la détection du signal, d' et β, connus pour caractériser respectivement la détection et la décision. Les résultats ont montré que les sujets avec un TDA/H présentaient un d' réduit indiquant une détection des signaux plus faible, une augmentation de la variabilité du TR, une plus grande fréquence des erreurs de commission et d'omissions que les sujets contrôles. Une étude similaire réalisée chez l'adulte a montré que ces derniers présentaient également une réduction de d' ce qui indique de plus grandes difficultés pour détecter le signal cible (Epstein et al., 2010). Néanmoins, d'autres études ont suggéré que les patients avec un TDAH ne présentaient pas de déficits dans des tâches impliquant la vigilance ou l'attention soutenue (Schachar et al., 1988 ; Corkum et al., 1993 ; Booth et al., 2007; Tucha et al., 2006, 2009).

En ce qui concerne l'attention sélective et l'attention partagée, les données expérimentales sont là aussi très hétérogènes puisque certaines études ont rapporté un déficit chez les sujets avec un TDA/H par rapport à des sujets contrôles (Barkley, Grodzinsky, & DuPaul, 1992; Brodeur & Pond, 2001; Cepeda, Cepeda, & Kramer, 2000; Heaton et al., 2001; Kilic et al., 2007; Koschack et al., 2003), et d'autres non que ce soit pour l'attention sélective (Huang-Pollock, Nigg, & Carr, 2005; Huang-Pollock et al., 2006) ou l'attention partagée (Geurts et al., 2005; Heaton et al., 2001; Rommelse et al., 2007).

Les différences de résultats observées entre ces études peuvent être dues à des différences méthodologiques importantes. De plus, l'attention étant un concept multidimensionnel, il est

certainement nécessaire d'essayer d'intégrer l'ensemble de ces résultats afin d'obtenir une vision plus précise du TDA/H.

4.1.2. Fonctions exécutives et TDA/H

Selon un consensus général, les fonctions exécutives renvoient à un ensemble de processus (planification, flexibilité, attention et inhibition) ayant pour objectif l'adaptation d'un sujet à son environnement (Shallice, 1982; Duncan, 1986). Il est souvent considéré que les enfants avec un TDA/H présentent une détérioration des performances dans les différents tests évaluant les fonctions exécutives. Une méta-analyse réalisée par Pennington et Ozonoff (1996) va largement dans ce sens. Elle regroupe les résultats de dix-huit études réalisées principalement auprès d'enfants et d'adolescents. Quinze d'entre elles ont indiqué une différence significative entre les sujets avec un TDA/H et les sujets contrôles sur une ou plusieurs mesures de fonctions exécutives. Par ailleurs, parmi un total de soixante mesures des fonctions exécutives répertoriées à travers les différentes études, quarante d'entre elles ont révélé des performances inférieures chez les enfants avec un TDA/H. Il est à noter également que les patients n'ont obtenu aucun résultat significativement supérieur à celui des contrôles pour l'une ou l'autre de ces soixante mesures. De plus, la tâche de Stroop considérée comme une tâche de contrôle de l'interférence, s'est révélée être une mesure très sensible du TDA/H et de fait l'effet Stroop, plus important chez les sujets avec un TDA/H, a été considéré dans plusieurs études comme un indice de mesure de l'inhibition.

Plus récemment, Willcutt et collaborateurs (2005) ont également réalisé une méta-analyse, celle-ci regroupant quatre-vingt-trois études auxquelles ont participé des sujets d'âge différent avec un TDA/H. Les résultats de treize tests neuropsychologiques évaluant les fonctions exécutives ont été analysés. Des différences significatives entre les performances des patients

et celles des sujets contrôles ont été observées pour l'ensemble de ces tests. Les déficits observés à la tâche de Stop, reconnue pour mesurer l'inhibition motrice sont ceux qui se sont avérés être le plus constants entre les études (identifiés dans 82% des 27études), ainsi que les déficits de la vigilance (identifiés dans 70% des 30 études), de la capacité de planification, (identifiés dans 59% des 27 études) et de la mémoire de travail (identifiés dans 6 des 8 études). Evidemment, il a été vérifié dans toutes ces études que les difficultés liées aux fonctions exécutives ne pouvaient pas être attribuées à des différences de quotient intellectuel, de réussite scolaire ou à des symptômes associés à d'autres troubles.

Boonstra et collaborateurs (2005) ont réalisé une méta-analyse évaluant les fonctions exécutives et non exécutives chez les adultes avec un TDA/H. Treize études incluant au moins un test des fonctions exécutives ont été sélectionnées. Les résultats ont révélé une altération des fonctions exécutives (par exemple, dans la tâche de Stroop et dans les tâches de flexibilité mentale) comme chez l'enfant, mais également une détérioration de certaines fonctions non exécutives (par exemple, le nombre d'omissions dans le test CPT). Cependant cette méta-analyse n'a pas pu mettre en évidence des problèmes d'attention sélective ou d'inhibition motrice (du type de ceux impliqués dans la tâche de Stop).

4.2. Les modèles cognitifs du TDA/H

4.2.1. Le modèle du déficit d'inhibition du comportement et des fonctions exécutives

En 1997, Barkley propose un modèle dit « intégratif » dont l'objectif est d'unifier les difficultés rapportées chez les patients avec un TDA/H à travers les différentes études. Ce modèle postule que les déficits observés chez les patients sont dus à un dysfonctionnement du système exécutif (Figure 10). Selon ce modèle, le TDA/H est un trouble du développement des capacités d'inhibition du comportement. L'inhibition comportementale est la première

composante du modèle et celle qui influence toutes les autres. Plus spécifiquement, cette inhibition comportementale regroupe trois fonctions distinctes mais complémentaires : 1/ la capacité à inhiber les réponses non pertinentes, 2/ la capacité à inhiber une réponse déjà initiée, 3/ la capacité à contrôler l'interférence. L'inhibition comportementale a donc un effet important sur la réponse motrice et joue un rôle prépondérant pour une mise en place correcte des fonctions « *top-down* » décrites dans ce modèle comme les fonctions exécutives, telles que la mémoire de travail et le sens du temps, le langage intérieur, l'autorégulation de l'affect, de la motivation et de la vigilance, et la reconstitution. Ainsi en résumé, selon Barkley, les déficits observés lors des tests des fonctions exécutives ne seraient que les manifestations secondaires d'un déficit de l'inhibition.

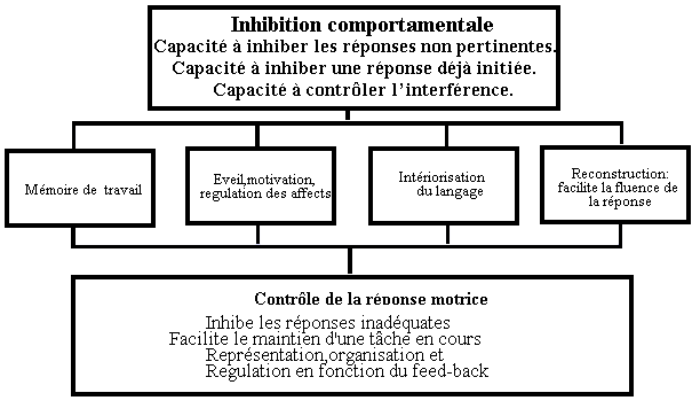


Figure 10. Modèle du TDA/H reposant sur l'hypothèse d'un déficit des fonctions exécutives (Barkley,1997).

4.2.2. Le modèle du déficit d'activation du système d'inhibition comportementale (Behavioural inhibition system, BIS)

En 1985, Gray propose un modèle empirique basé sur un système d'inhibition comportementale (BIS). Dans ce modèle, il postule que le rôle prépondérant du BIS est de contrôler un comportement en cours, d'augmenter la vigilance et de focaliser l'attention sur les indices pertinents dans l'environnement. Ce système serait localisé dans la région septo-

hippocampique avec des connexions vers les aires frontales. En tenant compte des différentes données neurobiologiques et comportementales, Quay (1997) suggère qu'une forte activation du BIS s'exprimerait par une forte sensibilité à la punition, la frustration et la nouveauté, ainsi les sujets ayant une forte activation de ce système auraient une tendance naturelle à éviter les expériences négatives. Par contre, une sous-activation du BIS se traduirait par un comportement à risque, permettant aux sujets d'expérimenter de nouvelles sensations. Quay suggère alors que le déficit clé chez les patients ayant un TDAH serait une sous-activation du BIS.

4.2.3. Le modèle « cognitif-énergétique »

Sergeant et ses collègues ont une toute autre approche (Sergeant, Piek, & Oosterlaan, 2006; Sergeant, 2000). Ils proposent que les difficultés observées chez les patients avec un TDA/H soient liées à des facteurs énergétiques (*éveil*, *effort*, *activation*). Pour ces auteurs, le déficit d'inhibition dépend de l'état du sujet et plus précisément de l'énergie qu'il va mettre à disposition pour la réalisation d'une tâche (Figure 11). Le raisonnement de ces auteurs est basé sur des études montrant une amélioration de la performance chez des enfants avec un TDA/H en présence d'une récompense ou d'une punition (Osterland et al., 1994). De leur point de vue, les facteurs énergétiques influencent tous les autres processus mis en jeu dans le traitement de l'information, de même que le niveau de vigilance nécessaire à l'encodage des informations, la prise de décision et l'activation de la réponse. Ce modèle inclut aussi un module de contrôle de l'exécution nécessaire pour planifier et maintenir les représentations mentales du comportement dirigé vers un but. Ainsi, pour ces auteurs, un niveau d'activation inadéquat du mécanisme d'inhibition chez les individus avec un TDA/H est la clé pour

expliquer le déficit de ces patients lors de paradigmes évaluant la capacité d'inhibition (par exemple, les tâches de go/no go, de stop, de paradigme de changement).

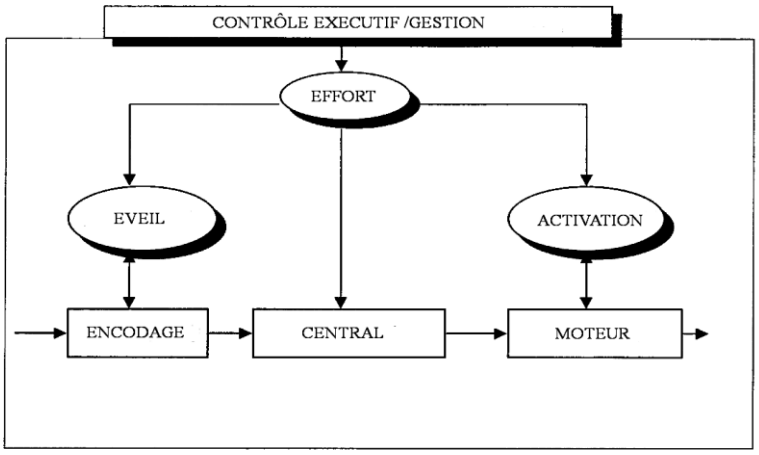


Figure 11. Modèle du TDA/H reposant sur l'hypothèse d'un déficit cognitif énergétique (Sergeant, 2006)

4.2.4. Les modèles motivationnels du TDA/H

Egalement dans le cadre théorique de la motivation mais avec une approche plus neurobiologique, Sagvolden et collaborateurs (1991,1998) ont suggéré que le déficit central chez les patients avec un TDA/H ne serait pas un problème d'inhibition mais serait plutôt lié à un dysfonctionnement motivationnel.

Pour ces auteurs, les symptômes observés chez ces patients sont le résultat d'une perturbation des circuits fronto-striataux connus pour être ceux de la récompense. Celle-ci aurait pour conséquence une réduction du contrôle exercé par la récompense future sur le comportement actuel. En effet, les études de Sagvolden et collaborateurs (1998) montrent que les enfants avec un TDA/H sont plus sensibles au renforcement que les enfants sains, sauf lorsque le renforcement est éloigné temporellement de la réponse, cas où il n'y a alors aucune différence entre les groupes d'enfants. Cette difficulté à attendre parait dissociée d'un déficit de la capacité à inhiber (Solanto et al., 2001; Sonuga-Barke et al., 1994). Ce comportement a été

qualifié d'aversion pour les délais, ce qui rapproche ce modèle de celui proposé par Sonuga-Barke (1994) et portant le nom de modèle d'aversion au délai. Selon celui-ci, l'émotion aversive provoquée par le délai est à l'origine d'un comportement négatif de l'enfant entraînant des difficultés avec son entourage. Deux types de comportement sont possibles selon que l'enfant a le choix de subir le délai ou non. Soit la réponse émotionnelle négative entraîne une tentative d'évitement ou de minimisation du délai ce qui se manifeste alors par un comportement impulsif chez l'enfant. Soit il ne peut pas échapper au délai, et dans ce cas il va essayer de réduire l'attente temporelle en maximisant son attention vers les différentes informations présentes dans l'environnement ce qui entraînera une accélération « du passage du temps ». Dans ce cas, l'enfant apparaîtra comme inattentif et hyperactif pour son entourage (Figure 12).

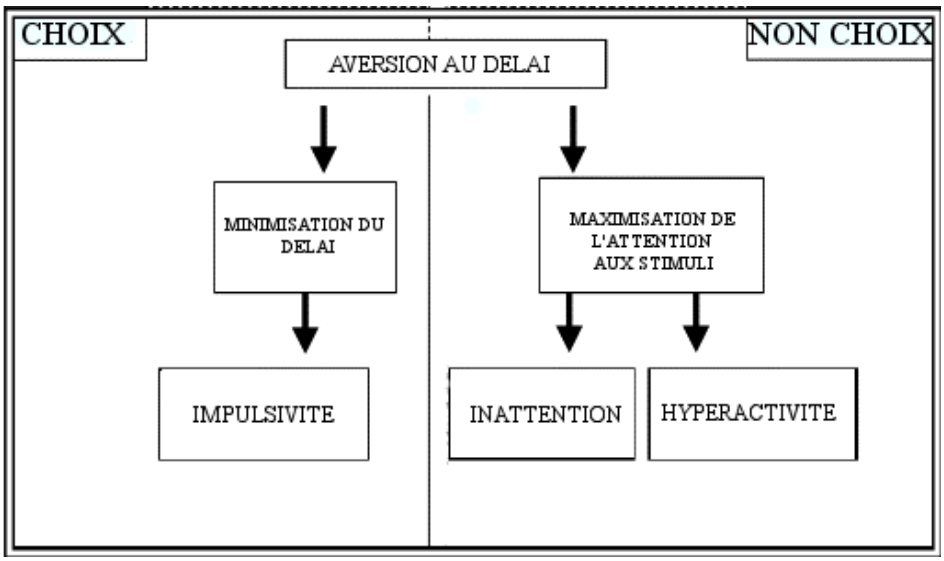


Figure 12. Modèle de l'aversion au délai (Sonuga-Barke, 2003)

Ces modèles, en grande partie, ont été élaborés à partir de résultats obtenus chez l'enfant. En ce qui concerne les adultes avec un TDA/H, de nombreuses études rapportent aussi de moins bonnes performances comparées aux adultes sains dans différentes tâches cognitives, ce qui suggère une prévalence des déficits neuropsychologiques à l'âge adulte (Hervey et al., 2004).

Cependant l'évolution de ces déficits chez l'adulte est moins claire et plus controversées que chez l'enfant. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'adulte avec un TDA/H car ce trouble se révèle être actuellement un problème encore méconnu et pourtant avec un fort impact psychologique et social.

5. Le TDAH chez l'adulte

Les patients dont les symptômes persistent à l'âge adulte rencontrent souvent des difficultés dans leur vie professionnelle, sociale et privée. Par exemple, une situation aussi banale que celle d'une simple conversation peut se voir perturber à cause de l'incapacité à garder son attention fixée sur le discours de l'interlocuteur, ce qui a pour conséquence une pensée qui s'évade. De fait la répétition de ce type d'attitude et la multiplication des étourderies vont rapidement épuiser l'entourage et dans certains cas seront coûteuses et très pénalisantes pour le patient.

Des études longitudinales prospectives comme celle de Weiss (1979) au Canada ainsi que des observations cliniques réalisées chez l'adulte avec un TDA/H ont permis de réaffirmer la persistance d'un tableau clinique chez l'adulte bien que celui-ci soit modifié et plus complexe que chez l'enfant (Tableau 1). Hart et collaborateurs (1995) ont montré qu'à l'âge adulte les symptômes d'hyperactivité et d'impulsivité déclinent notablement, mais pas ceux liés au déficit d'attention. Entre 6 et 20 ans, le nombre moyen de symptômes diminue de 50% pour l'agitation, 40% pour l'impulsivité et seulement 20% pour l'inattention.

Triade chez l'enfant TDA /H	✓ Agitation. ✓ Impulsivité. ✓ Inattention.
Signes remarquables chez l'adulte	✓ Difficulté d'organisation et de planification. ✓ Trouble de l'humeur et des émotions. ✓ Attrait pour l'excitation et la nouveauté. ✓ Troubles de la régularisation de l'alimentation et du sommeil. ✓ Difficultés relationnelles. ✓ Processus d'adaptation.

Tableau 1: Tableau récapitulatif de certains symptômes décrits chez l'adulte. (Tableau adaptée de Bange, 2009)

6. Substrats neurobiologiques du TDAH

6.1. Les système de neurotransmission

Une grande partie de la littérature sur le TDA/H soutient l'hypothèse d'un dysfonctionnement de certains neuromédiateurs d'origine génétique. Bien que différents neuromédiateurs comme la noradrénaline, la sérotonine et le GABA aient parfois été mentionnés, le neuromédiateur le plus impliqué dans le TDA/H serait la dopamine. La focalisation des recherches sur le rôle de la dopamine dans le TDA/H provient d'une part du rôle joué par la dopamine dans le contrôle de l'activité motrice (Costentin, 1995), d'autre part des effets indiscutables des psychostimulants (par exemple, le méthylphénidate) sur les symptômes du TDA/H. En effet, le méthylphénidate semble améliorer les symptômes d'inattention, d'hyperactivité et d'impulsivité (Cantwell, 1996). Il est fait l'hypothèse que le méthylphénidate agirait en bloquant le transporteur de la dopamine (DAT), produisant une augmentation de la quantité et de la durée de présence de dopamine dans la synapse. Des souris chez lesquelles le gène du DAT a été inactivé présentent certaines caractéristiques comportementales du TDA/H, tels que l'hyperactivité ou le déficit de mémorisation et d'apprentissage (Giros et al., 1996;

Gainetdinov et al., 2000). De plus, des études génétiques menées chez les sujets présentant un TDA/H convergent vers l'idée qu'il y aurait une mutation des gènes codant pour les récepteurs D4 (DRD4) et D5 (DRD5) de la dopamine (Heise et al., 2004 ; Whol et al., 2005). Le gène du DRD4 a été un des premiers gènes étudié. Il a été proposé qu'il soit associé à la recherche de nouveauté qui est un trait de caractère associé, entre autres, au TDAH, au trouble des conduites et à l'abus de substances psychoactives (pour revue, voir Kluger et al., 2002).

Par ailleurs, la dopamine est principalement synthétisée et libérée par des populations de neurones très restreintes situées dans l'aire tegmentale ventrale (TAV) et dans la substance noire de la pars compacta (SNc). Les neurones dopaminergiques de la SNc vont principalement se projeter vers la partie supérieure du striatum constitué du noyau caudé et du putamen, structures également connues pour être impliquées dans la modulation de la motricité, tandis que les neurones dopaminergiques de l'ATV vont se projeter vers le cortex frontal (Figure 13). A ce titre, il est intéressant de noter qu'il a été rapporté que le méthylphénidate augmente l'activation frontale chez les enfants et adolescents atteints du TDA/H (Shafritz et al., 2004; Vaidya et al., 1998). Le système dopaminergique semble donc impliqué dans les processus cognitifs attentionnels dont les déficits seraient à l'origine des symptômes présents chez le TDA/H (Schonwald, 2005).

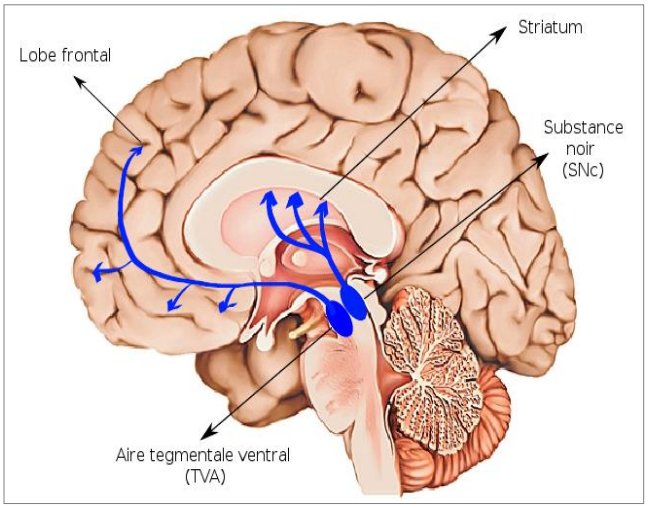


Figure 13. Projections dopaminergiques de la substance noire *pars compacta* (SNc) vers le striatum et de l'aire ventrale tegmentale (TVA) vers le cortex frontal.

6.2. Régions cérébrales impliquées dans le TDA/H.

Différentes études réalisées en imagerie cérébrale anatomique et avec la technique d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ont montré l'implication de certaines régions cérébrales dans le déficit observé chez les sujets avec un TDA/H. En ce qui concerne l'enfant, les études anatomiques ont mis en évidence une réduction de la taille de certaines régions cérébrales comparé aux sujets contrôles (pour revue, voir Valera et al., 2007). Parmi celles-ci, les plus fréquemment citées sont le cortex orbito-frontal, le cortex cingulaire et le cervelet (Berquin et al., 1998; Castellanos et al., 2001; Castellanos et al., 2002; Gustafsson et al., 2000). Les études en IRMf chez l'enfant ont elles révélé une hypoactivation frontale englobant le cortex antérieur cingulaire, le cortex préfrontal dorsolatéral, le cortex préfrontal inférieur et le cortex orbitofrontal, ainsi que des zones qui leur sont reliées telles que le néostriatum, le thalamus et le cortex pariétal lors de la réalisation de différents tâches cognitives (Bush et al., 1999; Castellanos et al., 1996; Durston et al., 2003; Rubia et al., 1999, 2000). En ce qui concerne l'adulte, des régions similaires à celles rapportées chez l'enfant ont également été

rapportées, par exemple, le cortex préfrontal, le cortex cingulaire antérieur, le cortex pariétal et les noyaux gris centraux (Ernst et al., 2003; Zametkin et al., 1990; Schneider et al., 2010).

Cependant une vision théorique plus récente est d'envisager que le TDA/H serait du à une altération de la connectivité au sein et entre plusieurs réseaux de neurones plutôt qu'à des anomalies de régions discrètes et isolées du cerveau. Konrad et Eickhoff (2010) dans une expérience dans laquelle ils étudient la connectivité fonctionnelle dans le TDA/H rapportent que les voies qui relient le cortex préfrontal droit aux ganglions de la base ainsi que celles reliant le gyrus cingulaire au cortex entorhinal seraient détériorées. Par ailleurs, Cortese et collaborateurs (2012) ont réalisé une méta-analyse de 55 études en IRMf chez des patients avec un TDA/H. Leur hypothèse était que les déficits observés chez les patients seraient non seulement liés aux réseaux sous-tendant les fonctions attentionnelles, au réseau de" mode par défaut" mais également aux réseaux impliqués dans les processus sensori-moteurs. Ces auteurs ont étudié les régions hypoactives et hyperactives associées au TDA/H dans le cadre des sept réseaux définis préalablement chez des sujets sains par Yeo et collaborateurs (2011). Ces sept réseaux, limités aux régions corticales, comprennent le réseau fronto-pariétal, le réseau attentionnel dorsal, le réseau attentionnel ventral, le réseau sensori-moteur, le réseau visuel, le réseau limbique et le réseau "du mode par défaut". En ce qui concerne l'enfant avec un TDA/H, ils ont observé une hypoactivité dans le réseau fronto-pariétal et dans le réseau attentionnel ventral et une hyperactivité du réseau du "mode par défaut", du réseau attentionnel ventral, et du système sensori-moteur. En ce qui concerne l'adulte, l'hypoactivité a été trouvée de manière prédominante dans le réseau fronto-pariétal tandis qu'une hyperactivité était observée principalement dans les réseaux visuel, attentionnel dorsal et du "mode par défaut" (Figure 14).

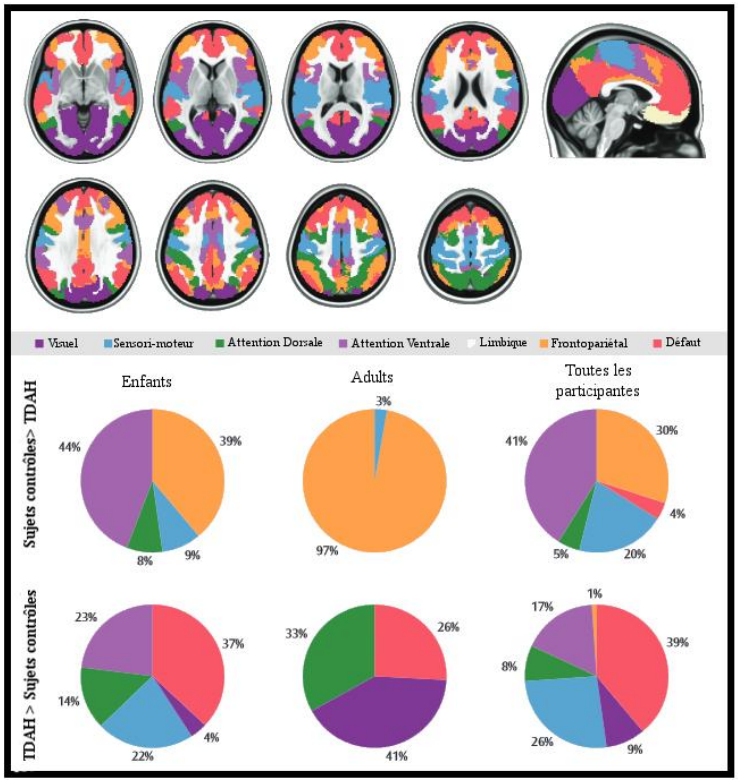


Figure 14. Panneau du haut **:** Régions impliquées dans les sept réseaux décrits par Yeo et al (2011). Panneau du bas : pourcentage de voxels significatif dans le contraste contrôles > TDA/H sur la première ligne et TDA/H > contrôles sur la deuxième ligne (figure adaptée de Cortese et al., 2012).

Chapitre III

L'ATTENTION

1. La notion d'attention

L'attention fait partie de ces fonctions qui sont souvent mentionnées dans la vie quotidienne. Par exemple, il n'est pas nécessaire d'avoir étudié la psychologie pour comprendre la phrase "*fais attention à la marche"* ou *"attention peinture fraiche* ". Mais si l'on s'intéresse aux conséquences d'un « défaut attentionnel », qui peuvent être bien coûteuses par exemple lors d'une situation de partage attentionnel ou encore dans le cas des personnes présentant un TDA/H, il faut alors s'interroger plus en détails sur la nature de cette fonction.

L'attention a suscité un regain d'intérêt à partir des années cinquante et de nombreux modèles ont été proposés pour tenter d'en expliquer le fonctionnement. Mais en 1890 déjà, William James considéré comme un pionnier de la psychologie de l'attention, s'y intéressait et la définissait comme *« la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vive d'un objet ou d'une suite de pensées parmi plusieurs qui semblent possibles [...] Elle implique le retrait de certains objets afin de traiter plus efficacement les autres »*. Il attribuait ainsi à ce processus un rôle sélectif qui aboutit à une amélioration du traitement de l'information.

Goldstein et Goldstein (1990) ont identifié un ensemble de processus et ont proposé que chacun d'eux sous-tende une fonction spécifique de l'attention. Dans la suite et pour donner plus de clarté à notre réflexion, nous considèrerons que l'attention peut remplir au moins trois fonctions : une fonction de sélectivité, une fonction d'activation et une fonction de contrôle.

2. Les fonctions de l’attention

2.1. La fonction de sélection

La capacité de sélectionner une information pertinente parmi le flux d'informations qui nous parvient est un rôle attribué à l'attention. Cette fonction permet au cerveau de ne traiter qu'une partie de toutes les stimulations qui nous arrivent simultanément et dans ce cas l’on parle d’attention sélective.

L'étude de l'attention sélective a souvent été effectuée à l'aide d'expériences mettant en jeu simultanément plusieurs sources d'informations. La contribution des travaux expérimentaux menés par Cherry (1953) avec le paradigme de l’écoute « dichotique » a permis de mieux appréhender cette capacité et a inspiré *a posteriori* des modèles de filtre. Ce paradigme de « l’écoute dichotique » consiste en une présentation de messages auditifs différents délivrés simultanément dans chaque oreille. L'utilisation d'un casque stéréophonique permet de s'assurer que le message délivré dans l'oreille droite ne parvient pas à l'oreille gauche et vice-versa. Il est alors généralement demandé au sujet de focaliser son attention sur une oreille, il se trouve ainsi dans une situation dite d'attention sélective. Cette situation s’oppose à celle où on lui demanderait de répartir son attention entre les deux oreilles, qui serait alors une situation dite d’attention divisée.

L'ensemble des travaux a permis de mettre en évidence les principaux effets liés à la sélection de l'information et a contribué à proposer un rôle de filtre à l’attention qui permettrait d’opérer un tri des informations et donc de sélectionner la cible parmi les distracteurs simultanément présents. La notion de filtre comme mécanisme de sélection attentionnelle implique implicitement l’idée d’un mécanisme d’inhibition de l’information distractive. Par exemple, un filtre appliqué à un signal acoustique laisse passer le signal sélectionné, sans

changer son amplitude et bloque les autres signaux ou bruits. De même, l'attention est conçue comme un algorithme qui favorise la sélection d'une cible dans un milieu bruité, en inhibant le reste de l'information considérée comme non pertinente.

Le premier modèle présentant l'attention comme un « filtre » d'information a été proposé par Broadbent (1958). Selon celui-ci, notre système nerveux fonctionnerait comme un canal de communication unique ne traitant qu'une seule information à la fois. L'attention aurait un rôle régulateur au niveau des informations perceptives qui consisterait à ne laisser passer que les informations utiles vers les étapes de traitement supérieures. Ainsi, selon ce modèle, la sélection s'effectuerait à un stade précoce du traitement de l'information et uniquement sur la base des caractéristiques physiques du stimulus et non pas sur des caractéristiques sémantiques (Figure 15A). Cependant, ce modèle va être rapidement remis en question à la suite d'un ensemble d'expériences prouvant l'existence d'un traitement sémantique des items non attendus (Moray, 1959). En effet, les sujets pouvaient reconnaitre leur nom même si celui-ci était présenté dans l'oreille à laquelle ils ne devaient pas prêter attention. Ceci est en contradiction avec l'idée d'un filtre opérant sur les seules caractéristiques physiques du message.

Quelques années plus tard, Deutsch et Deutsch (1963) proposent un autre modèle pour essayer d'expliquer certains de ces résultats difficiles à intégrer dans un modèle de filtre précoce. Ainsi, ils postulent que le filtre de sélection n'opère pas à un stade précoce mais plutôt à un stade tardif, plus spécifiquement, au niveau de la sélection de la réponse (Figure 15B). Tous les signaux, y compris ceux qui ne sont pas attendus, arriveraient jusqu'à la mémoire à long terme et le filtre limitant les informations traitées n'aurait lieu qu'au moment de choisir une réponse parmi toutes celles possibles.

Parallèlement à ces deux propositions sur le positionnement du filtre surgit un modèle conciliateur proposé par Treisman (1960). Ce modèle propose que le filtre ait une fonction modulatrice. Il ne bloquerait pas systématiquement le traitement des différents stimuli, mais les atténuerait (Figure 15C). Il y aurait en fait un double filtre : le premier trierait les signaux sur la base de leurs caractéristiques physiques et le second, à unités de seuil réglable, permettrait de sélectionner les signaux les plus pertinents. Ces processus permettraient donc de rendre compte des résultats observés précédemment dans le cadre du paradigme de l'écoute « dichotique », expliquant la détérioration des performances pour l'oreille inattentive (qui ne ferait pas l'objet d'un traitement très poussé) et l'amélioration des performances pour l'oreille attentive (qui bénéficierait de toutes les ressources de traitement).

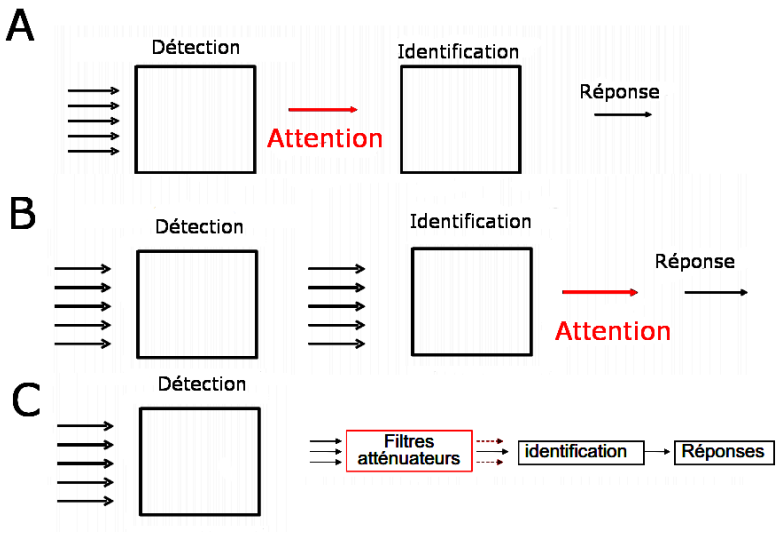


Figure 15. Les modèles de l'attention sélective : **(A)** le modèle du filtre sélectif précoce, **(B)** le modèle du filtre sélectif tardif, **(C)** le modèle de l'atténuation attentionnelle.

2.2. La fonction d'activation de l'attention

La fonction d'activation de l'attention fait référence à l'état général de préparation qui permet au sujet de traiter et de répondre à une stimulation non déterminée de manière efficace. Elle

est influencée par divers facteurs externes (liés aux stimuli) et internes (liés aux aspects biologiques). Elle recouvre divers états qui sont l'alerte, la vigilance et l'attention soutenue.

L'état d'alerte d'un sujet correspond, par exemple, à l'état d'un sujet suite à une consigne ou un signal avertisseur lui annonçant l'arrivée d'une tâche à effectuer. On distingue classiquement deux types d'alerte en fonction de la durée de mobilisation de l'alerte : phasique et tonique. L'alerte phasique correspond à une préparation attentionnelle brève, par exemple celle du sprinter dans les starting-blocks alors que l'alerte tonique permet de rester préparé pendant une plus longue période, par exemple lorsqu'on est arrêté au feu rouge et que l'on attend qu'il passe au vert. Le niveau d'activation pourra être plus élevé en alerte phasique mais maintenu moins longtemps qu'en alerte tonique.

Lorsque la durée des tâches augmente encore, on parle alors de vigilance. Il s'agit de la capacité à maintenir un niveau suffisant d'efficacité attentionnelle au cours de tâches monotones et de longue durée exigeant, par exemple, la détection d'événements qui se produisent rarement. La vigilance est souvent mesurée dans des tâches de détection au cours de laquelle le sujet doit percevoir et rapporter la présence ou l'absence d'un changement spécifié dans l'environnement.

Enfin lorsque le flux d'informations est constant et demande un traitement actif continu de la part du sujet, on parle alors d'attention soutenue qui peut se définir comme la capacité à maintenir sa concentration pour une période de temps important.

2.3. La fonction de contrôle de l’attention

En 1975, Posner et Snyder ont proposé pour la première fois une distinction entre processus automatiques et processus contrôlés. Selon leur modèle, les processus automatiques ont été décrits comme rapides et sans intention. De plus, ils fonctionnent en parallèle et ne demandent pas de ressources attentionnelles. Par contre, les processus contrôlés ont été décrits comme lents et mis en œuvre seulement lors de situation nouvelles ou complexes. Ils sont séquentiels, c’est-à-dire ne pouvant être exécutés de manière simultanée, et consomment des ressources attentionnelles.

Shiffrin et Schneider (1977) ont repris les concepts d’automatique et contrôlé initialement élaborés par Posner et Snyder et ont proposé que la distinction entre ces deux processus repose sur le système de relation établi entre le stimulus et la réponse. En effet, si la relation entre le stimulus et la réponse est toujours la même, le système fait automatiquement intervenir les informations préalablement apprises et stockées dans la mémoire à long terme. Ce mode de fonctionnement se caractérise par sa rapidité et sa résistance aux interférences. En revanche, si la relation entre le stimulus et la réponse est nouvelle ou complexe, de nouvelles relations doivent être établies, le système fonctionne alors de manière contrôlée et fait intervenir la mémoire de travail dont la capacité de traitement est limitée.

Ces auteurs concluent que l’existence de ces deux processus, automatique et contrôlé, est avantageuse car il permet de s'adapter à différentes situations. Ainsi, l'organisme pourra soit s’adapter à des changements environnementaux pour lesquels les situations déjà apprises sont inefficaces, soit répondre à des situations nouvelles pour lesquelles des séquences automatiques n’ont pas été apprises, ou encore il pourra réaliser des traitements complexes à partir de relations automatiques apprises.

Dans la même lignée, au cours des années 1980 une autre distinction a été introduite essentiellement par Posner, celle de mécanismes endogène et exogène (Posner, 1980 ; Posner & Cohen, 1984 ; Chica et al. 2010). Ces deux mécanismes correspondraient à deux modes d'orientation de l'attention vers un stimulus. L'attention endogène correspondrait à l'activation volontaire de la sélection de l'information pertinente due à un contrôle cognitif descendant de type « top-down » et l'attention exogène mettrait en jeu des mécanismes de sélection du stimulus déclenchés par une stimulation sensorielle externe et serait donc sous contrôle périphérique, de type « bottom-up ». Deux procédures d'indiçage spatial ont été utilisées pour mettre en évidence ces deux modes d'orientation attentionnelle (Posner, 1998). Dans les deux cas, les participants doivent répondre le plus rapidement possible à la localisation, droite ou gauche, d'un stimulus à l'aide de deux boutons de réponses latéralisés. La cible consiste en un stimulus lumineux qui apparait à gauche ou à droite d'un point de fixation centrale. Le stimulus cible est précédée par un indice indiquant le côté probable d'apparition de celle-ci. Cet indice peut être de trois natures différentes, soit il est valide et indique donc le côté où le stimulus cible apparaît, soit il est invalide et indique le côté opposé au côté d'apparition du stimulus cible, soit il est neutre et ne fournit aucune information sur le côté d'apparition du stimulus cible. Par conséquent, cette procédure permet d'évaluer l'orientation de l'attention vers une cible.

Dans la procédure d'orientation attentionnelle exogène, l'indice est périphérique (par exemple, un carré lumineux apparaissant à la place potentielle de la cible, du côté opposé ou des deux côtés à la fois) (Figure 16A). Les résultats ont montré que si le délai entre l'apparition de l'indice et le stimulus cible est très court et ne permet pas une saccade oculaire, les résultats se traduisent par un bénéfice sur le TR pour la condition valide uniquement (les conditions invalide et neutre sont identiques), ce qui a conduit les chercheurs à conclure que même sans

mouvement oculaire, un stimulus pouvait bénéficier d'un traitement attentionnel permettant d'accélérer la détection.

Lors de la mise en jeu du processus d'orientation endogène, l'indice est une flèche centrale située au niveau du point de fixation (Figure 16B). Dans ce cas, les auteurs ont observé qu'il y avait un effet de l'indice sur les TR. En effet, les TR sont plus courts avec un indice valide qu'avec un indice neutre, eux-mêmes plus courts qu'avec un indice invalide, ce qui suggère un coût ou un bénéfice selon le type d'indice.

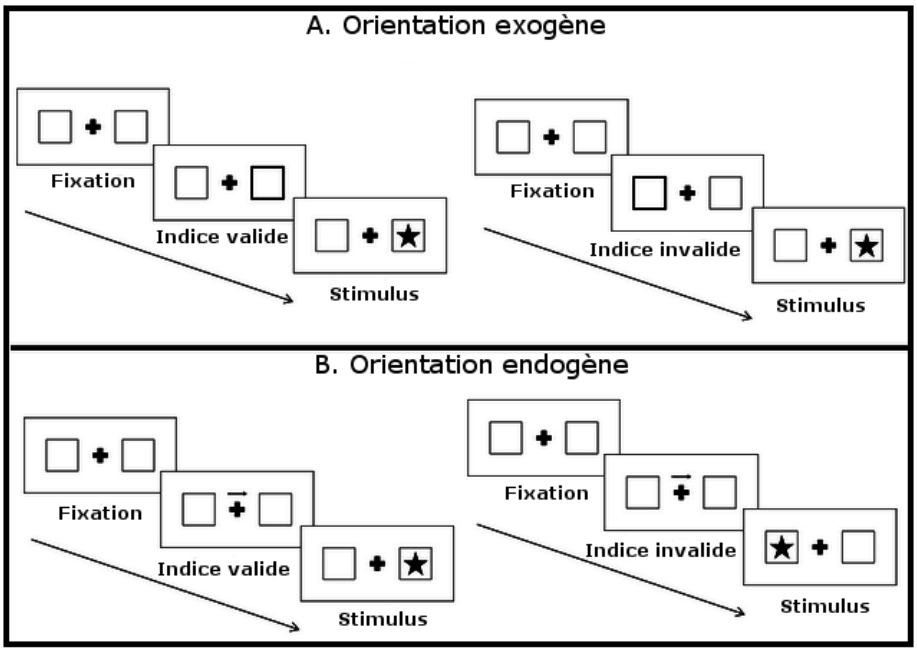


Figure 16. Décours temporel du paradigme de l'orientation attentionnelle (Posner, 1998). **(A)** Indice périphérique et orientation exogène. **(B)** Indice central et orientation endogène.

3. La notion d’attention divisée et de ressources attentionnelles

Une autre problématique liée à l’attention a été celle cherchant à comprendre les processus mis en jeu en situation d’attention divisée, c’est-à-dire pouvant rendre compte de la manière dont notre cerveau pouvait gérer la réalisation de deux actions simultanées.

En 1973, Kahneman propose un modèle à capacité limité selon lequel il n'existerait qu'un seul réservoir de ressources attentionnelles destinées à l’accomplissement d’une tâche et que celles-ci étant disponibles en quantité limitée, elles devraient être partagées entre les différentes tâches en compétition. Dans son modèle, il insiste sur le caractère intensif de l’attention, c'est-à-dire sur la quantité des ressources attentionnelles susceptibles d’être investies en plus ou moins grande quantité (intensité) dans les diverses opérations de traitement. Ainsi, la quantité de ressources disponibles à un instant *t* serait dépendante du niveau d’éveil et également de différences individuelles. L’allocation des ressources serait d’une certaine manière sous contrôle volontaire.

En 1984, Wickens introduit l’idée qu’il pourrait y avoir plusieurs réservoirs de ressources. Selon lui, les ressources d'un même réservoir pourraient être partagées entre plusieurs tâches, et inversement une même tâche pourrait puiser dans des réservoirs différents mais le contenu serait toujours limité. Ainsi ce modèle permettrait d’expliquer pourquoi il est parfois possible de partager son attention entre plusieurs tâches sans forcément assister à un écroulement des performances. En effet, il pourrait y avoir simplement une réorganisation de l'utilisation des ressources, plusieurs réservoirs pouvant même travailler en parallèle. Cette théorie implique un système superviseur central qui gèrerait l’allocation de ces différentes ressources attentionnelles. Ce pourrait même être le rôle premier de l’attention.

Quoiqu'il en soit, aucun de ces modèles ne définit les ressources d'un point de vue anatomique ou fonctionnel, mais ils fournissent néanmoins un cadre intéressant pour l'étude des performances observées dans les paradigmes de double-tâche.

3.1. Le paradigme de la double-tâche

Le paradigme de la double-tâche, comme son nom l'indique, se définit par la réalisation de deux tâches de manière simultanée. Depuis Navon et Gopher (1979), il a été utilisé pour étudier l'impact de la limitation de ressources sur la performance. Ces limitations vont classiquement se refléter par une dégradation de la performance se manifestant par l'allongement du temps de réaction, l'augmentation du taux d'erreur (Hazeltine, Teague & Ivry, 2002; Pashler, 1984; Schumacher et al. 2001; Tombu & Jolicoeur, 2002) ou bien encore par une dégradation de la capacité d'accès à la mémoire (Jacoby, 1991; Moscovitch, 1992). Ainsi, ce paradigme repose sur l'idée générale que deux tâches effectuées concomitamment interfèrent si elles utilisent des mécanismes fonctionnels ou structurels similaires (Navon & Miller, 1987).

3.2. Modèles théoriques interprétatifs de l'interférence dans la double tâche

Dans la littérature qui traite de la double-tâche, divers modèles et concepts tentent de rendre compte de l'interférence observée lors de la réalisation de deux tâches concurrentes (Diedrichsen et al., 2001; Greenwald, 1973; Jolicoeur, 1999; Navon & Gopher, 1979a; Pashler, 1984; Pashler & Johnston, 1989; Schumacher et al., 2001; Tombu & Jolicoeur, 2002; Welford, 1952; Wickens et al., 1983).

Nous regrouperons les modèles prédominants en trois catégories : 1/les modèles à goulot d'étranglement (type *bottleneck*) posant comme principe que le système de traitement a une

capacité limité. Selon ces modèles, l'interférence a lieu lorsque les deux tâches ont besoin en même temps de ressources pour la même étape de traitement (Pashler, 1994), 2/ les modèles à capacité partagée (type *capacity-sharing*) qui proposent que l'attention soit une ressource fluide pouvant être partagée parmi tous ou une partie des processus mentaux, 3/ les modèles dits «*crosstalk*» postulant que l'interférence est dépendante du contenu de la tâche.

3.2.1. Les modèles à goulot d'étranglement

Les modèles du type « goulot d'étranglement » considèrent que l'architecture cognitive du cerveau a un seul canal de traitement (Welford, 1952 ; Pashler, 1984, 1994; Pashler & Johnston, 1989). Selon ce postulat, les informations doivent être traitées de manière séquentielle, c'est-à-dire les unes après les autres puisqu'elles peuvent avoir accès au processeur central seulement une à la fois. Cette observation s'appuie sur le paradigme classique de période réfractaire psychologique (PRP). Ce paradigme comprend deux stimuli S1 et S2 présentés avec un décalage dans le temps, l'intervalle séparant ces deux stimuli est dit SOA (Stimulus Onset Asynchrony) et peut être variable. Les sujets doivent fournir deux réponses rapides et différentes, R1 et R2, respectivement associées aux stimuli S1 et S2. Un effet robuste et classiquement obtenu dans ce type de paradigme consiste en un allongement du temps de réponse R2 quand le SOA diminue. Cet effet a été expliqué par l'existence d'un goulot d'étranglement au niveau duquel les ressources attentionnelles ne pourraient être attribuées qu'à une seule étape de traitement à la fois. Ainsi, la même étape de la seconde tâche nécessitant les mêmes ressources attentionnelles ne pourrait commencer que lorsque cette étape est terminée dans la première tâche (Figure 17).

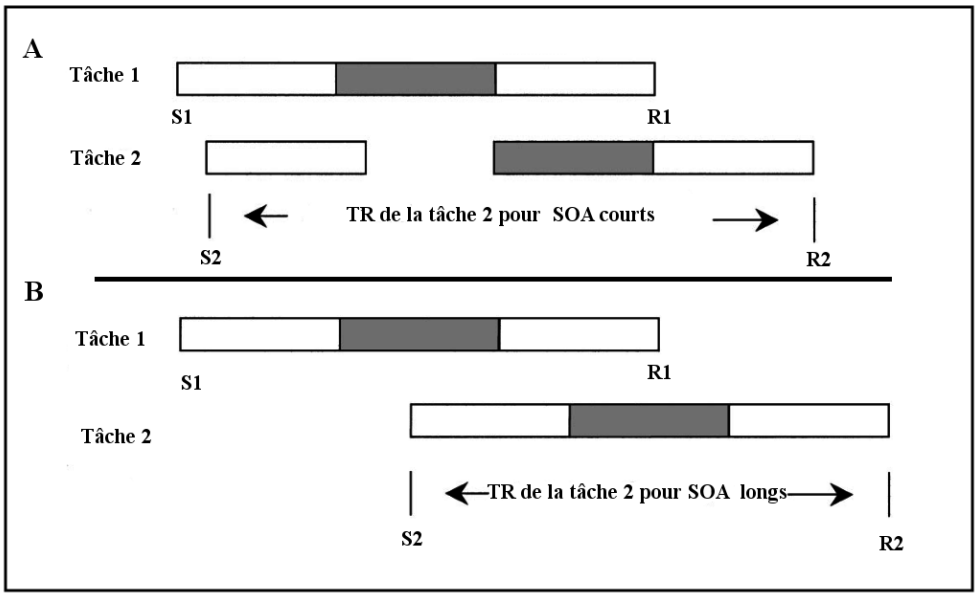


Figure 17. Décours temporel du paradigme de période réfractaire psychologique (PRP). Ce paradigme comprend deux stimuli S1 et S2 présentés avec un décalage dans le temps auxquels les sujets doivent fournir deux réponses rapides et différentes, R1 et R2, respectivement associées aux stimuli S1 et S2. L'intervalle séparant ces deux stimuli, SOA (Stimulus Onset Asynchrony), peut être variable. (**A**) : SOA court, (**B**): SOA long**.**

Dans le cadre de ces modèles, la limitation centrale est conçue soit comme une limitation structurale, soit comme une limitation stratégique, deux conceptions qui s'opposent. Selon l'hypothèse d'une limitation centrale *structurale* il est proposé que l'interférence ait lieu lorsque les deux tâches doivent avoir accès simultanément à la même structure. Certains auteurs suggèrent que les régions cérébrales concernées par le goulot d'étranglement seraient celles responsables de la sélection de la réponse et de la prise de décision (Lien & Proctor, 2003; Pashler & Johnston, 1989 ; McCann & Johnston, 1992; Weldford, 1952). Mais cette conception a été mise en cause par d'autres auteurs suggérant que la limitation centrale pourrait aussi être due à une adaptation stratégique liée aux demandes de l'expérience (Meyer & Kieras, 1997a, 1997b). Un fort argument en faveur de ce postulat a été proposé par Schumacher et collaborateurs (1997). Ces auteurs ont demandé aux participants de réaliser deux tâches soit de manière indépendante, soit simultanément. La première tâche consistait à choisir entre deux réponses manuelles selon la localisation d'un stimulus visuel et la seconde

tâche consistait à fournir une réponse vocale suite à un stimulus auditif. Après plusieurs sessions, la performance dans la condition simultanée était presque identique à la performance de chaque tâche réalisée indépendamment. Ces résultats ont permis aux chercheurs de conclure que les limitations de la double tâche pouvaient être surmontées en éliminant le conflit entre les ressources périphériques spécifiques (les stimuli et les réponses étaient de nature différentes dans les deux tâches) et en fournissant les conditions d'expérimentation adéquates (par exemple, un apprentissage suffisant).

Cependant Levy et Pashler (2001) ont contesté cette interprétation en argumentant que la tâche visuo-manuelle utilisée par Schumacher et collègues (1997) n'exigeait pas de traitement central. L'absence d'interférence serait alors due au fait que les opérations de traitement centrales requises par chacune des tâches ne se chevauchaient pas dans le temps. Ils ont parlé de goulot d'étranglement « dormant ».

3.2.2. Les modèles à capacité partagée (*capacity-sharing*)

Ces modèles rendent comptent de plusieurs résultats difficiles à comprendre dans le contexte des modèles à capacité limitée. Selon ceux-ci, les ressources centrales peuvent être partagées par deux tâches de manière simultanée (Navon & Miller, 2002; Tombu & Jolicoeur, 2002, 2003), toutefois cette exécution en parallèle est limitée à cause de la capacité de traitement (Kanheman, 1973; McCann, 1992), les limitations de cette capacité de traitement n'étant pas généralisées à toutes les étapes de traitement nécessaires pour l'accomplissement de la tâche mais au contraire seulement limitées à certaines opérations centrales (Kanheman, 1973; Posner & Boies, 1971).

Une extension de ces modèles qui est le modèle à réservoir *multiples* propose l'existence de plusieurs réservoirs de ressources dont le contenu serait toujours limité (Wickens, 1980,

1983). Une même tâche pourrait puiser dans des réservoirs différents et inversement les ressources d'un même réservoir pourraient être partagées entre plusieurs tâches. Par exemple, il a plusieurs fois été observé qu'en double-tâche, les performances étaient plus détériorées lorsque les deux tâches utilisent le même stimulus que lorsque les stimuli sont différents.

3.2.3. Les modèles *cross-talks*

Les modèles à réservoirs multiples ont inspiré un autre courant de pensée qui a accentué le rôle du contenu de la tâche dans l'interférence. Ceux-ci sont mieux connus sous le nom de modèles *cross-talks* (Navon, 1984; Navon et Miller, 1987). Ces modèles postulent que l'interférence est liée aux interactions entre les codes centraux, c'est-à-dire à l'activation simultanée des liens spécifiques entre les modalités d'entrée et de sortie. Ainsi, la sélection d'une réponse manuelle à un stimulus visuel engagera un ensemble d'opérations centrales différent de celui engagé par la sélection d'une réponse vocale à ce même stimulus.

Dans ce cadre, Hazeltine & Wifall (2011) ont approfondi les mécanismes qui sous-tendent l'effet de compatibilité entre les modalités d'entrée et de sortie. Plus spécifiquement, ils ont examiné dans quelle mesure les processus de sélection de la réponse étaient reliés aux modalités d'entrée sur la base d'association stockées en mémoire de travail. Dans leur paradigme, ils ont combiné une tâche de temps de réaction de choix qui pouvait impliquer soit une réponse vocale, soit une réponse manuelle, avec une tâche de mémoire impliquant soit la mémoire de travail auditive, soit la mémoire de travail visuo-spatiale. Ils ont montré que les réponses vocales interféraient avec la mémoire de travail auditive alors que les réponses manuelles interféraient avec la mémoire de travail visuo-spatiale, suggérant que la sélection de la réponse mettait bien en jeu des associations stockées dans la mémoire de travail spécifique de chaque modalité.

A partir des travaux de Hazeltine (2011), Schumacher et collaborateurs (2011) se sont intéressés aux activités cérébrales associées à ces situations de double-tâche. Dans leur expérience, les sujets devaient réaliser deux tâches d'Eriksen simultanément, l'une en modalité auditive, l'autre en modalité visuelle ; dans les deux cas, les réponses étaient un appui sur un bouton. Les résultats ont montré que dans le cas d'une association visuo-manuelle, l'activité était augmentée dans le cortex préfrontal médian, le cortex prémoteur, pariétal, le cortex temporo-occipital et le putamen, tandis que pour une association entre un stimulus auditif et une réponse manuelle, le gyrus frontal gauche seul était activé. Par ailleurs, quelle que soit la modalité, le cortex préfrontal gauche, le cortex préfrontal médian, le cortex prémoteur, le cortex pariétal et le putamen étaient activés. Cette étude suggère donc qu'à côté d'un ensemble de régions fronto-pariétales identifiées comme étant impliquées dans la sélection de la réponse dans différentes études (Hazeltine et al., 2003 ; Jiang & Kanwisher, 2003; MacDonald et al., 2000; Schumacher et al., 2007; Schumacher & D'Esposito ,2002), il existe néanmoins des structures cérébrales différentes activées de manière spécifique selon le type d'association entre les modalités d'entrée et de sortie.

L'étude de Stephan & Koch (2010) mérite également un certain intérêt. Ces auteurs ont étudié l'influence de la modalité de l'association entrée-sortie sur des tâches de transfert (*« serial task switching »*). L'association entrée-sortie pouvait être de type compatible (visuo-manuelle et auditive-verbale) ou incompatibles (visuo-verbale et auditive–manuelle). Les auteurs ont montré que le coût du transfert d'une tâche à l'autre était bien plus important lorsque les sujets passaient d'une tâche visuo-verbale à une tâche auditive-manuelle que lorsqu'ils passaient d'une tâche visuo-manuelle à une tâche auditive-verbale. Cette expérience fournit donc d'autres types d'arguments en faveur de l'idée que le facteur responsable de l'interférence entre tâches ne se situe pas au niveau du code de réponses mais plutôt au niveau de la voie de traitement.

Ainsi, ces expériences semblent montrer que la spécificité des liens entre la modalité d'entrée (stimulus) et la modalité de sortie (réponse) joue un rôle important dans la double tâche. Hazeltine et collaborateurs(2011) ont employé le terme « d'action intermodale » (*cross-modal action*) précisément pour souligner l'importance du rôle des modalités d'entrée et de sortie et de la manière dont elles sont associées dans la double tache.

Malgré tout, le débat sur l'origine de l'interférence dans la double-tâche continue, mais ce paradigme reste un cadre excellent pour étudier la performance dans des conditions de ressources limitées.

4. Substrats neurobiologiques de l'attention

De nombreuses études utilisant la technique d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et la tomographie par émissions de positrons (TEP) ont permis de rendre compte des substrats neurobiologiques de certains mécanismes attentionnels. Il semble actuellement exister un consensus autour de trois systèmes attentionnels séparés anatomiquement et fonctionnellement: le système attentionnel antérieur (ou ventral), le système attentionnel postérieur (ou dorsal) et le système de vigilance (Posner & Raichle 1994, Posner & Petersen, 1990 ; Fan et al., 2002; Callejas et al., 2004 ;Corbetta et al., 2000).

4.1. Le réseau attentionnel postérieur, substrat de l'orientation attentionnelle

Depuis Posner et collaborateur (1990), plusieurs structures regroupées sous le nom de réseau postérieur ont été proposées comme substrat neurobiologique des processus d'orientation de l'attention. Ce réseau comprend un ensemble de structures bilatérales qui sont les lobules pariétaux posterieurs, les colliculi supérieurs, les noyaux pulvinar, les sillons intra-pariétaux,

et certaines zones du cervelet (Figure 18). Depuis, d'autres données issues soit d'études chez les patients, soit obtenues en imagerie fonctionnelle sont venues confirmer cette proposition.

Chez le patient, il a été observé qu'une lésion du lobe pariétal provoque le syndrome clinique de négligence spatiale unilatérale qui se manifeste par une incapacité du patient à réagir et signaler les stimuli situés controlatéralement à la lésion (De Renzi, 1982). L'ensemble de ces observations suggère donc un rôle du lobe pariétal dans l'orientation attentionnelle.

Corbetta et collaborateurs (1993) ont eux étudié les variations d'activité cérébrale en fonction du type d'attention mis en jeu, endogène ou exogène, et en fonction de l'hémichamp visuel vers lequel l'attention était portée. Ils ont observé une augmentation d'activité dans le lobe pariétal supérieur associée à l'orientation attentionnelle, qu'elle soit d'origine endogène ou exogène. Ils ont également mis en évidence des différences d'activité au niveau pariétal selon que l'attention devait se porter vers l'hémichamp visuel gauche ou droit. En effet, lorsque les sujets portaient leur attention vers la gauche, une augmentation d'activité au niveau du lobe pariétal supérieur droit était observée, alors que lorsqu'ils portaient leur attention vers la droite, l'activité augmentait bilatéralement dans les lobes pariétaux supérieurs gauche et droit. Les zones activées au niveau du lobe pariétal supérieur droit étaient donc distinctes selon que l'attention était portée à droite ou à gauche. Selon les auteurs, le lobe pariétal supérieur pourrait sous-tendre les processus permettant un changement d'orientation spatiale.

Une activité dans cette région a également été observée lors de saccades oculaires vers le champ visuel périphérique, que celles-ci soient déclenchées volontairement ou par l'apparition d'un stimulus (Anderson, 1989; Petersen et al. 1993). Hunton et collaborateurs (1995) ont aussi observé une augmentation de l'activité dans cette région lors de la recherche visuelle de cibles définies par leur couleur ou leur orientation.

4.2 Substrats neurobiologiques de l'attention sélective

Posner et collaborateurs (1990) sont parmi les premiers à s'être intéressés aux structures cérébrales sous-tendant l'attention sélective. A partir d'une étude réalisée en tomographie par émission de positons, ils ont proposé que ces processus soient sous la dépendance d'un ensemble d'aires regroupées sous le nom de réseau antérieur (Figure 18) et qui comprend les aires du cortex préfrontal médian, tels que le cortex cingulaire antérieur (CCA) et l'aire motrice supplémentaire (AMS). Ces aires ont été mises en évidence lors de différents paradigmes de sélection de cibles. Plusieurs études ont fourni des arguments en ce sens.

Corbetta et collègues (1993) ont rapporté une augmentation de l'activité dans le CCA lors d'une tâche de recherche visuelle. Des résultats similaires ont également été rapportés par Pardo et collaborateurs (1990) en utilisant des paradigmes d'interférence, notamment celui de Stroop dans lequel le sujet doit dénommer la couleur de l'encre dans laquelle des mots désignant des couleurs sont écrits. Dans ce paradigme, il existe des situations dites « incongruentes » dans lesquelles la couleur de l'encre ne correspond pas au nom de couleur écrit (par exemple, bleu) et d'autres dites « congruentes » dans lesquelles la couleur de l'encre correspond au mot écrit (par exemple, bleu). Il est classiquement observé que le temps de dénomination de la couleur de l'encre est plus long lorsque la condition est « incongruente » et cet allongement du temps de réponse a été attribué à l'existence d'une interférence entre la couleur de l'encre et le nom de couleur écrit. Les auteurs ont rapporté que l'activité du CCA était plus importante dans les situations incongruentes que dans les situations congruentes, suggérant un rôle du CCA non seulement dans la sélection de la réponse mais aussi lors de processus plus contrôlés de l'attention. De plus, l'activité du CCA n'a pas été simplement observée lors de tâches visuelles mais elle a aussi été mise en évidence lors d'une étude en TEP portant sur l'attention sélective auditive (Tzourio et al., 1997).

4.3. Substrats neurobiologiques de la vigilance

Posner et collaborateurs (1990) ont également proposé un réseau impliqué dans la fonction de vigilance. Celui-ci est composé de la jonction temporo-pariétale, du cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL), du cortex frontal insulaire ventral (INS/CFV), ainsi que du thalamus et du locus coerulus (LC) (Figure 18). L'activité de ce réseau avait notamment été mise en évidence pendant la période préparatoire dans des tâches de temps de réaction, ou encore dans des tâches dans lesquelles les sujets devaient attendre l'apparition de cibles peu fréquentes (Posner & Petersen, 1990). Plus récemment, Sturm (2002) a confirmé l'existence de ce réseau dans une revue de questions synthétisant les informations issues d'études de performances de patients cérébro-lésés et d'études réalisées en TEP. Dans cette revue, plusieurs études mentionnaient le cortex préfrontal dorso-latéral (CPDL) comme étant plus particulièrement associé à la vigilance. Il était également rapporté qu'une lésion de cette même aire entraînait un déficit de la capacité à maintenir un état d'alerte. Par ailleurs, l'implication de la région préfrontale droite a également été mise en évidence lors d'une tâche de vigilance concernant les modalités visuelles et somesthésiques (Pardo et al., 1991).

Cette interprétation est aussi en accord avec des résultats rapportés par Mac Donald et collègues (2000) dans une expérience dans laquelle ils ont comparé le niveau d'activation du CPDL et du cortex cingulaire antérieur (CCA) dans la période préparatoire et dans la phase d'exécution lors d'une tâche de type Stroop. Dans leur expérience, les sujets devaient soit nommer la couleur d'un mot, soit lire un mot. Chaque essai comprenait une période préparatoire et une phase d'exécution. La période préparatoire était initiée par un indice indiquant au sujet la tâche qu'il avait à effectuer. Les auteurs ont observé que le taux d'activation du CPDL était modulé pendant la période préparatoire selon l'indice donné, ce qui n'était pas le cas du CCA. En revanche, le niveau d'activité du CPDL était inchangé

pendant la phase d'exécution, quelle que soit la tâche réalisée, ce qui soutient bien l'idée d'un rôle spécifique de cette aire dans la vigilance.

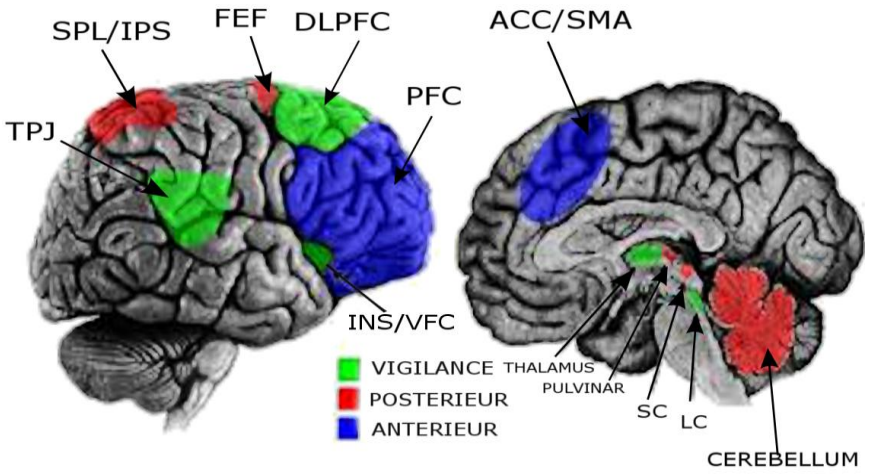


Figure 18. Régions corticales et sous-corticales impliquées dans l'attention (Posner et al. 1990). Le réseau de la vigilance (en vert) est impliqué dans les régions fronto-pariétales latéralisées à droite, telles que la jonction temporo-pariétale (TJP), le cortex préfrontal dorsolatéral (DLPFC) et le cortex frontal insulaire ventral (INS/VFC), ainsi que le thalamus et le locus coerulus (LC). Le réseau postérieur (en rouge) impliqué dans l'orientation attentionnelle comprend des zones bilatérales pariétales dorsales : le sillon intrapariétal (SPL/IPS), les aires oculaires frontales (FEF), les colliculi superieurs (CS), la region pulvinar et le cervelet. Le réseau antérieur (en bleu) comprend le cortex préfrontal (PFC), le gyrus cingulaire antérieur (ACC) et l'aire motrice supplémentaire (SMA).

5. Le rôle de l'attention dans l'estimation du temps

Même si seulement certaines situations requièrent son contrôle, la durée fait partie intégrante de tout comportement. Si il a longtemps été proposé que la perception du temps n'était qu'une reconstruction à partir des informations traitées par l'organisme, la densité des changements perçues (Fraisse, 1957), le nombre d'événements par unité de temps (Frankenhaeuser, 1959, Ornstein, 1969), il est maintenant clairement admis que dans les situations dans lesquelles la prise en compte de l'information temporelle et son contrôle sont indispensables au développement d'un comportement adapté, des mécanismes et des structures spécifiquement dédiés à la mesure du temps seraient mis en jeu (Gibbon, Church et Meck, 1984; Bushusi &

Meck, 2005). Le modèle prédominant selon lequel la mesure du temps repose sur un système dédié, l'horloge interne, a été proposé à l'origine sur la base de résultats expérimentaux obtenus chez l'animal par Gibbon et Church (1984) mais il a largement été validé depuis par des études réalisées chez l'homme également.

5.1. Le modèle de l'horloge interne

Le modèle de l'horloge interne est organisé en trois niveaux : horloge, mémoire et décision (figure 19). Le premier niveau de l'horloge comprend un *« pacemaker »,* ou base de temps, qui correspond à un mécanisme interne générant des impulsions de manière régulière; celles-ci transitent ensuite par l'interrupteur qui se ferme pour les laisser passer dans un accumulateur où elles seront stockées. L'accumulateur se comporte comme un compteur qui additionne les impulsions de manière absolue. Le second niveau, celui de la mémoire de travail et de la mémoire de référence, permet le stockage temporaire (mémoire de travail) ou permanent (mémoire de référence), des représentations des durées sous forme de quantité d'impulsions. La mémoire de travail stocke l'information relative à l'essai en cours et est sollicitée uniquement lorsqu'un délai existe entre la fin du stimulus et la réponse à donner et la mémoire de référence stocke en permanence l'information relative aux essais passés ainsi que la conséquence des réponses qui leur sont associées. Le troisième niveau correspond à la prise de décision. La réponse sera déterminée en se basant sur une règle de décision qui implique une comparaison entre le contenu de l'accumulateur (ou de la mémoire de travail) avec celui stocké en mémoire de référence. La décision d'émettre une réponse sera prise sur la base d'une règle de similitude entre les deux.

L'influence de différents facteurs sur le fonctionnement de cette horloge interne a été largement étudiée. Les principaux sont le niveau d'activation cérébrale du sujet (Treisman et

al., 1990; Burle & Casini, 2001) et l'attention accordée à la tâche temporelle (Zakay, 1989; Casini et Macar, 1997; pour revue, voir Brown, 1997).

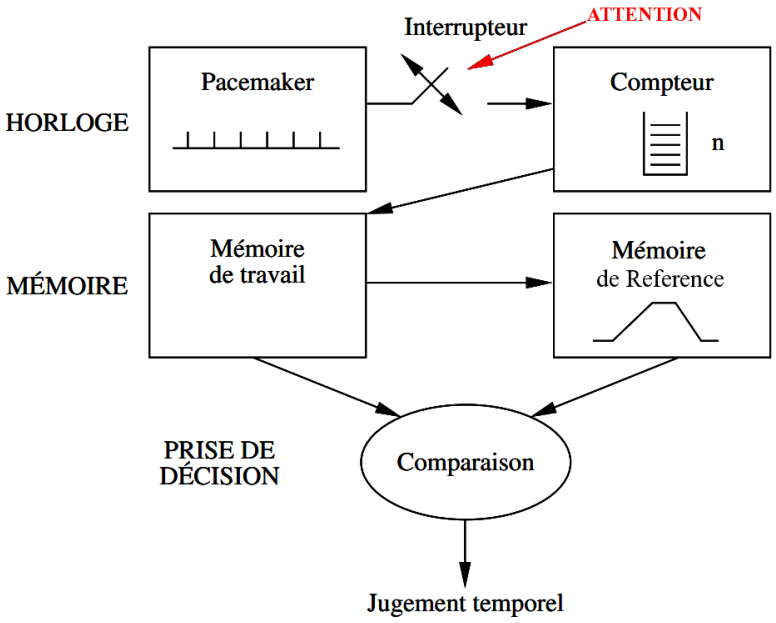


Figure 19. Représentation schématique du modèle de l'horloge interne (Church, 1984). Celui-ci est organisé en trois niveaux : horloge, mémoire et prise de décision. Le pacemaker (ou base de temps) produit des impulsions qui passent *via* l'interrupteur dans l'accumulateur, avant d'être transférées dans la mémoire de travail. Le comparateur comparera à chaque essai la valeur stockée en mémoire de travail avec celle de la mémoire de référence. L'attention agirait au niveau de l'interrupteur (Burle & Casini, 2001).

5.2. Effet de l'attention sur les jugements temporels

Dès 1975, Thomas et Weaver émettent l'idée que les jugements temporels reposent sur un double traitement des stimuli présents dans notre environnement. Ils proposent que tout stimulus soit traité à la fois par un processeur temporel qui effectue un codage temporel directement relié à la durée du stimulus et un système de traitement de l'information non-temporelle qui traite les autres aspects pertinents du stimulus. Ces deux processeurs seraient tous deux en compétition pour obtenir des ressources attentionnelles (Navon & Gropher, 1979). Pour Thomas et Weaver, la fiabilité de la sortie du processeur temporel dépend de la

quantité d'attention qui lui est accordée : plus le processeur non temporel captera de l'attention, moins le résultat du traitement par le processeur temporel sera fiable. Ils sont donc les premiers à proposer un rôle fondamental de l'attention dans les jugements temporels. En 1989, Zakay affine cette idée et propose que seule la sortie du processeur le plus fiable est à l'origine de la durée estimée, l'autre étant éliminée. En outre, il propose que, pendant chaque intervalle de temps mesuré, des « unités de temps subjectif » s'accumulent dans le processeur temporel et que la durée de l'intervalle est reliée à la quantité « d'unités de temps subjectif » accumulées. Lorsque l'attention est davantage portée au traitement non-temporel de l'information, il y aurait une perte « d'unités de temps subjectif » au niveau du processeur temporel, de ce fait la durée subjective diminuerait. La durée est donc une fonction directe de la quantité d'attention allouée au passage du temps et la fiabilité du processeur temporel dépend de l'attention qui lui est accordée.

D'autres auteurs tentent de préciser l'influence de l'attention sur le traitement temporel en s'inscrivant dans le cadre du modèle de l'horloge interne et en utilisant le paradigme de la double tâche dans lequel on demande aux sujets de réaliser simultanément deux tâches, l'une temporelle, l'autre dite non temporelle. Dans ces expériences, soit la complexité ou la difficulté de la tâche non temporelle est manipulée de manière à capter plus ou moins de ressources attentionnelles (Hicks et al., 1976; Hicks et al., 1977, McClain, 1983; pour revue, Brown, 1997), soit la quantité de ressources attentionnelles accordée à chacune des tâches est contrôlée par des consignes explicites de partage attentionnel (Casini & Macar, 1997; Macar et al., 1994). L'ensemble des données expérimentales révèlent que lorsque les ressources attentionnelles sont détournées des paramètres temporels, non seulement la performance temporelle est détériorée, mais en plus cette détérioration est systématiquement due à un raccourcissement de la durée subjective. L'hypothèse proposée pour expliquer ces résultats est

que lorsque l'attention n'est pas allouée à la durée, il y a une diminution du nombre d'impulsions comptabilisées dans l'accumulateur, ce qui occasionne une estimation du temps raccourcie (pour revue, Brown, 1997; Burle & Casini, 2001; Casini & Macar, 1997). En 2001, Burle et Casini, en manipulant de manière conjointe le niveau d'activation cérébrale du sujet et l'attention allouée à la tâche temporelle, ont démontré que l'attention agirait au niveau de l'interrupteur qui s'ouvrirait et donc bloquerait le passage des impulsions à chaque fois que l'attention est détournée des paramètres temporels de la tâche.

Pour résumer, il a été largement établi dans la littérature de la psychologie du temps que les jugements temporels sont particulièrement sensibles à la quantité de ressources attentionnelles disponibles.

Contribution expérimentale

Cette deuxième partie présente les contributions expérimentales. Elle est constituée de trois articles issus de différentes expériences. **La contribution 1** est un article récemment soumis à *Experimental Psychology;* il est composé de 4 expériences comportementales et il a pour objectif l'étude du rôle de l'attention dans le contrôle de l'interférence. Nous avons manipulé la quantité de ressources attentionnelles disponibles en demandant aux participants de réaliser une double-tâche c'est-à-dire une tâche de Simon simultanément à des tâches secondaires de natures diverses. Les distributions des TR et plus spécifiquement les courbes-delta obtenues en condition de simple et double-tâche ont été comparées. Les résultats obtenus ont montré 1/ que la réduction de l'interférence pour les TR les plus longs pouvait être supprimée lorsque la tâche de Simon était réalisée simultanément avec une tâche secondaire et 2/ que la nature de la tâche secondaire était également un facteur critique. Ceci suggère que les mécanismes responsables de la décroissance de l'effet Simon sont sous la dépendance de ressources attentionnelles spécifiques. **La contribution 2** est un article en préparation pour être soumis prochainement à *Neuropsychology* . Il a pour objectif l'étude du contrôle de l'interférence chez des patients ayant un déficit attentionnel comme c'est le cas des adultes avec un TDA/H. Pour cela, les analyses de distributions couplées à des enregistrements électromyographiques ont été utilisées pour comparer la performance de ces patients à ceux d'adultes contrôles dans une tâche de Simon. Les résultats obtenus ont permis de confirmer un déficit dans le contrôle de l'interférence puisque les sujets avec un TDA/H ont obtenu un effet Simon plus large. En outre, les outils utilisés nous ont permis d'étudier plus en détails certains processus mis en jeu dans ce contrôle de l'interférence et ont révélé que les adultes avec un TDA/H ne présentaient ni une sensibilité plus importante au déclenchement automatique de la réponse par la route rapide, ni un déficit de la capacité à supprimer cette activation. L'effet d'interférence plus large observé chez nos patients serait plutôt dû à un déficit de vigilance.

Enfin, **la contribution 3** est un article publié dans *Cognitive Neuropsychology* et ayant pour objectif l'étude des performances des adultes avec un TDA/H dans une tâche de bissection temporelle. Les résultats principaux ont été que 1/ les patients surestiment la durée des stimuli tant auditifs que visuels en comparaison au groupe témoin, 2/ ils présentent une variabilité perceptive plus importante et 3/ les degrés de surestimation et de variabilité sont comparables dans les deux modalités. Ces résultats, interprétés dans le cadre de l'horloge interne, ont permis de suggérer que les adultes avec un TDA/H ne présentaient pas de trouble de l'attention sélective car cela aurait du se traduire par une sous-estimation des durées et non une surestimation mais qu'en revanche ils présentaient probablement un déficit de la vigilance (ou attention soutenue) ou encore de la mémoire de référence.

Chapitre IV

Contribution expérimentale 1

Title:

A dual-task paradigm to study the interference reduction in the Simon task.

Authors:

Isabel Suarez[1], Franck Vidal[1], Boris Burle[1], Laurence Casini[1]

Affiliation :

[1]Aix-Marseille Université, CNRS, UMR 7291, FR 3C

Keywords:

Simon task, interference control, attention, dual-task, RT distribution analysis

Article récemment soumis à *Experimental Psychology*

Abstract (148 words)

Analysis of RT distributions in the Simon task reveals that congruency effects decrease for the longest RTs. Four experiments were carried out to examine whether this decrease of the congruency effect with time was under a top-down or a bottom-up control. We specifically manipulated the availability of attentional resources by requiring participants to perform a Simon task concurrently to different secondary tasks. RT distribution analysis (in particular delta plots) was performed under both single-task and dual-task conditions. Results show that the reduction of the interference effect with time could be affected when the Simon task was preformed concurrently with a secondary task. Nonetheless, the type of the secondary task seems to be a critical factor. Therefore, the data suggest that the mechanisms responsible for the reduction of the interference effect with time are under some attentional control but the exact nature of these mechanisms remains to be explored

Introduction

We are constantly dealing with different and complex stimuli from the environment. To behave successfully we need to distinguish and select relevant stimuli from interferent irrelevant ones which compete for control of action. Sometimes irrelevant stimuli automatically activate an erroneous response that we need to suppress. This ability has been largely described as response inhibition and is a key component of goal-directed behavior. It refers to the suppression of prepotent response tendencies when they are automatically activated but inappropriate. This type of inhibition is traditionally studied in paradigms known to activate concurrently competing response tendencies such as the Simon task (Simon, 1969).

In a standard version of the Simon task, participants have to choose between a left and a right-hand key press according to the color of a visual stimulus presented either to the left or the right of a central fixation point. The performance, expressed both in terms of error rate and reaction time (RT), is better when the required response corresponds spatially to the stimulus location (congruent association) than when it does not correspond (incongruent association), even though this location is irrelevant. This effect is called “Simon effect” or “congruency effect” (Hedge et al., 1975, Simon, 1990; Hommel, 2011).

A widely accepted interpretation of the Simon effect is that the stimulus location automatically triggers a response impulse in the ipsilateral hand by a fast route while the relevant stimulus color must be translated into the required response according to the task instructions by a slower controlled route (de Jong et al., 1994; Kornblum, 1994; Proctor et al., 1995). When the stimulus-response association is congruent, the impulse triggered by the irrelevant stimulus location activates the required response, which facilitates response processing. In contrast, when the stimulus-response association is incongruent, the impulse triggered by the irrelevant location activates the non-required response which competes with

the required one. This competition is thought to be at the origin of a performance impairment (expressed as increased RTs and error rates).

Besides those standard measures, a detailed analysis of RT distributions revealed that congruency effect decreases as RTs lengthen (de Jong et al., 1994). A convenient way to visualize this effect is by using delta-plot, which plots the size of the congruency effect as a function of increasing RTs (for more details, see Ridderinkhof et al., 2005 and below). In the Simon task, delta-plots turn negative-going as RT lengthen, showing a decrease in the interference. This decrease in congruency effect for the longest RTs implies that the condition inducing the shortest mean RT (congruent trials) is associated with the largest RT variance. This intriguing result violates the general finding that RT standard-deviation normally grows linearly with mean RT (Wagenmakers & Brown, 2007; Wagenmakers, Grasman, & Molenaar, 2005; Schwartz & Miller, 2012).

In the present study, we investigated whether mechanisms responsible for this decrease of the Simon effect with increasing RT are under a top-down or a bottom-up control. In this aim, we used the delta-plots analysis to investigate the conditions under which this decrease in congruency effect for longest RTs does or does not occur. We reasoned that if top-down mechanisms are at the origin of this unusual negative-going delta-plots, this decrease of congruency effect with time should, at minimum, be sensitive to attentional manipulation. Therefore, in the present study we manipulated the availability of attentional resources to investigate whether the decrease of congruency effect depends on attention.

Performing two tasks at once instead of separately leads to competition or division of attentional resources, provided that the two tasks share common processes. By consequence, dual-task protocols that require the concurrent performance of two independent tasks have often been used to investigate impact of limited attentional resources. Since Navon & Gopher (1979), many dual-task studies have demonstrated task performance impairments especially in

terms of response speed, and/or accuracy (Hazeltine et al, 2002; Pashler, 1984; Schumacher et al., 2001) when participants have to deal with additional task requirements. A dominant model holds that dual-task costs occur because tasks must compete for access to a central bottleneck mechanism that is required across a broad range of tasks. Some authors have proposed that the consequence of this bottleneck is that central operations for one of the tasks must be delayed until the central bottleneck has completed operations required for the other task (Pashler, 1984, 1994). Some others have envisaged that the bottleneck is severely limited in attentional capacity that can be shared between several tasks simultaneously performed (Navon & Miller, 2002; Tombu & Jolicoeur, 2003). Another way to interpret performance deteriorations observed in DT is that performing two tasks simultaneously is also associated with increased working memory demands, which would particularly suffer from attentional processing limitation. Whatever the interpretation, dual-task procedure is a convenient manner to limit attentional capacity devoted to a specific task.

Dual-task procedure in the Simon task has already been used but mainly to study whether the activation of the response that spatially corresponds to the location of the stimulus was endogeneously or exogeneously driven (Proctor & Liu, 1994; Müsseler and Wühr, 2005; Müsseler, Wuhr, Umilta, 2006) or to study the effect of dual-task on sequential effects (Stürmer, et al. 2005). Here, we used it to more deeply investigate the nature of mechanisms responsible for the decrease of interference for slower RTs.

In the present study, the same classic version of the Simon task was used in all experiments: participants had to press a right or left response-key on the basis of the color of the stimulus presented either on the right or on the left of a central visual fixation point, and the availability of attentional resources was decreased by performing another completely unrelated task simultaneously with the Simon task. By comparing delta-plot slope obtained in the Simon task performed either alone as a single task (ST) or in dual-task condition (DT), we

investigated whether mechanisms responsible for congruency effect decrease was sensitive to attentional limitations. If it was the case, the negative going slope of the delta-plots should be affected in the DT condition and more specifically should disappear

General method

Participants

All participants had normal or corrected to normal vision, were paid for their participation and gave written, informed consent to the experimental procedure, following the Helsinki declaration (1964). The study was approved by the "Comité de Protection des Personnes Sud Méditerrannée 1" (N° 1041), in agreement with the French law.

Apparatus and procedure

Participants were seated comfortably in a dimly lit sound-shielded room, facing a black panel, which was located 1 m away and which delivered stimuli used in both tasks. Responses were given with devices specific to each experiment. All stimuli and responses were controlled by a home-made computer program using t-scope (Stevens et al., 2006). Produced durations and RTs were recorded at the nearest millisecond.

In all experiments, after a training session for each task, participants performed three tasks (a secondary task, a Simon task and a dual-task) in a counterbalanced order across participants In the Simon task participants were required to press a right or a left response button depending on the color (green or red) of a LED located either on the right or on the left of a central fixation point, as fast and as accurately as possible. The color-response mapping was balanced across subjects. For each color, there were two types of trials: congruent (CG) trials (response side ipsilateral to stimulus side) and incongruent (IG) trials (response side

controlateral to the stimulus side).

Analysis of results

In each of the experiments we compared performance obtained in single task condition (ST) and in dual-task condition (DT) for each task.

For the Simon task, a first 2 way ANOVA with the following design, 2 congruency conditions (CG *versus* IG) X 2 attentional conditions (ST *versus* DT), was performed on RTs and accuracy rates.In addition to analyses of overall performance (accuracy and mean RT), distribution analyses were performed for error rates and for RTs. The cumulative density functions (CDFs) of correct trials were estimated for each participant and averaged through the so-called "vincentizing" procedure (Ratcliff, 1979, Vincent, 1912): single-trial RTs were rank ordered for each type of trials separately (CG trials and IG trials), and binned into quintiles of equal frequencies (same number of trials). The mean of each bin was computed and equivalent bins were averaged across participants. Delta-plots were constructed by plotting the difference between incongruent and congruent bins, as a function of the mean of incompatible and compatible bin values (for more information, see Ridderinkhof, 2002a, Burle et al., 2002). For distributional accuracy analysis, we computed the so-called "conditional accuracy functions" (CAFs): correct and erroneous trials were mixed together and the resulting distributions were vincentized as described above. For each bin, the proportion of correct trials was computed along with the mean RT of the bin. These couples of data were averaged per bin through participants. This provides the mean accuracy as a function of increasing RTs.

A 3 way ANOVA with the following design, 2 congruency conditions (CG *versus* IG) X 2 attentional conditions (ST *versus* DT) X 5 quintiles, was performed on RTs and on error rates.

Indeed, although delta-plots are shown for RTs distribution, all statistical analyses were performed on the vincentized CDFs.

Since percentages cannot be submitted to ANOVA directly, as the means and variances of percentages tend to be closely related, error rates were arc-sine transformed before being analyzed (Winer, 1970).

Experiment 1

The purpose of the first experiment was to investigate whether mechanisms responsible for congruency effect decrease with time was sensitive to attentional limitations. In this aim we decreased attentional resources available for the Simon task by requiring participants to perform the Simon task simultaneously to a duration-production task. Indeed, it has been shown in a large amount of experiments that temporal processing is particularly attention demanding (for reviews, see Block et al., 2010 and Brown, 1997; Burle & Casini, 2001; Casini & Macar, 1997; Macar et al., 1994; Hicks et al., 1977; Thomas & Weaver, 1975). Temporal processing is assumed to rely upon an internal clock consisting of three components, a pacemaker delivering pulses which pass through a switch to be accumulated in an accumulator (Gibbon& Church 1984). The duration to be produced or estimated depends on the amount of accumulated pulses. It is now largely admitted that the switch needs attention to function efficiently (Burle & Casini, 2001; Block et al., 2010). By the consequence, our hypothesis was that 1/ the duration-production task should capture a lot of attentional resources yieding to a decrease in the Simon RT task performance under DT condition, and 2/ if mechanisms responsible for the decrease of interference with time were sensitive to attention, the negative going slopes should be suppressed in DT condition.

Method

Participants. Eighteen participants participated in the experiment (10 women and 8 men, mean age: 25 years, range: 20 - 30 years old).

Apparatus. Participants were seated facing a black panel, which contained four light-emitting diodes (LEDs). Three LEDs were horizontally aligned and spaced 2.5 cm apart. The two lateral ones could be red or green and the central one was blue. The fourth LED (white) was 2.5 cm under the central blue one (see Figure 1A). In the Simon task participants used their right and left thumbs to press one of two response buttons fixed on a table in front of them. In the duration-production task they used their knees to press a response device located between their legs (see Figure 1B, Vidal et al. 1991).

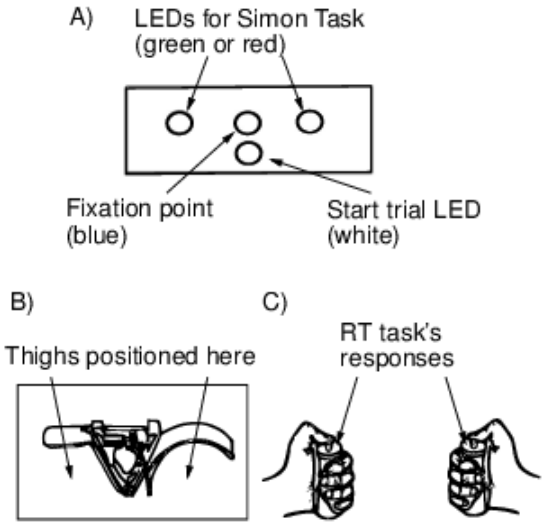


Figure 1. Experimental apparatus in Experiment 1 : (**A**) stimuli panel, (**B**) device located between participant knees to produce duration intervals, (**C**) response buttons for Simon task.

Procedure

Duration-production task training. The training session was made of two parts. The first part

consisted of 20 trials. The illumination of the white LED indicating the beginning of the trial was followed by a tone (600 Hz) sounded during 1100 ms. When the tone ended, participants reproduced the duration of the tone by pressing the response device with their knees. The blue LED was lit during the whole time interval. When participants released the knee pressure, an auditory feed-back was delivered. Five different feedbacks were used. If the produced interval was correct (less than 7.5% longer or shorter than the target), the word "correct" was delivered. If the produced interval was too long or too short (7.5% - 22.5% longer or shorter than the target), either the words *"Trop long"* (too long) or *"trop court"* (too short) were delivered. If the duration was excessively long or short (more than 22.5% longer or shorter) the words *"beaucoup trop long"* (too much long) or *"beaucoup trop court"* (too much short) were delivered.

After the first 20 trials, the second part of the training was announced by the experimenter. In this part no additional model of target duration was delivered. Once the white LED lit up, participants had to produce the target duration (1100 ms). As in the first part, an auditory feedback was delivered following each response. The participants continued until they produced twelve correct durations throughout fifteen successive trials. On average, 32.2 trials (SD = 9.4) were necessary to reach the criterion.

Simon task and dual-task trainings. For the Simon task and the dual-task participants performed one training block of 48 trials. Since for both tasks the procedure of the training session was the same as the experimental session, the details are given in the experimental session.

Duration-production task (experimental session). The participants' task was to maintain a key-press with their knees for 1100 ms. Trial onset was initiated by participants once the white LED lighted. Participants had to maintain the knee-press as long as necessary to time the

required duration. No feedback on performance was given. During the duration production period the central blue LED was lit, serving as a fixation point. Two seconds after the release of the key the white LED lighted-up again, indicating that the next trial could start. Participants performed one block of 96 trials.

Simon task (experimental session). Participants were required to press the right or the left response button depending on the color of the LED, as fast and as accurately as possible. Once the white LED lighted, participants initiated the trial onset by briefly pressing the knee-device. As soon as they pressed it, the central blue LED, serving as a fixation point and as a warning signal, lighted up. After a variable delay (ranging from 250 ms to 600 ms) following the warning signal, one of the two lateral LEDs lighted up either in green or red. Participants had to briefly press a response button as quickly as possible with the left or the right thumb according to the color of the LED. After a delay of 300 ms following the response, the white LED lighted up again and a new trial could be initiated. Within each block, there were 48 green and 48 red stimuli and for each color, there were 24 CG trials and 24 IG trials. Participants performed 2 blocks of 96 trials each.

*Dual-task (experimental session)***.** In this condition, participants were required to produce the 1100 ms target time duration and to perform the Simon task simultaneously. Each trial was similar to the duration-production task described above except that whilst participants were producing the required duration with their knees, after a variable delay (ranging from 250 ms to 600 ms) following the blue LED illumination corresponding to the onset of the produced duration, one of the two lateral LEDs appeared and participants had to respond appropriately as quickly as possible as outlined in the Simon task.

Results

Duration-production task

Mean produced duration was calculated for each subject in each condition. Mean produced duration reflects overall lengthening or shortening of produced time. Paired *t-tests* were used to compare mean produced durations in ST and DT conditions. Participants produced longer durations in DT (1318 ms ± 159) as compared to ST (1238 ms ± 163) ($t_{17} = 2.51$, $p < 0.05$). In DT condition there was no significant difference in produced durations between CG and IG trials ($t_{17} = 1.39$, $p = 0.18$).

Simon RT task

Mean RT and accuracy. Figure 2A shows mean RT as a function of attentional conditions for CG and IG trials. Participants were faster in ST (399 ms) than in DT condition (459 ms) ($F(1, 17) = 35.14$, $p < .001$), and second, as classically reported, they were faster in CG trials (415 ms) than in IG trials (444 ms) ($F(1, 17) = 37.55$, $p < .001$). Congruency effect was smaller in DT (20 ms) compared to ST condition (36 ms) as confirmed by a significant Attention X Congruency interaction ($F(1, 17) = 7.34$, $p < .01$). Figure 2B shows mean error rate as a function of attentional conditions for CG and IG trials. Error rates were not different between attentional conditions ($F(1, 17) = .11$, $p = .73$) but were larger in IG (3.18%) than in CG (1.37%) trials ($F(1, 17) = 12.85$, $p < .01$); there was no interaction between the two factors ($F(1, 17) = 0.31$, $p = .58$).

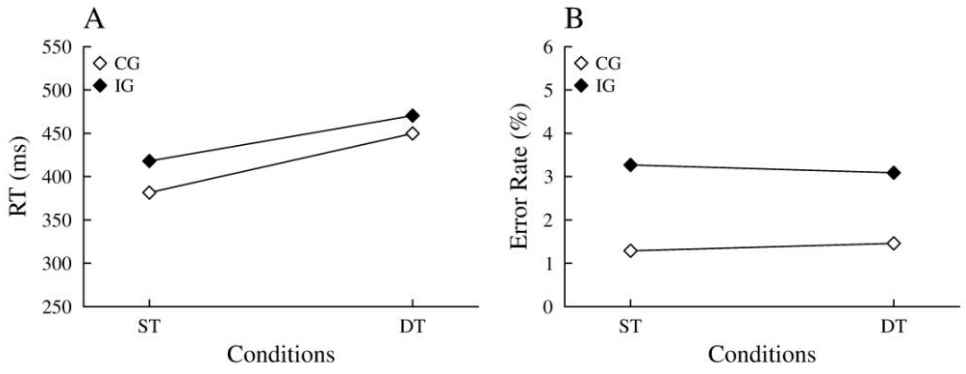


Figure 2. Experiment 1. (**A**): mean reaction time for congruent (white diamond) and incongruent (black diamond) trials under single (ST) and dual-task (DT) conditions. (**B**): mean error rate for congruent (white diamond) and incongruent (black diamond) trials under single (ST) and dual-task (DT) conditions.

Distribution analysis. Figure 3A displays delta-plots for RTs, representing the size of Simon effect as a function of quintiles in ST and DT conditions. Despite a marginally significant second order interaction (Attention X Congruency X Quintile : $F(4,68) = 2.37$, $p = .06$), the Simon effect decreased when RTs increased as confirmed by a significant Congruency X Quintile interaction in each attentional condition (ST : $F(4,68) = 6.26$, $p < .001$; DT : $F(4,68) = 8.23$, $p < .001$).

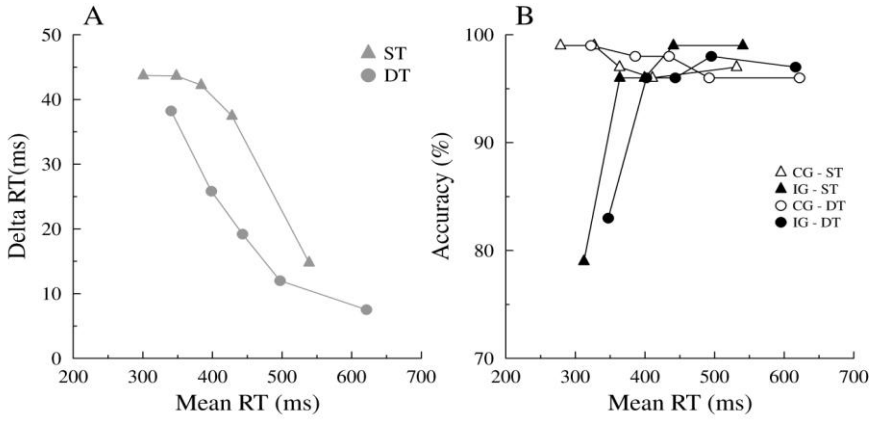


Figure 3. Experiment 1. (**A**): Delta plots showing Simon effect size as a function of response speed (as expressed in reaction time (RT) quintile scores) under single task (gray triangle) and dual-task (gray circle) conditions. (**B**) : Conditional accuracy functions for congruent (CG) and incongruent (IG) trials under single (ST) and dual-task (DT) conditions.

Figure 3B displays CAFs for CG and IG trials, in ST and DT conditions. The distributions of error rates were different for CG and IG trials (Congruency X Quintile : $F(4,68) = 17.7$; $p < .0001$) but this difference was not influenced by attentional conditions (Attention X Congruency X Quintile : $F(4,68) = .61$; $p = .66$). In ST as in DT, accuracy was close to one for congruent trials whatever the quantile concerned, whereas accuracy was quite low for incongruent trials in the first quantiles.

Discussion

We investigated whether mechanisms responsible for the decrease of congruency effect with time were impaired by restricted attentional conditions due to DT performance. First of all, we found significant performance decrements in both tasks when performed under DT compared to ST. In the duration-production task, produced durations were longer under DT. This overproduction is one of the most systematically observed results when duration-production is performed under attentional distraction (Burle & Casini, 2001; Brown, 1997). In the Simon task, responses were much slower when the Simon task was performed as DT compared to when performed as ST. Even if there was no increased error rate in DT, the results show that DT manipulation was efficient to produce substantial cost on the attentional resources available for Simon task performance. Nonetheless, despite this attentional limitation, RT distribution analysis showed a decrease in the congruency effect for longer RTs in DT comparable to the one obtained in ST. This finding suggests that attentional manipulations, although sufficient in creating performance impairments, did not prevent the decrease of the interference effect with time.

Moreover, it is worth noting that the CAFs revealed no difference between ST and DT conditions, which suggests that the strength of initial response capture by the irrelevant stimulus location was not affected by DT manipulation. Smaller overall congruency effects observed in DT can therefore not be explained by a weaker automatic capture of the irrelevant location stimulus in DT.

From these results we could conclude that attentional modulation does not seem to affect mechanisms responsible for the negative going slopes of delta-plots. However, another possibility may also be envisaged: mechanisms responsible for the decrease of congruency effect with time could use attentional resources different from those caught by temporal mechanisms involved in the duration-production task. The predominant way to interpret dual-task performance is to consider that dual-task costs occur because tasks must compete for access to a central pool of limited resources that have to be shared between different tasks. Yet it can also be considered that central interference can depend on the composition of the particular tasks. This is the case of content-dependent theories (Navon & Miller, 1987; Pashler, 1990). A well-known class of content-dependent theories includes multiple-resources theory (Wickens, 1980; 1984) in which interference is maximized when two tasks require similar pools of resources. Wickens et al. (1983) proposed that dual-task interference depends critically on the interaction between the type of central code (spatial versus verbal), and the type of input modality (auditory versus visual) and output modality (manual versus speech). According to this multiple-resources theory, only tasks that compete for the same pool of mental resources should interfere with one another but tasks that do not require overlapping resources should not affect each other. Therefore, it remains possible that the decrease in congruency effect was not impaired because attentional resources necessary to the duration-production task did not enough overlap with those necessary to mechanisms responsible for the reduction of the interference effect with increasing RT. Therefore, to tackle this question in the following experiment, we chose a task presenting more common points with the Simon task and we assumed that more common attentional resources should be involved in both tasks. The secondary task was a visuo-motor tracking task which requires visual stimuli, manual responses and a spatial code, as the Simon task does.

Experiment 2

In this experiment, we investigated whether the decrease of interference effect with time could be affected when the Simon task was concurrently performed with a visuo-motor tracking task.

Method

Participants. Eighteen volunteers took part in the experiment (9 women and 9 men, mean age: 25 years, range: 20-30 years).

Apparatus. Participants were seated facing a black screen that displayed a white vertical irregular moving curve and a cursor (length: 30 mm, width: 5 mm) located in the middle of the screen and used to track the curve. Two LEDs horizontally aligned and spaced 2.5 cm apart were fixed to the screen on each side of the cursor also serving as a fixation point for the Simon task (figure 4A and B). The two LEDs could be red or green. In the visuo-motor task, participants used a steering wheel (diameter: 15 cm) to maintain the cursor on the curve. Two response buttons were fixed to the steering wheel (at 10:00 and 2:00 o'clock) and were used to give responses in the Simon task (Figure 4C).

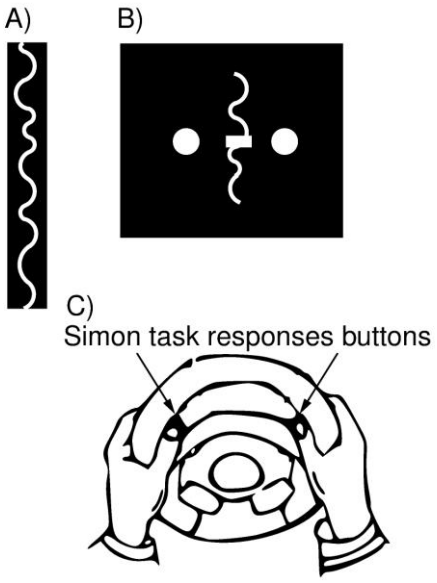


Figure 4. Experimental apparatus in Experiment 2 : (**A**) an example of moving curve, (**B**) stimuli panel, (**C**) response device used for visuo-motor tracking and Simon tasks.

Procedure

Training session. Participants performed one block of 12 trials for the visuo-motor task and one block of 48 trials for the Simon task and the dual-task. The procedure of the training session was the same as the experimental session (the details are given in the experimental session).

Visuo-motor tracking task (experimental session). Participants had to track the irregular moving curve with the cursor. Once participants had self-initiated the trial onset by pressing one of the two RT response buttons, the white cursor appeared in the middle of the screen and the participants had to keep the cursor on the curve that moved from right to left and *vice-versa*. Participants performed two blocks of twelve 25 s trials.

Simon task (experimental session). The procedure was the same as in the Experiment 1 except that the fixation point was a small horizontal line similar to the cursor used for the visuo-motor tracking task, the warning stimulus was a tone (600 Hz), and response-buttons were

fixed on the wheel. Congruent and incongruent trials were distributed as in Experiment 1.

*Dual-task (experimental session)***.** Participants were required to track the irregular moving curve and to perform the Simon task simultaneously. Once participants had self-initiated the trial onset by pressing one of the two RT response buttons, the white cursor appeared in the middle of the screen and participants had to keep the cursor on the curve that moved from right to left and *vice-versa*. During the 25 s of visuo-motor tracking, 8 trials of the Simon task were distributed. They were all initiated by a sound, serving as warning signal. Participants performed two blocks of twelve 25 s trials. Congruent and incongruent trials were distributed as in Experiment 1.

Results

Visuo-motor tracking task

To evaluate performance of the visuo-motor tracking task, for each trial we measured two variables: the error rate, which was the number of times the cursor went off the curve, and the error time, which was the time the cursor was outside the curve. Paired *t-tests* were used to compare these variables in ST and DT conditions. There was no difference between attentional conditions for the error rate (t_{17} = 1.42, p = .17) and for the error time (t_{17} = .87, p = .39).

Simon RT task

Mean RT and accuracy. Figure 5A illustrates mean RT as a function of attentional conditions and for CG and IG trials. Participants were faster in ST (349 ms) than in DT (369 ms) conditions (F (1, 17) = 6.67, p < .01) and they also were faster in CG trials (345ms) than in IG trials (373 ms) (F (1, 17) = 95.03, p < .001). In addition, the congruency effect was larger in

DT (33 ms) compared to ST (21 ms) as confirmed by the significant Attention X Congruency interaction ($F(1, 17) = 6.32$, $p < .05$). Figure 5B represents mean error rate as a function of attentional conditions and for CG and IG trials. Error rates were not different between attentional conditions ($F(1, 17) = 2.27$, $p = .14$) but were larger in IG trials (3.5%) than in CG trials (1.8%) ($F(1, 17) = 8.28$, $p < .01$). There was no interaction between the two factors ($F(1, 17) = .30$, $p = .58$).

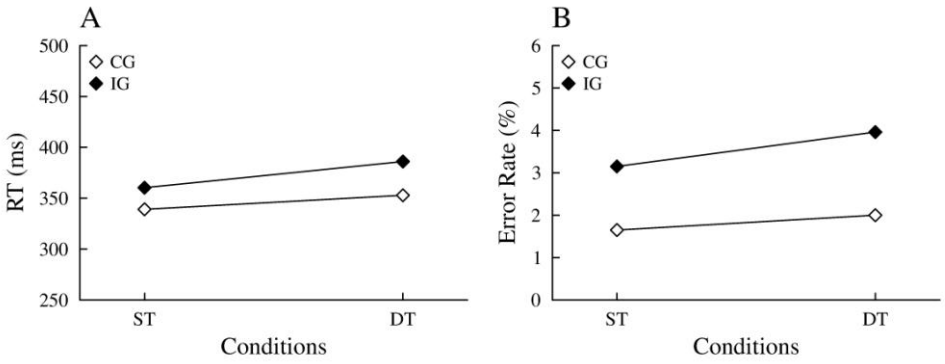


Figure 5. Experiment 2. (**A**): mean reaction time for congruent (white diamond) and incongruent (black diamond) trials under single (ST) and dual-task (DT) conditions. (**B**): mean error rate for congruent (white diamond) and incongruent (black diamond) trials under single (ST) and dual-task (DT) conditions.

Distribution analysis. Figure 6A displays delta-plots for RTs in ST and DT conditions. As confirmed by the significant second order interaction between Attention, Congruency and Quintiles ($F(4,68) = 3.72$, $p < .01$), the evolution of the congruency effect size with the quintiles was different in ST and DT conditions. In ST, the Simon effect classically decreased with the longest RTs whereas the Simon effect remained stable across quintiles in DT.

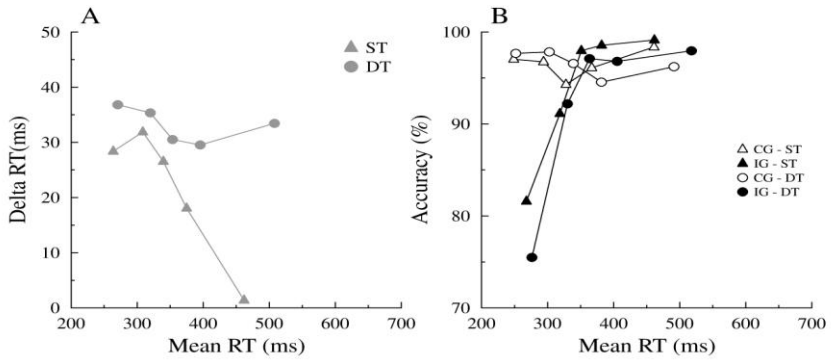


Figure 6. Experiment 2. (**A**): Delta plots showing Simon effect size as a function of response speed (as expressed in reaction time (RT) quintile scores) under single task (gray triangle) and dual-task (gray circle) conditions. (B) : Conditional accuracy functions for congruent (CG) and incongruent (IG) trials under single (ST) and dual-task (DT) conditions.

Figure 6B illustrates CAFs for IG and CG trials in ST and DT conditions. Distributions of error rates were different for CG and IG trials (Congruency X Quintile : $F(4,68) = 22.98$; $p < .0001$), but attention did not affect this interaction (Attention X Congruency X Quintile : $F(4,68) = .59$; $p = .67$). One can note that the difference in accuracy between IG and CG mainly comes from the first quantiles.

Discussion

In Experiment 2 we investigated the effect of a secondary task sharing more common features with the Simon task on mechanisms responsible for the decrease of congruency effect with time. Here again, we found that the performance of the Simon task was impaired by the dual-task condition: responses were much slower in dual-task condition. This shows that performing the visuo-motor tracking task was efficient to produce an attentional cost for Simon task performance. Moreover, in contrast with Experiment 1, the congruency effect was larger in DT compared to ST, which suggests that the control of interference was more difficult when subjects performed the visuo-motor tracking task simultaneously, even though

the strength of the automatic capture by the irrelevant position stimulus was similar in ST and DT as shown by CAFs.

As confirmed by the significant second order interaction, the distribution analysis of RTs revealed the classically observed decrease of the Simon effect with the longest RTs in ST, but not in DT. In other words, the negative going slope did not occur when the Simon task was performed simultaneously with a visuo-motor tracking task. Contrasting with data obtained in Experiment 1, these results suggest that the decrease of congruency effect with time is impaired by additional attentional load under some specific conditions, indicating that mechanisms involved in the decrease of the Simon effect depend on attentional resources and therefore seem under top-down control.

Nonetheless, two points deserve further investigations to more strongly assess our conclusions. First, it can be noted that the Simon task was not strictly the same when performed under ST and DT conditions. Indeed, under ST the fixation point was a cursor immobile in the center of the screen whereas under DT, the fixation point was a moving one since it moved on the line. Therefore, it seems important to make sure that the ST/DT manipulation was not confounded with the difference of visual display. In DT but not in ST, participants had a dynamic reference in the middle of the screen which could attract a lot of attention and could alone be sufficient to explain the absence of negative-going slope. As a consequence, a control experiment investigating whether dynamic and static fixation points yield same effects on the delta-plots was needed. The second point is that the Simon task and the visuo-motor tracking task used the same effectors, namely the hands. It raised the question to know whether the decrease of the interference effects for longer RTs would be dependent on the effectors used or on more general motor resources. Two supplementary experiments addressing each one of these two questions have then been carried out.

Experiment 3

This experiment was aimed at testing whether the type of fixation point could modulate the decrease of interference with time. We compared delta-plots obtained in two Simon tasks performed as a single task but using different fixation points, either a static one or a dynamic one.

Method

Participants. Eighteen volunteers took part in the experiment (10 women and 8men; mean age: 25.9 years; range: 18-30 years old).

Apparatus and procedure. Participants were seated facing a black screen that displayed two LEDs horizontally aligned and spaced 2.5 cm apart a fixation point which was either a static cursor or an irregular moving curve (similar to the ones used in Experiment 2) located in the middle of the screen. The two LEDs could be red or green. To respond, participants used two response-buttons, one in each hand. Participants performed two Simon tasks, one with each kind of fixation point, in a counterbalanced order.

Results and discussion

A 3 way ANOVA with the following design, 2 congruency conditions (CG versus IG) X 2 fixation points (static versus dynamic) X 5 quintiles, was performed on RTs. For accuracy, only a 2 way ANOVA including 2 congruency conditions (CG versus IG) X 2 fixation points (static versus dynamic) was performed.

Mean RT and accuracy. Analyses revealed no difference in mean RT, nor in accuracy rate between the two conditions (RT: $F(1, 17) = 0.09$, $p = 0.92$; accuracy: $F(1, 17) = 0.10$, $p = 0.74$). And for both indices, there were no significant Fixation Point X Congruency

interactions suggesting that the congruency effect had similar size whatever the nature of the fixation point (RT : F (1,17) = 2.01, p = 0.17; accuracy : F (1,17) = 0.0, p = 0.96).). Values of mean RT and error rates are summarized in Table 1.

Table 1: Mean RT and error rate in Experiment 3

	Static fixation point		**Dynamic fixation point**	
	CG	**IG**	**CG**	**IG**
Mean RT	358 ± 42	379 ± 41	355 ± 36	383 ± 43
Error Rate	5%	7.5%	5%	8%

Distribution analysis. Figure 7 displays delta-plots in the two conditions of fixation point. As confirmed by the absence of significant second order interaction Congruency X Fixation Point X Quintiles (F(4,68) = 0.77, p = 0.54), we can observe that the congruency effect decreased with quintiles with the two types of fixation point (Congruency X quintiles interaction with the static fixation point : F(4,68) = 232.53, p < 0.0001; Congruency X Quintiles with the dynamic fixation point : F(4,68) =2. .85, p < 0.05).

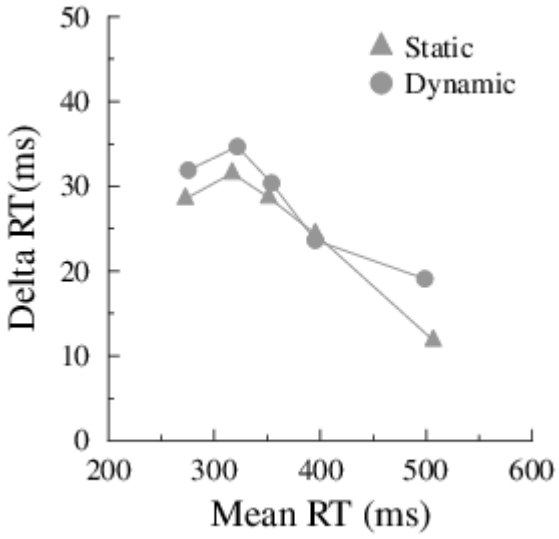


Figure 7: Experiment 3. Delta plots showing Simon effect size as a function of response speed (as expressed in reaction time (RT) quintile scores) with a static (gray triangle) and a dynamic (gray circle) fixation points.

These results suggest that the type of fixation point did not influence mechanisms responsible for the negative-going slope observed on delta-plots. Consequently, the decrease of the Simon effect for longer RTs was not influenced by the nature of the fixation point, which suggests that the absence of this decrease in the Experiment 2 was probably due to the manipulation of the attentional load.

Experiment 4

In this last experiment, we investigated whether the decrease of the interference effects for longer RTs would be dependent on the effectors used or on more general motor resources. The Simon task was performed simultaneously to a visuo-motor tracking task performed with the feet instead of the hands.

Method

Participants. Twelve volunteers took part in the experiment (7 women, 5 men, mean age: 26

years, range: 20-30 years).

Apparatus and procedure. Stimuli were identical to those in Experiment 2. Concerning responses for the Simon RT task, participants used two response-buttons, one in each hand as in Experiment 1, and for the visuo-motor tracking task they put their feet on a pedal and when they pushed with their right foot, the cursor moved to the right of the screen and when they pushed with their left foot, the cursor moved to the left of the screen (Figure 8). The procedure was identical to Experiment 2 except that participants tracked the moving curve with their feet and responded to the Simon RT task with two response buttons held in their hands.

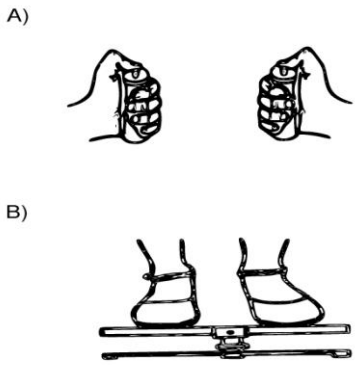


Figure 8. Response devices used for Simon task (**A**) and the visuo-motor tracking task with feet (B) in Experiment 4.

Results and Discussion

Same analyses as in Experiment 2 were carried out.

Visuo-motor tracking task

There was no difference between ST and DT for the error rate ($t11 = 1.68$, $p = .12$), nor for the error time ($t11 = 1.71$, $p = .11$).

Simon RT task

Mean RT and accuracy. Figure 9A illustrates mean RT as a function of attentional conditions and for CG and IG trials. Participants were faster in ST (361 ms) than in DT (385 ms) conditions ($F (1, 11) = 14.84$, $p < .01$) and in CG trials (358 ms) compared to IG trials (388 ms) ($F (1, 11) = 28.96$, $p < .001$). Moreover, the congruency effect was larger in DT (36 ms) compared to ST (23 ms) condition, as confirmed by the significant Attention X Congruency interaction ($F (1, 11) = 10.88$, $p < .01$). Figure 8B represents mean error rate as a function of attentional conditions for CG and IG trials. Error rates were not different between attentional conditions ($F (1, 11) = .35$, $p = 0.56$) but were larger in IG trials (5.03%) as compared to CG trials (1.9%) ($F (1, 11) = 23.51$, $p < .001$). There was no interaction between the two factors ($F (1, 11) = .40$, $p = .53$).

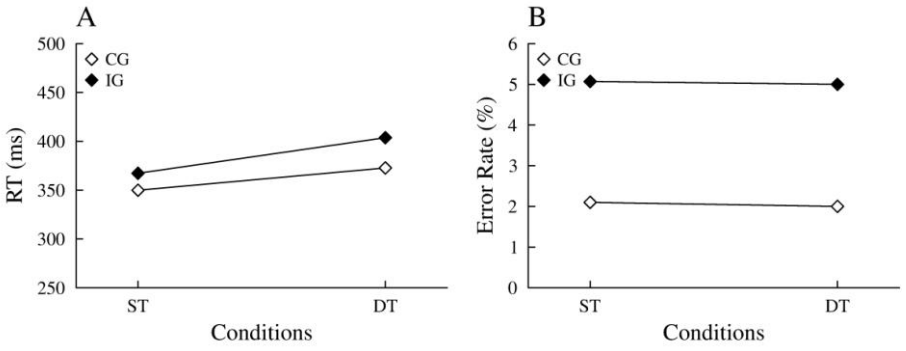


Figure 9. Experiment 4. (**A**): mean reaction time for congruent (white diamond) and incongruent (black diamond) trials under single (ST) and dual-task (DT) conditions. (**B**): mean error rate for congruent (white diamond) and incongruent (black diamond) trials under single (ST) and dual-task (DT) conditions**.**

Distribution analysis. Figure 10A represents delta-plots as a function of quintiles, in ST and DT conditions. As confirmed by the significant second order interaction Attention X Congruency X Quintiles ($F (4, 44) = 6.49$, $p < .001$), the Simon effect decreased with RTs in ST, but remained constant across quintiles in DT.

Figure 10B displays CAFs for IG and CG trials in ST and DT conditions. For both attentional conditions, accuracy rate was almost close to one in all quantiles for CG trials whereas in IG ones, accuracy rates were smaller for the first quintiles. The difference between CG and IG accuracy rates was large for the shortest RTs and then decreased when RTs lengthened in ST as in DT (Congruency X Quintile : $F(4, 44) = 16.52$; $p < .0001$; Attention X Congruency X Quintile : $F(4, 44) = 1.05$; $p = .39$).

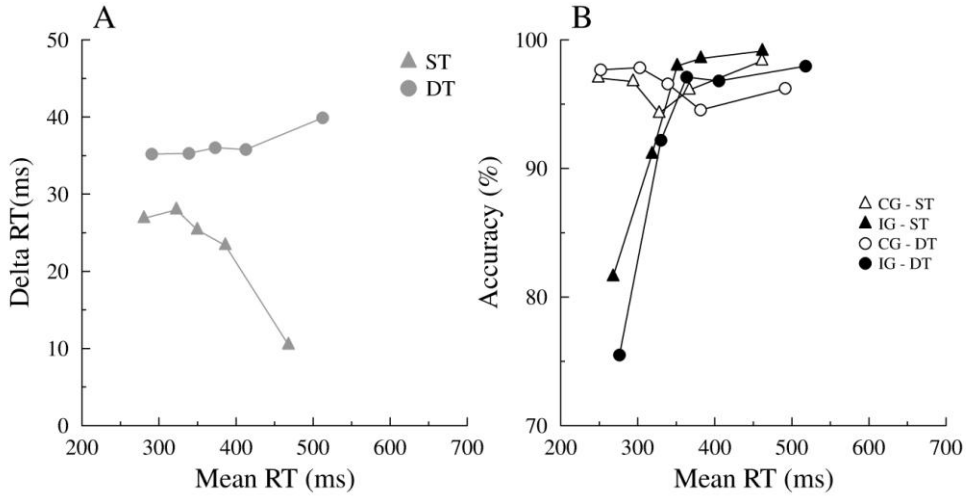


Figure 10. Experiment 4. (**A**): Delta plots showing Simon effect size as a function of response speed (as expressed in reaction time (RT) quintile scores) under single task (gray triangle) and dual-task (gray circle) conditions. (**B**): Conditional accuracy functions for congruent (CG) and incongruent (IG) trials under single (ST) and dual-task (DT) conditions.

The results of the present experiment replicate data obtained in Experiment 2: performing a visuo-motor tracking task concurrently with a Simon task prevent negative-going slope to occur even when the two tasks involved different effectors. Therefore, using a secondary task drawing attentional resources from a general pool of resources devoted to motor responses seems sufficient to affect the decrease of the interference effect with time, which suggests that the mechanisms at the origin of this decrease are located at an upper level than execution ones.

General Discussion

Four experiments were carried out to investigate whether mechanisms involved in the decrease of congruency effect with time in the Simon task were under top-down control. For this purpose, we specifically manipulated the availability of attentional resources by performing a Simon task either as a ST or as a DT concurrently with different secondary tasks.

Our results showed RT increments in DT compared to ST in all tasks showing that the manipulation of the availability of attentional resources was successful. Moreover, when the Simon task was performed simultaneously with a visuo-motor tracking task, the delta-plots revealed that the interference remained constant as RTs lengthened. This shows that it is possible to affect the reduction of the interference effect by reducing available attentional resources, which suggests that mechanisms responsible for the reduction of interference with time would be under attentional control. Therefore the present data support "active" mechanisms at the origin of interference reduction. In their original study, de Jong et al. (1994) proposed that negative-going slopes could reflect a mechanism for inhibiting irrelevant position information that strengthens over time. This idea was subsequently developed into the activation-suppression hypothesis (Ridderinkhof, 2002a, 2002b), which assumes that in the Simon task the automatic activation due to the irrelevant dimension of the stimulus can be actively suppressed. Since this suppression takes time to build up, the Simon effect disappears for longest RTs,as illustrated by the negative-gong slopes of delta plot. This activation-suppression model and the associate negative-going slopes based on the idea of a top-down control have received strong support from several empirical data. For example, Ridderinkhof (2002b) reported that the negative-going delta slope occurs much earlier in the RT distribution on trials that follow incompatible trials compared to trials following compatible trials which

was congruent with the idea that a stronger suppression of the location-driven activation is engaged after incompatible trials. In 2005, Burle and colleagues varied the temporal overlap between the onsets of the relevant and irrelevant stimulus dimensions and they observed negative slope values of the delta-plot, which is a reversal of the interference effect, if the irrelevant information was presented before the relevant information. The fact that long RTs were associated with a negative interference effect is consistent with more effective suppression.

Nonetheless, the active nature of the underlying process has been disputed, mainly by Hommel (1994) who proposed that the decrease of interference effects at the end of the RT distribution might simply result from a process of passive decay of the automatic response activation. Although passive decay might potentially result in a reduction of interference effects with time, it is unlikely to account for reversals of the Simon effect observed in some studies (Burle et al. 2005; Wylie et al., 2010). An interference effect below 0 means faster response selection on incongruent trials which would require an active process of suppression of the incorrect response activation during these trials. Our data also seem to speak against a pure spontaneous bottom-up process. Indeed, if it were purely spontaneous, and hence purely bottom-up, the reduction should not depend on attentional processes, and interference decrease should always be present even in DT condition. Of course, our data do not show that a spontaneous decay does not take place, but they rather suggest that a spontaneous decay alone cannot explain the reduction of the interference effect with increasing RT.

Nonetheless, if our results rather speak in favor of active mechanisms under top-down control, it should be noted that interference reduction was not observed in the Experiment 1 when participants performed the Simon task concurrently to the duration-production task. The decrease of interference effects was able to take place in this experiment where the effects of DT on RTs were the largest ones, demonstrating that the reason for the negative-going slopes

to occur was not due to a default in the manipulation of attentional load. The most relevant hypothesis to explain differences observed depending on the secondary task used is that mechanisms responsible for the negative going slopes of the delta-plot would depend on specific attentional resources. According to the multiple resources theory first proposed by Wickens and colleagues (1983), tasks that compete for shared pools of mental resources should interfere with one another but should not affect other tasks that do not require overlapping resources. In this line, the visuo-motor task shares input modality, general motor resources and the same spatial central code with the Simon task (see Table 2), and the duration-production task shared visual stimuli and motor responses, therefore resources coming from these two pools of resources would not be crucial for mechanisms involved in the control of interference, whereas resources needed to form the central spatial code would it be more. More recently, extending the idea of Wickens, some authors have also proposed that interference between tasks can occur even when there is no explicit overlap between the specific stimuli or responses for the two tasks, but because the stimuli activate existing linkages between input and output modalities (Hazeltine, Ruthruff, & Remington, 2006). According to this hypothesis, the selection of a motor response to a visual stimulus will engage a set of central operations that differ from those engaged by the production of durations, and the nature of the dual-task interference will differ accordingly. In this case, the relevant feature of the secondary tasks would be an explicit link between visual stimuli and motor response, as it is the case for the Simon task. Lastly, the visuo-motor tracking task also involves stimuli with a spatial code, which was not the case for the duration-production task, therefore this characteristic of the stimuli could also be a key characteristic needed by the secondary task to affect the reduction of the Simon effect with time.

Table 2: Characteristics of the secondary tasks in Experiments 1, 2 and 4 experiments.

	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 4
negative-going slopes in DT	No	Yes	Yes
Stimulus modality	visual	visual	visual
Response type	limb movement	limb movement	limb movement
Spatial central code	No	Yes	Yes

To conclude, the present work provided evidence that mechanisms responsible for the decrease of interference effect with time are affected by attentional manipulations, giving arguments in favor of a top-down control of mechanisms involved. But in a second step, it raised the question of the type of attentional resources needed by these mechanisms. In this line, finely varying the nature of the secondary task in order to determine which characteristics are crucial to affect the slope of the delta-plot seems an interesting way to get more information about the precise nature of mechanisms held responsible for the decrease of interference effects with time.

References

Block, R.A., Hancock, P.A., & Zakay, D. (2010). How cognitive load affects duration judgments: A meta-analytic review. *Acta Psychologica, 134*, 330-343.

Brown, S.W. (1997). Attentional resources in timing: Interference effects in concurrent temporal and non temporal working memory tasks. *Perception and Psychophysics*,59(7), 1118–1140.

Burle, B., & Casini, L. (2001). Dissociation between activation and attention effects in time estimation: Implications for internal clock models. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(1), 195–205.

Burle, B., Possamaï, C. A., Vidal, F., Bonnet, M., & Hasbroucq, T. (2002). Executive control in the Simon effect:

An electromyographic and distributional analysis. *Psychological Research*, 66,324–336.

Burle, B., Wildenberg van den, W.P.M., & Ridderinkhof, K.R. (2005).Dynamics of facil-itation and interference in cue-priming and Simon tasks. *European Journal of Cog-nitive Psychology*, 17, 619–641.

Casini, L., & Macar, F. (1997). Effects of attention manipulation on perceived duration and intensity in the visual modality. *Memory and Cognition, 25*, 812-818.

de Jong, R., Liang, C.C., & Lauber, E. (1994). Conditional and unconditional automaticity: a dual-process model of effects of spatial stimulus-response correspondence. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(4), 731-750.

Forstmann, B.U., Jahfari S., Scholte H.S., Wolfensteller U., van den Wildenberg W.P.M., & Ridderinkhof K.R. (2008). Function and structure of the right inferior frontal cortex predict individual differences in response inhibition: a model-based approach. *Journal of Neurosciences*, 28, 9790–6.

Gibbon J., Church R.M., Meck W.H. (1984) Scalar timing in memory. In: Gibbon J, Allan L (eds) *Timing and time perception*. Acad Sci 423:52–77

Hazeltine, E., Ruthruff, E., & Remington, R.W. (2006). The role of input and output modality pairings in dual-task performance: Evidence for content-dependent central interference. *Cognitive Psychology*, 52,291–395.

Hazeltine, E., Teague, D., & Ivry, R.B. (2002). Simultaneous dual-task performance reveals parallel response selection after practice. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28,527–545.

Hedge, A., & Marsh, N.,W.A. (1975). The effect of irrelevant spatial correspondences on two-choice response time. *Acta Psychologica*, 39, 427– 439.

Hicks, R.E., Miller, G.W., Gaes, G., & Bierman, K. (1977). Concurrent processing demands and the experience of time-in-passing. *American Journal of Psychology, 90*, 431-446.

Hommel, B. (2011). The Simon effect as tool and heuristic. *Acta Psychologica*, 136, 189-202.

Hommel, B. (1994). Spontaneous decay of response-code activation. *Psychological Research*, 56,261–268.

Kornblum, S. (1994).The way irrelevant dimensions are processed depends on what they overlap with: The case of Stroop- and Simon-like stimuli. *Psychological Research*, 56, 130–135.

Macar, F., Grondin, S., & Casini, L. (1994). Controlled attention sharing influences time estimation. *Memory and Cognition, 22(3)*, 673-686.

Müsseler, J., Wühr, P., & Umiltá, C. (2005). Processing of irrelevant location information under dual-task conditions. *Psychological Research*, *70*, 459–467.

Müsseler, J., Wühr, P., & Umiltá, C. (2006). Processing of irrelevant location information under dual-task conditions. *Psychological research*, *70*(6), 459–467.

Navon, D., & Gopher, D. (1979). On the economy of the processing system. *Psychological Review*, 86, 214-255.

Navon, D., & Miller, J. (1987). The role of outcome conflict in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13, 435–448.

Navon, D., & Miller, J. (2002). Queuing or sharing? A critical evaluation of the single-bottleneck notion. *Cognitive Psychology*, 44, 193–251.

Pashler, H.E. (1984). Processing stages in overlapping tasks: Evidence for a central bottleneck. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 358–377.

Pashler, H.E. (1990). Do response modality effects support multiprocessor models of divided attention? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 826–842.

Pashler, H.E. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, 116, 220–244.

Proctor, R.W., Lu C.H., Wang H., & Dutta, A. (1995). Activation of response codes by relevant and irrelevant stimulus information. *Acta Psychologica*, 90, 275–286.

Proctor, R.W., & Lu, C.H. (1994). Referential coding and attention-shifting accounts of the Simon effect. *Psychological research*, *56*(3), 185–195.

Ridderinkhof, R. (2002a). Activation and suppression in conflict tasks: Empirical clarification through distributional analyses. In: Common Mechanisms in Perception and Action. *Attention & Performance XIX (Prinz W, Hommel B, eds)*, pp 494–519. Oxford: Oxford University Press

Ridderinkhof, R. (2002b). Micro- and macro-adjustments of task set: activation and suppression in conflict tasks. *Psychological Research*, *66*(4), 312-323.

Ridderinkhof, R., Scheres, A., Oosterlaan, J., & Sergeant, J. (2005). Distribution-analytical techniques in the study of ADHD: Delta plot analyses reveal deficits in response suppression that are eliminated by methylphenidate treatment. *Journal of Abnormal Psychology*, 114, 197-215

Schumacher, E.H., Seymour, T.L., Glass, J.M., Fencsik, D.E., Lauber,E.J., Kieras, D.E., & Meyer, D.E. (2001). Virtually perfect time sharing in dual-task performance: Uncorking the central cognitive bottleneck. *Psychological Science*, 12, 101–108

Schwarz, W., & Miller, J. (2012). Response time models of delta plots with negative-going slopes. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19, 555-574.

Simon, J.R. (1990). The effect of an irrelevant directional cue on human information processing. In: Stimulus-response compatibility: An integrated perspective (Proctor RW, Reeve TG, eds), pp. 31-88. Amsterdam: North-Holland.

Simon, J.R. (1969). Reactions toward the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology,* 81, 1974–1976

Stevens, M., Lammertyn, J., Verbruggen, F., & Vandierendonk, A. (2006). Tscope: A C library for programming cognitive experiments on the MS Windows platform. *Behavior Research Methods*, 38, 280–286.

Stürmer, B., Leuthold, H., Soetens, E., Schröter, H., & Sommer, W. (2002). Control over location-based response activation in the Simon task: behavioral and electrophysiological evidence. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, *28*(6), 1345–1363.

Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance,* 29, 3–18.

Thomas, E.A. & Weaver, W.B. (1975). Cognitive processing and time perception. *Perception and Psychophysics*, 17, 353-367.

Vidal, F., Bonnet, M., Macar, F. (1991). Programming response duration in a precueing reaction time paradigm. *Journal of Motor Behavior,* 23, 226–234.

Vincent, S.B. (1912). the function of the vibrossae in the behavior of the withe rat. *Behavioral Monographs*,1, 1–181.

Wagenmakers, E.J., & Brown, S. (2007). On the linear relation between the mean and the standard deviation of a response time distribution. *Psychological Review*, 114, 830–841

Wagenmakers, E.J., Grasman, R.P.P.P., & Molenaar, P.C.M. (2005). On the relation between the mean and the variance of a diffusion model response time distribution. *Journal of Mathematical Psychology*, 49, 195-204

Wickens, C.D. (1980). The structure of attentional resources. In R.S. Nickerson (Ed.), Attention and performance (Vol. XIII, pp. 239–257). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Wickens, C.D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman & D. R. Davies(Eds.), Varieties of attention (pp. 63–102). New York: Academic Press.

Wickens, C.D., Sandry, D. & Vidulich, M. (1983). Compatibility and resource competition between modalities of input , output, and central processing, *Human Factors*,25,227-248.

Wylie, S.A., Ridderinkhof, K.R., Elias, W.J., Frysinger, R.C., Bashore, T.R., Downs, K.E., van Wouwe, N.C., and van den Wildenberg, W.P.M. (2010). Subthalamic nucleus stimulation influences expression and suppression of impulsive behavior in Parkinson's disease. *Brain*.

Winer, B.J. (1970) Statistical principles in experimental design. New York:Mc Graw Hill Book Company.

Chapitre V

Contribution expérimentale 2

Title :

New tools for evaluating the control interference in adults with ADHD.

Authors:

Isabel Suarez[1], B. Burle[1], C. Tobon[2], D. Pineda[2], F. Lopera[2], T. Hasbroucq[1], L. Casini[1]

Affiliation :

1. UMR 7291, Aix-Marseille Université, CNRS, Marseille, France

2. Neurosciences Group, University of Antioquia, Medellin, Colombia.

Keywords:

Simon task, ADHD adults, electromyographic recording, delta plot.

Article en préparation pour être soumis à *Neuropsychology*

Abstract

We compared interference control between 14 adults with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) and 15 control adults using a Simon task. While in most of studies performance have been generally reported in terms of mean error rates and reaction times (RT), here we used distribution analyses and extended behavioral analyses of correct responses with EMG activity. This allowed us to better quantify the control of interference and more specifically the part which remains hidden when taking account of correct response without distinguishing pure correct trials from partial errors. Partial errors correspond to subthreshold EMG burst associated with incorrect response and preceding the correct one. The main findings were that adults with ADHD were slower and showed a larger interference effect in comparison to controls. However, our data put together revealed that the larger interference effect was not due neither to a higher impulse expression, nor to a deficit in inhibition. We proposed and discussed the hypothesis that the deficit of the interference control found in adults with ADHD would rather be secondary to more general cognitive deficits such as sustained attention impairments leading to a slowing down of processes.

Introduction

Attention Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD) is one of the most commonly developmental disorder diagnosed in childhood. It corresponds to symptoms of inattention, hyperactivity and impulsivity (APA 2000). The persistence of this disorder into adulthood has been estimated to 70 % (Spencer et al, 2007) leading severe functional consequences such as underemployment, social role impairment, and risky behavior (Biederman & Faraone, 2005, 2006; Biederman, Newcorn, & Sprich, 1991; Moura et al., 2006).

ADHD has been described as a disorder of executive functioning by several authors (Barkley 1997; Sergeant, Geurts, & Oosterlaan, 2002) and predominant theories of neurocognitive deficits associated with ADHD more particularly focus on impulsivity and deficits of behavioral inhibition as the origin of this trouble (Barkley 1997; Nigg, 2001). To investigate both impulsivity and response inhibition, conflict tasks leading to interference effects are particularly relevant. In such tasks, action impulses triggered by irrelevant features of the stimulus sometimes conflict with the response required by the rule associated to the task.

In general, poorly performance were observed in adults with ADHD as compared to controls in conflict tasks such as Stroop task (King et al. 2007; Taylor and Miller 1997; Walker et al. 2000) or Eriksen flanker task (Lundervold et al. 2011). Most of these studies revealed larger RTs and larger interference effects in adults with ADHD. In the present study, we used the well-known Simon task (Simon, 1967). In this task, participants have to choose between a left- and a right-hand key press according to the color of a visual stimulus presented either to the left or the right of a central fixation point. The performance, expressed both in terms of error rate and RT, is better when the required response corresponds spatially to the stimulus location (congruent association) than when it does not correspond (incongruent association), even though the stimulus location is irrelevant. This effect is called “Simon effect” or

“interference effect” (Hedge et al., 1975, Simon, 1990; Hommel, 2011; Simon, 1990).A widely accepted interpretation of the Simon effect is that the stimulus location automatically triggers a response impulse in the ipsilateral hand by a fast route while the relevant stimulus color must be translated into the required response according to the task instructions by a slower controlled route (de Jong et al., 1994; Kornblum, 1994; Proctor et al., 1995). When the stimulus-response association is congruent, the impulse triggered by the irrelevant stimulus location activates the required response, which facilitates response processing. In contrast, when the stimulus-response association is incongruent, the impulse triggered by the irrelevant location activates the non-required response which competes with the required one. This competition would be at the origin of the performance impairment.

In 2002, Ridderinkhof extended the dual-route hypothesis by proposing the activation-suppression model (Ridderinkhof, 2002a, 2002b) and the related distribution analysis technique which incorporate the temporal dynamics of cognitive control and also enable to separately study the expression of impulse capture and the inhibitory control. According to this model, two processes are involved: first, the irrelevant location of the stimulus triggers the impulse capture, which is assumed to occur very quickly after the onset of the stimulus and second the inhibition of the inappropriate impulse response should be engaged more slowly and should suppress the interference due to the incorrect action impulse (Ridderinkhof, 2002a). The strength of the impulse capture, that is the vulnerability to irrelevant feature of the stimulus, should be then reflected in the proportion of fast errors that can be evaluated through the plots of accuracy rates against RT (conditional accuracy function, CAF; van den Wildenberg et al., 2010; Wylie et al., 2010; Wylie et al., 2012) whereas inhibitory control should be more evident for slower responses, that is at the end of the RT distribution when interference suppression had time to build up. By plotting delta plots, which show the

magnitude of interference effects, as a function of response speed, it should be observed a pattern of reduced interference in slower segments of the RT distribution as the suppression mechanism becomes more fully engaged (de Jong et al., 1994; Ridderinkhof, 2002a,b). Consequently, according to the activation-suppression model, the slope of the Simon effect at the latest RTs provides a very sensitive measure of the inhibitory control over prepotent responses whereas the slope of the CAF (plotted for the incongruent trials) at the shortest RTs should provide a measure of the strength of impulse capture. Ridderinkhof and colleagues (2005) applied this method to investigate control of interference in an Eriksen task in children with ADHD. They showed that performance deficit observed in these children involved response inhibition but not automatic response activation.

However, in that study as in most of other studies about interference control, responses given by participants were classified as either correct or erroneous while analyses of response-related electromyographic (EMG) activity during action conflict reveals that committing an error is not an all-or-none process. Indeed, in about 20 % of responses classified as correct responses, an early subthreshold EMG burst recorded from the hand that is associated with the incorrect response precedes the EMG activity related to the correct response (Figure 1).

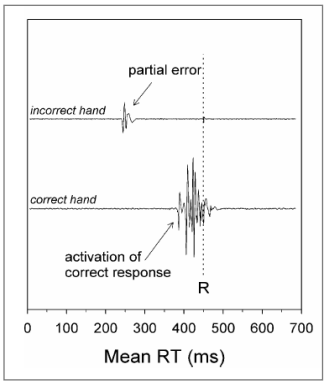


Figure 1: Partial errors. Electromyographic activity (EMG) from muscles controlling the incorrect (upper trace) and the correct (lower trace) responses. The vertical dashed line indicates the mechanical button-press response. The correct overt response was preceded by partial EMG activity in the muscle that controls the incorrect response that was too weak to trigger an overt response.

Several arguments from previous studies have indicated that these subthreshold activities are erroneous impulses that are suppressed to prevent the occurrence errors rather than task-unrelated contractions (Allain et al., 2009; Hasbroucq et al., 1999). Therefore, trials containing such EMG activity were called partial errors and then among overt correct responses, two categories of trials may be distinguished : "pure correct" and "partial errors" trials, and along the same line, it may be considered that incorrect response activity occurs both for real errors and for partial errors but is successfully suppressed and corrected for partial errors only (van den Wildenberg et al., 2010). By consequence, an increase in incorrect activations frequency, calculating from the sum of partial errors added to real errors, should reflect higher vulnerability to stimulus-driven incorrect response activation (van den Wildenberg, 2010) and the ratio between the number of partial errors and the number of all incorrect activations (real errors added to partial errors), called the "correction rate", should represent the ability to suppress incorrect response to prevent real errors (Burle et al., 2002), a lower correction rate reflecting an impairment in the response inhibition ability.

While in most of studies using Simon task, performance have been generally reported in terms of mean reaction times (RT), here we used distribution analyses and extended behavioral analyses of correct responses with EMG activity to better quantify the control of interference in adults with ADHD and more specifically the part which remains hidden when taking account of correct response without distinguishing pure correct trials from partial errors.

Method

Participants

We tested two groups of subjects, recruited through the Science Investigation center of the University of Antioquia (Colombia): 15 ADHD adults (age 18–29, mean = 22.13, 14 males) and 15 healthy adults (age 19–25, mean = 21.68, 11 males). All participants gave informed

consent to the experimental procedure, following the Helsinki declaration (1964). The study was approved by the Ethical Committee of the Investigation center of the University of Antioquia (Colombia).

Selection procedure for the ADHD group. Adults in the ADHD group were recruited from the clinical database of the Neurosciences Clinic of the University of Antioquia (Colombia). All participants in the present study were selected among patients who were diagnosed with ADHD as children, who continue to be observed by the psychiatrists of the clinic, and for who the diagnosis was again confirmed in their young adulthood by two psychiatrists of the clinic in the last two years.

Clinical diagnoses and definitions of ADHD (i.e., affected or non-affected, as defined by DSM-IV) used in this clinic have been extensively described in details elsewhere (Palacio et al., 2004) and will be only briefly described here. For children diagnoses, structured diagnostic interviews were conducted in the Neurosciences Clinic by a team of professionals supervised by an expert psychiatrist who reviewed all interviews and conducted confirmatory clinical interviews with all participants. Parents underwent a full psychiatric structured interview regarding their offspring (Diagnostic Interview for Children and Adolescents–Revised Parents Version [DICA-IV-P], Spanish version translated with permission from W. Reich [Reich, 2000]). Parents and teachers of school-age children also provided behavior rating scales. Final diagnoses were reached by consensus on the basis of the results of structured interviews, collateral historical information, and clinical interviews for each family lineage member through the best estimate procedure (Reich, 2000) by a committee of four clinicians, all of whom have extensive experience with ADHD. Definitely affected subjects met full DSM-IV ADHD criteria during childhood, with onset before age 7 years, and with persistence of clearly impairing symptoms in more than one setting. In cases of discordance

between an individual's self-report of symptoms and collateral reports, the supervising psychiatrist obtained further collateral information and probed more deeply for evidence of early impairment. For confirmation in young adulthood, patients received a structured interview for current functioning and evaluating symptoms of ADHD described in DSM-IV by two different psychiatrists.

For this study, in order for the ADHD group to be as homogenous as possible but also not reduced to only one symptom (impulsivity or attention), only adults who had been diagnosed with the combined ADHD type in childhood and with diagnosis confirmed in young adulthood were contacted and solicited for their participation.

It is important to note that all participants selected for this study had been under medication (methylphenidate) at different periods of their life but had not taken medication in the six months prior to the experiment.

Criteria for the control group. The control group was composed of adults without ADHD recruited at the University of Antioquia. Inclusion criteria were a lack of history of diagnosis of ADHD on the basis of a retrospective assessment of ADHD by self-completion of a 61-item spanish version of the Wender Utah Rating Scale (WURS) (Rodriguez-Jimenez et al., 2001) and failure to meet the cut-off point.

Exclusion criteria for both groups. Exclusion criteria included 1/ a diagnosis of additional psychiatric (major depression, panic disorder, suicide risk, anxiety, substance abuse, psychoactive substance use, psychotic disorders) or neurological disorder on the basis of a Spanish version of the structured psychiatric interview mini mental test (M.I.N.I) 2/ current or recent drug abuse (inferior to 6 months), and 3/ an intelligence quotient (IQ) inferior to 80, evaluated with the short-form of the Wechsler Adults Intelligence Scale (WAIS III) including

four sub-tests : similarities and vocabulary tests to estimate verbal IQ, and picture completion and block design tests to estimate performance IQ. In addition to IQ measures, the working memory index was assessed using three items of the WAIS III (Arithmetic, Digit Span, and Letter-number sequencing).

Table 1. Demographic and neuropsychological variables for both groups. IQ = Intellectual quotient; WMI = working memory index; WURS = Wender Utah Rating Scale.

	ADHD (N=14) Mean ± SD	**CONTROL (N=15) Mean ± SD**	**t value**	**p value**
Age (years)	21.6 ± 4	22.2 ± 1.6	0.55	0.6
IQ	102.9 ± 10.6	100.9 ± 10.1	0.53	0.59
WMI	90.5 ± 8.7	95.8 ± 12.8	1.39	0.17
WURS	55.3 ± 10.9	18.7± 9.5	9.92	< 0.0001

Complementary neuropsychological assessments

In addition, our subjects performed a Stop-task and a continuous performance test (CPT) task in order to be able to correlate indices measured in the Simon task to more classical measures of inhibition (stop-task) and of sustained attention (CPT).

Briefly, in the CPT task used here, participants were required to press the spacebar as fast as possible for any letter appearing on the screen except for the letter "X" (7,5 % of trials). Participants performed 2 blocks of 160 trials for each inter-stimulus interval (ISI of 1s, 2s, or 4s). Sustained attention was evaluated with mean RT and distractibility with the number of omissions obtained for each ISI.

In the version of the stop-task we used, participants had to choose between two hand button-presses in response to a visual stimulus (circle or square) appearing on the screen 500 ms after a central fixation point. They were required to respond as quickly as possible, and in 25 % of trials, a stop-signal (a 600 Hz auditory tone) was presented shortly after the visual stimulus indicating that they had to withhold their response. The delay between the presentation of the visual stimulus and the onset of the stop-signal (stop-signal delay, SSD) was initially set to 250 ms and was adjusted up or down in 50 ms increments depending on the accuracy of the participants response. Mean reaction time to the go-stimulus (go-RT) and stop signal reaction time (SSRT) were recorded, SSRT being used as an index of inhibitory control.

Procedure of Simon RT task

Stimuli and apparatus. Participants were seated comfortably in a dimly lit sound-shielded room, facing a black panel, which was located 1m away and contained three light emitting diodes (LED). There were horizontally aligned and space 2.5 cm apart. The two laterals LED displayed the stimuli and then could be red or green, and the central one was white and served as a fixation point.

Participants used their right and left thumbs to press two response buttons (3.5 cm in diameter, 9 cm in height) fixed on a table in front of them and 30 cm apart. The subjects continuously kept the distal phalanx of the left thumb on the left button and the distal phalanx of the right thumb on the right button. The arms and the hypothenar eminences rested on the table as comfortable as possible. All stimuli and responses were controlled by a computer running t-scope (Stevens et al., 2006). RTs were recorded to the nearest millisecond.

Task and procedure. The participant's task was to respond as fast and as accurately as possible on the basis of the color of the stimulus. After the experimenter had verified that all instructions were understood, participants first performed 48 trials (24 trials of each type, congruent and incongruent, all randomized) to familiarize them with the task and allow them to stabilize their performance. Next, six experimental blocks where presented, each containing 96 trials. Blocks of trials were separated by 5 min.

Each trial started with a tone serving as a warning stimulus. After a variable delay (ranging from 250 ms to 600 ms) following the warning signal, one of the two lateral LEDs lighted on either in green or red apart of a white circle serving as a fixation point. Participants had to briefly press a response button as quickly as possible with the left or the right thumb according to the color of the LED. The color-response mapping was balanced across subjects.

There were 48 green and 48 red stimuli. For each color, there were two types of trials : 24 congruent trials (response side ipsilateral to stimulus side) and 24 incongruent trials (response side controlateral to the stimulus side).

EMG signal recording and processing

The EMG activity was recorded from the flexor pollicis brevis of each thumb by paired surface Ag/AgCl electrodes, 6 mm in diameter, fixed about 10 mm apart on the skin of the thenar eminence. This activity was amplified, filtered (low/high frequencies cut-off at 10 Hz/1 kHz), full-wave rectified, and digitized on-line (A/D rate 2 kHz). The EMG signal was continuously monitored by the experimenter in order to avoid as much as possible any background activity that could hinder small activations during the reaction period. If the signal became noisy, the experimenter immediately asked the subject to relax his/her muscles.

In this study, it was important to detect the smallest incorrect muscular activations. To this end, the EMG traces were inspected visually and the electromyography onsets were hand-scored (see Burle et al., 2002). Although automated algorithms can be useful (e.g., Hodges and Bui, 1996; Van Boxtel et al., 1993) the ultimate standard, against which the accuracy of the different algorithms is rated, remains visual inspection.

Data analysis

First, correct trials were sorted into two categories, labeled "pure-correct" and "partial error" trials. "Partial errors" trials presented an activation of the agonist involved in the incorrect response preceding the activation of the agonist involved in the correct response. Importantly, to be classified as a "partial error", the EMG signal deflection had to be phasic and to return to baseline (rest) level before the onset of the response-related EMG activity. Two variables were then calculated : the incorrect activation rate (IA) which corresponds to the proportion of both partial errors and real errors, and the Correction Rate (CR) which was defined as CR = PE/(PE + E) where PE reflects the number of partial errors and E the number of real errors. In other words, the CR reflects the number of corrected incorrect activations divided by the overall number of incorrect activations (corrected or not).

Second, distribution analyses were performed for RTs and for accuracy rates. The cumulative density functions of trials were estimated for each participant and averaged through the so-called “vincentizing” procedure (Ratcliff, 1979, Vincent, 1912): RTs were rank ordered for each type of trials separately (CG trials and IG trials), and binned into quintiles of equal frequencies (same number of trials). The mean of each bin was computed and equivalent bins were averaged across participants. Delta-plots were constructed by plotting the difference between incongruent and congruent bins, as a function of the mean of incongruent and

congruent bin values (for more information, see Ridderinkhof, 2002, Burle et al., 2002). For distributional accuracy analysis, we computed the so-called "conditional accuracy function" (CAFs): correct and erroneous trials were mixed together and the resulting distributions were vincentized as described above. For each bin, the proportion of correct trials was computed along with the mean RT of the bin. These couples of data were averaged per bin through participants. This provides the mean accuracy as a function of increasing RTs.

Third, EMG activity was also used to determine the chronometric variables illustrated in Figure 2. Reaction time was measured from the stimulus to the response button press. It was broken down into two components: Premotor time (PMT, from stimulus to EMG onset) and motor time (MT, from EMG onset to button press). In partial error trials, two additional indices were defined: the incorrect activation latency (IAL) corresponding to the time between signal onset and incorrect EMG onset, and the correction time (CT) corresponding to the time between incorrect EMG onset and correct EMG onset.

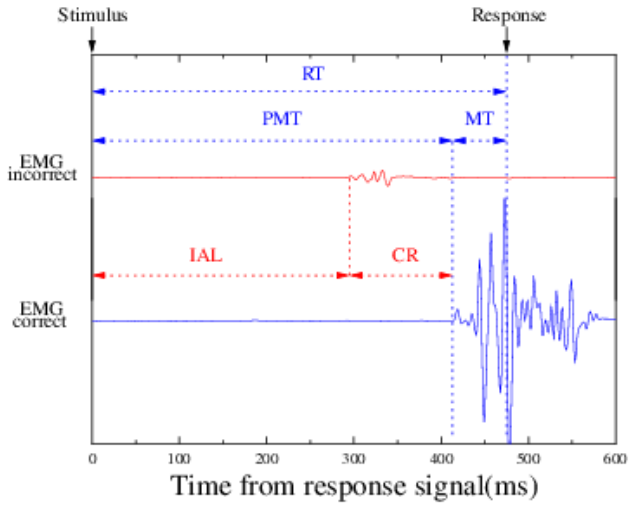


Figure 2. Electromyographic activity in the involved (correct electromyographic activation) and non-involved (incorrect electromyo-graphic activation) agonists; RT: reaction time; PMT: premotor time (from the response signal to the correct electromyographic onset); MT: motor time (from the correct electromyographic onset to the response); IAL: incorrect activation latency (from the response signal to the onset of the electromyographic activity in the agonist involved in the incorrect response); CT: correction time (from the incorrect activation to the correct one).

For analyses, as the means and variances of percentages tend to be closely related, percentages cannot be submitted directly to analyze. Therefore, they were arcsine transformed (Winer, 1971) before being analyzed. A 2 way ANOVA with the between-subject factor Group (ADHD *versus* control) and the within-subject factor congruency trials (congruent *versus* incongruent) was performed on the mean measures. For distribution analyses, the bin (1-10) was added as a third within-subject factor. Indeed, although delta-plots and CAFs are shown for RTs distribution, all statistical analyses were performed on the vincentized cumulative density functions.

Results

The presentation of results will include five sections: 1/ overall mean RTs and error rates, 2/ distributional analyses, 3/ data coming from partial errors, 4/ chronometric EMG indices, and 5/ Stop-task and CPT task data.

Mean RTs and error rates

Figure 3A shows that mean RTs were longer for adults with ADHD (427 ms) compared with control adults (393 ms) ($F(1, 27) = 6.75$, $p < 0.01$) and that RTs were shorter in CG trials (394 ms) compared to IG trials (425 ms) ($F (1, 27) = 125.33$, $p < 0.0001$). It can also be observed that the congruency effect was larger in ADHD group (36 ms) compared with control groups (25 ms) (Group x Congruency: $F (1, 27) = 4.57$, $p < 0.05$). In addition, we compared within-subject variability for RT and we found that adults with ADHD tended to be more variable compared to control participants ($F 1, 27 = 2.81$, $p = 0.10$).

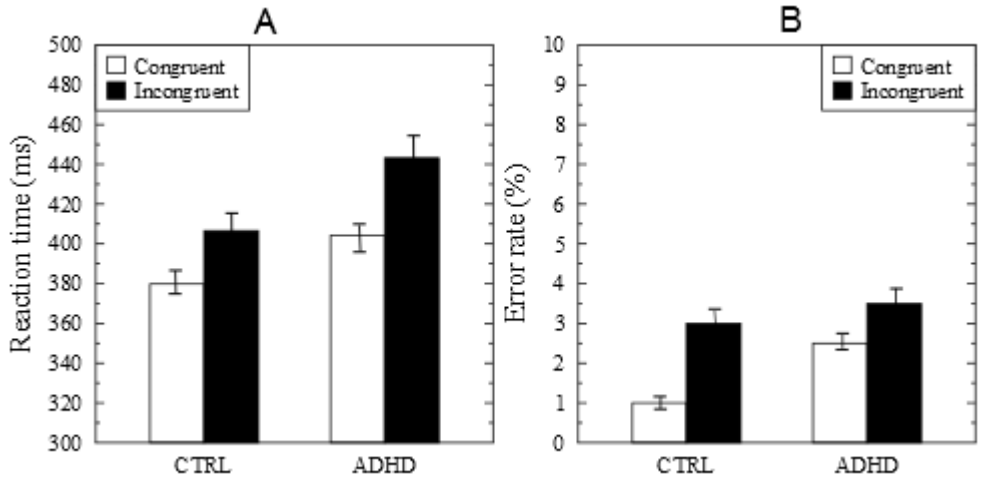


Figure 3: Overall mean RTs (**3A**) and mean error rate (**3B**) for congruent (white circles) and incongruent (black circles) trials for both control and ADHD groups. Error bars are mean standard errors.

As seen on Figure 3B, patients with ADHD did not commit more errors than control subjects ($F\ 1, 27 = 0.08$; $p = 0.77$), and as classically observed, error rate was larger in IG trials compared to CG trials ($F\ 1, 27 = 24.42$, $p < 0.0001$). The Congruency x Group interaction was not significant ($F\ 1, 27) = 0.20$, $p = 0.65$). Thus, overall performance measures suggest that compared with control adults, adults with ADHD are more sensitive to interference effects on response speed (but not accuracy) in the Simon task. These patterns could not be explained in terms of speed–accuracy trade-off.

Distributional analyses

Delta-plots. Figure 4A displays delta-plots for RTs, representing the size of Simon effect as a function of quantiles, for control and ADHD groups. Simon effect decreased when RTs increased for both groups, as confirmed by the absence of second order interaction (Congruency x Quantiles x Group : $F\ (9, 243) = 0.23$, $p = 0.98$). The slopes of the last segment, which have been proposed to be a sensitive measure of inhibitory control, were not different between groups ($t(27) = 1.41$, $p=0.16$).

Conditional accuracy function. Figure 4B displays conditional accuracy functions (CAFs) for control and ADHD groups. The effect of congruency factor with time was the same for both groups (Congruency x Group x Quantiles: F (9,243)= 1.19; p= 0.29). More precisely, in IG trials accuracy rate increased for shorter RTs similarly for both groups. The slopes of the first segment, which have been proposed to be a sensitive measure of automatic response activation were not different between groups (t (27) = 1.17, p= 0.25).

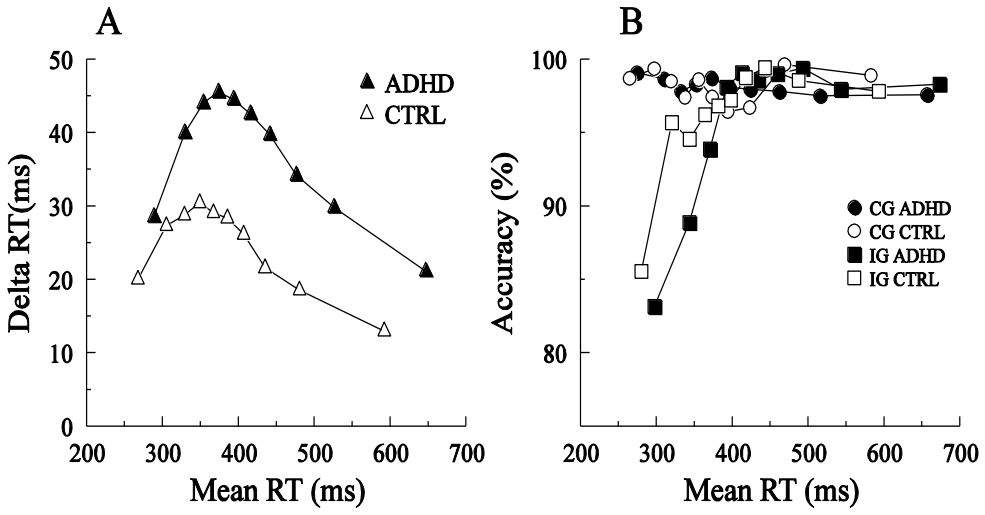


Figure 4. (**A)**. Delta plot showing Simon effect size as a function of response speed as expressed in reaction time (RT) quintile scores, for control group (white triangles) and ADHD group (black triangles).(**B)**. Conditional accuracy functions for CG (circles) and IG (squares) trials for control (in white) and ADHD (in black) groups.

Data from partial errors

Partial error rate. Correct trials were sorted according to whether or not they contained a partial error. As seen in Table 2, adults with ADHD did not commit more partial errors than control adults (F 1,27 = 0.04, p = 0.83 and globally the subjects made more errors in IG trials than in CG trials (F 1,27 = 97.75, p < 0.0001). The Congruency X Group interaction was not significant neither (F 1,27 = 2.67, p = 0.11).

Incorrect activation rate. Partial errors and errors were summed up and provided incorrect activation rate reflecting the sensitivity of subjects to the location of the stimulus. As observed in Table 2, incorrect activation rates were similar for ADHD and control groups ($F\ 1, 27 = 0.05$, $p = 0.81$). Incorrect activation rates were larger for IG than for CG trials ($F\ 1, 27 = 0.36$, $p < 0.0001$), but there was no Group x Congruency interaction ($F\ 1, 27 = 2.27$, $p = 0.14$), which means that incorrect activation rate was not higher in ADHD group compared with control group for IG trials.

Table 2. Mean partial error and incorrect activation rates for both groups in the incongruent (IG) and the congruent (CG) trials.

	ADHD		**CONTROL**	
Congruency	**CG**	**IG**	**CG**	**IG**
Partial error rate	7%	17%	7 %	15%
Incorrect activation	9%	22%	9%	19%

Moreover, in order to assess the dynamics of impulse expression, we computed what will be called "conditional incorrect activation function" (CIAF). These functions were constructed as the same way as the CAFs but plot vincentized incorrect activations (real errors added to partial errors) instead of accuracy rate as a function of the RT distribution.

Figure 5 displays distributional analyses for incorrect activation rates (CIAFs) for control and ADHD groups. The effect of congruency factor with time was the same for both groups

(Congruency x Group x Quantiles: F (9,243) = 0.71; p = 0.70). More precisely, in IG trials accuracy rate increased for shorter RTs similarly for both groups.

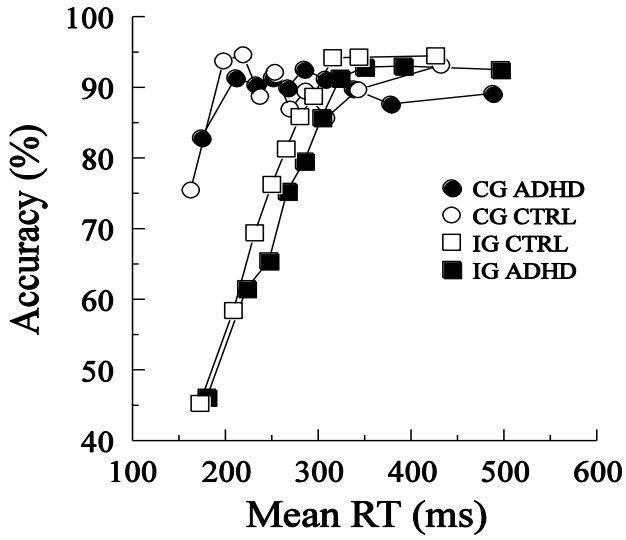


Figure 5. Conditional incorrect activation functions (CIAF) for CG (circles) and IG (squares) trials for control (in white) and ADHD (in black) groups.

Correction rate. Figure 6 illustrates the correction rate for both groups in CG and IG trials. There was no difference between groups (F 1, 27 = 0.05, p = 0.81), neither between congruency trials (F 1, 27 = 0.03, p = 0.86).

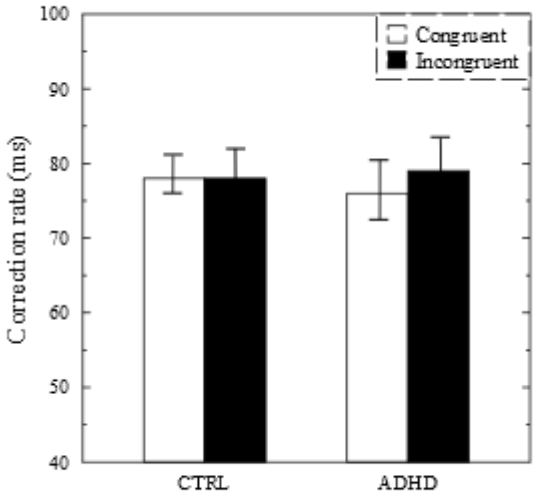


Figure 6. Correction rate in congruent (white) and incongruent trials (black) for control (CTRL) and ADHD groups

Chronometric analyses.

Table 3 presents mean PMT, mean MT , mean IAL and mean CT for ADHD and control groups in CG and IG trials. PMT tended to be longer for adults with ADHD compared with control adults ($F\ 1, 27 = 2.82$, $p = 0.10$). There was a congruency effect ($F\ 1, 27 = 135.71$, $p < 0.00001$) and a significant Congruency x Group interaction ($F\ 1, 27 = 5.40$, $p < 0.05$), as observed for RTs. Concerning MTs, there was no difference between groups ($F\ 1,27= 0.07$, $p= 0.79$), and no difference between CG and IG trials ($F\ 1,27 = 0.45$, $p = 0.5$).

We can observe that IAL tended to be longer in ADHD (259 ms) compared to control group (232 ms) ($F\ 1, 27 = 3.76$; $p = 0\ .06$) and shorter in IG trials than in CG trials ($F\ 1, 27 = 26.18$; $p < 0.001$). No Group x Congruency interaction was observed ($F\ 1, 27 = 0.56$; $p = 0.46$). Adults with ADHD tended to have a longer CT ($F\ 1, 27 = 3.24$; $p = 0.08$). There was no effect of trial congruency ($F\ 1, 27= 1.87$; $p = 0.18$), nor a significant Group x Congruency interaction ($F\ 1, 27 = 0.47$; $p = 0.49$) on this index.

Table 3. Mean PMT (premotor time), mean MT (motor time), mean IAL (incorrect activation latency) and mean CT (correction time) for ADHD and control groups in CG (congruent) and IG (incongruent) trials.

	ADHD		**CONTROLES**	
Congruency	**CG**	**IG**	**CG**	**IG**
PMT	291	324	270	291
MT	110	109	107	108
IAL	273	245	242	222
CT	265	278	246	250

Stop-task and CPT task

Table 4 presents data obtained in CPT task and stop-task. In the CPT task, adults with ADHD produced significantly longer RTs ($F\ 1, 27 = 7.3$, $p < 0.01$) for all ISIs, but there was no difference for omission rates ($F\ 1, 27 = 1.03$, $p = 0.31$) neither for commission rates ($F\ 1, 27 = 1.47$, $p = 0.23$). Concerning stop-task, there was no difference between groups for both indices.

Table 4: CPT = Continuous Performance Test; RT = reaction time; ISI = inter stimulus interval; Go-RT =Go signal reaction time; SSRT= Stop signal reaction time.

	ADHD (N=14) Mean	**CONTROL (N=15) Mean**
CPT		
RT (ISI = 1s)	424 ms	369 ms
RT (ISI = 2s)	405 ms	359 ms
RT (ISI = 4s)	422 ms	364 ms
Omission rate (ISI = 1s)	0.17	0.13
Omission rate (ISI = 2s)	0.17	0
Omission rate (ISI = 4s)	0.13	0.06
Commission rate (ISI = 1s)	0.66	0.37
Commission rate (ISI = 2s)	0.4	0.4
Commission rate (ISI = 4s)	0.71	0.3
Stop Signal Task		
Go-RT	622 ms	595 ms
SSRT	323 ms	330 ms

Lastly, the table 5 presents planned correlations between some variables from the Simon task and variables measured in the CPT task and in the stop-signal task made for subjects with ADHD. For the CPT task, we chose measures classically known to reflect the sustained attention at the best (RT and omission rates for ISI = 4s) and for the stop-task we chose the SSRT which is an index of motor inhibition. Two results are of interest: first, there were positive correlations between mean RTs obtained in the Simon task and RTs and omission

rates measured in the CPT task, which means that subjects who were the slowest ones in the Simon task were also the slowest ones in the CPT task and were those who committed the more omissions. Second, mean correction rate and SSRT were negatively correlated, which means that subjects who corrected partial errors the more efficiently were also the more efficient to stop their response in the stop-task. There was no correlation between SSRT and the slope of the last segment of delta-plot which suggests that the correction rate computed from partial errors is a more sensitive measure of the suppression of the direct route.

Table 5. Pearson's correlation coefficient and probability values for the relationship between Simon task scores and performance on key components of the CPT and Stop signal tasks.

	r	***p***
RT CPT (ISI 4s) x RT Simon Task	0.70	<0.01
Omissions (ISI 4s) x RT Simon task	0.68	<0.01
SSRT x Correction rate IG	- 0.75	<0.01
SSRT x (q9-q10) slope	0.04	NS

Discussion

The present study aimed to examine interference control in adults with ADHD engaged in a conflict task. Overall performance analyses revealed a larger interference effect (larger difference in RT between IG and CG trials) in adults with ADHD than in control adults. These findings are consistent with some other studies reporting stronger interference effects in adults with ADHD (Bush et al., 1999; King et al., 2007; Lundervold et al., 2011; Shubert et al.2013; Walker et al., 2000) and thus provide further support for the assumption of interference control deficit in adults with ADHD. But other indices coming from distributional analyses

and EMG activity suggest that these interpretations might be wrong.

Based on the activation-suppression model (Ridderinkhof, 2002a), deteriorations in the interference control might have two different origins, either a higher sensitivity to the location of the stimulus which automatically activates the ipsilateral response via the direct route or a default in the capacity to suppress this route. But the data we obtained in adults with ADHD supported none of these propositions.

First, incorrect activation rates known to be an index of the expression of involuntary triggered erroneous response, were comparable in ADHD and control groups suggesting that ADHD patients were not more vulnerable to automatic activation of response than control adults. This finding was reinforced by data coming from distributional analysis of accuracy (CAFs) as well as from incorrect activation rates distribution (CIAFs) since there was no difference neither in the patterns of CAFs nor of CIAFs between groups. This suggests that even when taking account of partial errors, adults with ADHD did not show a stronger activation of the response automatically activated by the location of the stimulus. These results support previous data obtained in children with ADHD (Ridderinkhof, 2005).

Second, analyses of RTs distributions and of the associated delta-plots representations showed that the negative-going slopes of delta-plots were similar for both groups of adults. In the context of the activation-suppression model (Ridderinkhof, 2002a), these findings indicate that ADHD adults did not show a deficit of the selective inhibition of responses activated by the stimulus position. Moreover, the correction rate, calculated from partial errors defined from the EMG activity, were similar for ADHD and control groups, suggesting that ADHD patient's ability to suppress any impulses before they provoke full performance errors was intact. Finally, data obtained from the Stop-task revealed no difference in the SSRT between groups suggesting similar capacity to inhibit responses.

To summarize, if adults with ADHD do not seem to have present deficits of suppression of the direct route, neither a stronger activation of it, how could we explain larger interference effects found in these adults ? In a recent study (2013), Soutschek et al. suggested that increased interference effects observed in patients with ADHD may be due to generally slower responses and consequently would be a by-product of it. By comparing the magnitude of interference effect in a Stroop task when taking account for differences in overall response speed, they showed that the amount of interference did not differ between patient and control group at comparable reaction time levels. Moreover, it is noticeable that most studies reporting interference effects in adults with ADHD also reported longer RTs in these patients (Bush et al., 1999; King et al., 2007; Lundervold et al., 2011) and at the contrary, one of the rare studies which did not report a significant difference between the interference effects when comparing ADHD patients and control subjects also failed to report differences in RTs (Banich et al., 2009).

Slower RTs have been found to be characteristic of ADHD responding in several different tasks (e.g., Alderson et al., 2007; Castellanos et al., 2005; Epstein et al., 2011; Johnson et al., 2007; Leth-Steenson, King-Elbaz, & Douglas, 2000; Lijffijt et al., 2005; Oosterlaan et al., 1998). Different explanations may account for this result. Either ADHD patients would be slowed down in their motor execution compared to control subjects, or perhaps this slowing down could be due to more general deficits, such as alertness or sustained attention deficits.

Chronometric analyses indicated that MT was not different between groups, which eliminates the idea that ADHD patients could be slowed down at the execution level. Furthermore, all others indices, such as PMT and IAL tended to be longer for adults with ADHD, suggesting that the processing of the stimulus could be globally delayed, perhaps due to dysfunctional processes such as sustained attention or motivation. If sustained attention level is lower in these patients, they could have more difficulties to quickly detect the stimulus and then all

processes would be delayed. Performance of adults with ADHD were impaired in the CPT task compared to control adults suggesting that they could have deficits in sustained attention. Interestingly, correlation found between RTs in Simon task and the percentage of omissions in CPT task in these patients suggest that the patients who were the most impaired in the CPT task were also the slowest in the Simon task, which seems to be in favor of a deficit in alertness and/or sustained attention.

To summarize, larger interference effect observed in adults with ADHD could be a by-product of their slowing down due to a lack of sustained attention but it would not reflect deficits in interference control such as higher sensitivity to external stimuli or lack of inhibition. Nonetheless, Ridderinkhof and colleagues (2005) found deficits of response impulses suppression in children with ADHD by using delta plots, which suggests that deficits in executive function may partly differ between child and adults with ADHD. It is also noticeable that all the adults who participated to this study were without medication since at least six months, which means that even if they showed symptoms of ADHD, they were able to live without medication. It is possible that these patients developed adaptive strategies to control themselves explaining why the expression and the inhibition of impulsivity were not affected in the Simon task.

Conclusions

Our results provided evidence that adults with ADHD did not present higher impulse expression neither deficits in impulse suppression, at least when performing a Simon task. The interference control impairment observed in these adults would not be related to a deficit in the expression or inhibition of impulses *per se*, but perhaps would rather be due to more general cognitive deficits such as attention impairments leading to a slowing down of processes.

Moreover, even if further studies are needed to generalize our data to different conflict tasks, it should be noted that our conclusions could probably not have been reached with analyses restricted to mean performance (such as mean RTs and mean error rates), which highlights the usefulness of indices such as incorrect activation rate and correction rate coming from EMG activity, and at least the necessity of RT and accuracy distribution analyses in clinical research. They also should lead us to further considerations concerning studies using conflict tasks and which related the congruency effect to the inhibition capacity since these studies commonly only use mean RT and variance as measures of response inhibition.

References

Allain, S., Burle, B., Hasbroucq, T., and Vidal, F. (2009). Sequential adjustments before and after partial errors. *Psychon. Bull. Rev*. 16, 356–362.

American Psychiatric Association. (2000). Diagnostic and statistical manual of mental disorders. Forth Edition Revised (DSM IV-TR). Washington DC. Traduction française: *Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux*. Paris: Masson, 2004.

Alderson, R.M., Rapport, M.D., & Kofler, M.J. (2007). Attention-deficit/hyperactivity disorder and behavioural inhibition: A meta-analytic review of the stop-signal paradigm. *Journal of Abnormal Child Psychology*,35, 745–758.

Barkley, R.A. (1997). Behavioral Inhibition, Sustained Attention, and Executive Functions: Constructing a Unifying Theory of ADHD. *Psychological Bulletin*, 121, 65-94.

Banich, M.T., Burgess, G.C., Depue, B.E., Ruzic, L., Bidwell, L.C., Hitt-Laustsen, S., et al. (2009). The neural basis of sustained and transient attentional control in young adults with ADHD. *Neuropsychologia*, 47, 3095–3104

Biederman, J, Newcorn, J., & Sprich, S. (1991). Comorbidity of attention deficit hyperactivity disorder with conduct, depressive, anxiety, and other disorders. *The American journal of psychiatry*, *148*(5), 564–577.

Biederman, Joseph, & Faraone, S.V. (2005). Attention-deficit hyperactivity disorder. *Lancet*, *366*(9481), 237–248. doi:10.1016/S0140-6736(05)66915-2

Biederman, Joseph, & Faraone, S.V. (2006). The effects of attention-deficit/hyperactivity disorder on employment and household income. *MedGenMed: Medscape general medicine*, *8*(3), 12.

Burle, B., Possamaï, C.A., Vidal, F., Bonnet, M., and Hasbroucq, T. (2002). Executive control in the Simon effect: an electromyographic and distributional analysis. *Psychological Research*. 66, 324–336

Bush G, Frazier J.A, Rauch S.L., Seidman L.J., Whalen P.J., Jenike M.A., (1999) Anterior cingulate cortex dysfunction in attention-deficit/hyperactivity disorder revealed by fMRI and the counting Stroop. *Biological Psychiatry*,45:1542–52.

de Jong, R., Liang, C.C., & Lauber, E. (1994). Conditional and unconditional automaticity: a dual-process model of effects of spatial stimulus-response correspondence. *Journal of Experimental Psychology:Human Perception and Performance*, 20(4), 731-750

Castellanos, F.X., Sonuga-Barke, E.J.S., Scheres, A., Di Martino, A., Hyde, C., & Walters, J. R. (2005). Varieties of attention-deficit/hyperactivity disorder-related intra-individual variability. *Biological Psychiatry*, 57, 1416–1423

Epstein, J.N., Langberg, J.M., Rosen, P.J., Graham, A., Narad, M.E., Antonini, T.N., Altaye, M. (2011). Evidence for higher reaction time variability for children with ADHD on a range of cognitive tasks including reward and event rate manipulations. *Neuropsychology*, 25(4), 427–441.

Epstein J.N., Jeffery N.J., (2001). "Neuropsychological Assessment of Response Inhibition in Adults with ADHD." *Journal of Clinical & Experimental Neuropsychology,* 23 (3): 362–371.

Hasbroucq, T., Possamaï, C.A., Bonnet, M., and Vidal, F. (1999). Effect of the irrelevant location of the response signal on choice reaction time: an electromyographic study in humans. *Psychophysiology,* 36, 522–526.

Hedge, A., & Marsh, N., (1975). The effect of irrelevant spatial correspondences on two-choice response time. *Acta Psychologica*, 39, 427– 439.

Hervey, A.S., Epstein, J.N., & Curry, J.F. (2004). Neuropsychology of adults with attention – deficit/hyperactivity disorder: a meta analytic review. *Neuropsychology*, 18, 485-503.

Hodges, P.W., & Bui, B.H. (1996). A comparison of computer-based methods for the determination of onset of muscle con-traction using electromyography. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 101, 511–519.

Hommel, B. (2011). The Simon effect as tool and heuristic. *Acta Psychologica*, 136, 189-202.

Johnson, K.A., Kelly, S.P., Bellgrove, M.A., Barry, E., Cox, M., Gill, M., & Robertson, I.H. (2007). Response variability in Attention Deficit Hyperactivity Disorder: Evidence for neuropsychological heterogeneity. *Neuropsychologia*, 45,630-638.

King, J.A., Michael C, Marcel B., Isabella H., and D.Y. Von Cramon.(2007). "Inefficient Cognitive Control in Adult ADHD: Evidence from Trial-by-trial Stroop Test and Cued Task Switching Performance." *Behavioral and Brain Functions,* 3 (1): 42.

Kornblum, S. (1994). The way irrelevant dimensions are processed depends on what they overlap with: the case of Stroop- and Simon-like stimuli. *Psychological Research*, 56(3), 130-135.

Kornblum, S., Hasbroucq, T., & Osman, A. (1990). Dimensional overlap: cognitive basis for stimulus-response compatibility-a model and taxonomy. *Psychological Review*, 97(2), 253-270.

Leth-Steensen, C., King Elbaz, Z., & Douglas, V.I. (2000). Mean response time, variability, and skew in the responding of ADHD children: A response time distributional approach. *Acta Psychologica*,104, 167–190.

Lijffijt, M., Kenemans, J.L., Verbaten, M.N., & Engeland, H. (2005). A meta-analytic review of stopping performance inattention-deficit/hyperactivity disorder: Deficient inhibitory motor control? *Journal of Abnormal Psychology*,114(2),216–222

Lundervold, A.J., Steinunn A., Helene H., Anne H., Kerstin J.P., and Jan Haavik. (2011). "Attention Network Test in Adults with ADHD-the Impact of Affective Fluctuations." *Behav Brain Funct,* 7: 27.

Moura, H.F., Faller, S., Benzano, D., Szobot, C., von Diemen, L., Stolf, A.R., Kessler, F.H.P. (2013). The effects of ADHD in adult substance abusers. *Journal of addictive diseases, 32*(3), 252–262.

Nigg, J.T. (2001). Is ADHD a disinhibitory disorder? *Psychological bulletin*, *127*(5), 571–598.

Oosterlaan J., Logan G.D, Sergeant J.A. (1998): Response inhibition in AD/HD, CD, comorbid AD/HDCD, anxious and control children: A meta-analysis of studies with the stop task. *J Child Psychol Psychiatry* 39:411–425.

Palacio, J.D., Castellanos, F.X., Pineda, D.A., Lopera, F., Arcos-Burgos, M., Quiroz, Y.T., Henao, G.C., et al. (2004). Attention-deficit/hyperactivity disorder and comorbidities in 18 Paisa Colombian multigenerational families. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, *43*(12).

Proctor, R.W., Lu, C.H., Wang, H., & Dutta, A. (1995). Activation of response codes by relevant and irrelevant stimulus information. *Acta Psychologica*, 90, 275–286.

Reich, W. (2000). Diagnostic interview for children and adolescents (DICA). *Journal of American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 39, 59 – 66.

Ratcliff, R. (1979).Group reaction time distributions and analysis of distribution statistics. *Psychological Bulletin*, 86(3), 446-461.

Ridderinkhof, K.R. (2002a). "Activation and suppression in conflict tasks: empirical clarification through distributional analyses," in *Attention and Performance*, Vol. XIX, Common Mechanisms in Perception and Action, eds W. Prinz and B. Hommel (Oxford: Oxford University Press), 494–519.

Ridderinkhof, K.R. (2002b). Micro and macro-adjustments of task set: activation and suppression in conflict tasks. *Psychological Research*. 66, 312–323.

Ridderinkhof, K.R., van den Wildenberg, W.P.M., Wijnen, J., and Burle, B. (2004). "Response inhibition in conflict tasks is revealed in delta plots," in *Cognitive Neuroscience of Attention*, ed. M. Posner (New York: Guilford Press), 369–377.

Ridderinkhof, K.R., Scheres, A., Oosterlaan, J., & Sergeant, J.A. (2005). Delta plots in the study of individual differences: New tools reveal response inhibition deficits in AD/HD that are eliminated by methylphenidate treatment. *Journal of Abnormal Psychology*, *114*(2), 197.

Rodríguez-Jiménez, R., Ponce, G., Monasor, R., Jiménez-Giménez, M., Pérez-Rojo, J.A., Rubio, G., Jiménez Arriero, et al. (2001). [Validation in the adult Spanish population of the Wender Utah Rating Scale for the retrospective evaluation in adults of attention deficit/hyperactivity disorder in childhood]. *Revista de neurologia*, *33*(2), 138-144.

Sergeant, J.A., Geurts, H., & Oosterlaan, J. (2002). How specific is a deficit of executive functioning for attention deficit/hyperactivity disorder? *Behavioural Brain Research*, *130*(1-2), 3–28.

Simon, J.R., & Rudell, A.P. (1967). Auditory S–R compatibility: The effect of an irrelevant cue on information processing. *Journal of Applied Psychology*, 51,300−304

Simon, J.R. (1969). Reactions toward the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology,* 81, 1974–1976

Soutschek, A., Schwarzkopf, W., Finke, K., Hennig-Fast, K., Müller, H. J., Riedel, M., Schubert, T. (2013). Interference control in adult ADHD: no evidence for interference control deficits if response speed is controlled by delta plots. *Acta psychologica*, *143*(1), 71–78. doi:10.1016/j.actpsy.2013.02.013

Spencer, T.J., Biederman, J., & Mick, E. (2007). Attention-deficit/hyperactivity disorder: Diagnosis, lifespan, comorbidities, and neurology. *Journal of Pediatric Psychology*, 32, 631 – 642

Stevens, M., Lammertyn, J., Verbruggen, F., & Vandierendonk, A. (2006).Tscope: A C library for programming cognitive experiments on the MS Windows platform. *Behavior Research Methods*, 38, 280–286.

Taylor, C.J., & Daniel C.M. (1997). "Neuropsychological Assessment of Attention in ADHD Adults." *Journal of Attention Disorders*, 2 (2): 77–88.

van Boxtel, G.J.M., Geraats, L.H.D., Berg-Lenssen, M.M.C.,van den, & Brunia, C.H.M. (1993). Detection of EMG onset in ERP research. *Psychophysiology*, 30, 405–412.

Van den Wildenberg, W.P.M., Wylie, S.A., Forstmann, B.U., Burle, B., Hasbroucq, T., & Ridderinkhof, K.R. (2010). To head or to heed? Beyond the surface of selective action inhibition: a review. *Frontiers in human neuroscience*, *4*, 222. doi:10.3389/fnhum.2010.00222

Vincent,S.B (1912) The function of the vibrossae in the behavior of the white rat. *Behavioral Monograph I.*

Walker, A.J, E.A Shores, J.N Trollor, T. Lee, and P.S Sachdev. (2000). "Neuropsychological Functioning of Adults with Attention Deficit Hyperactivity Disorder." *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22 (1) (February): 115–124.

Winer, B.J. (1970) Statistical principles in experimental design. London: Mc Graw-Hill

Wylie, S.A., Ridderinkhof, K.R., Elias, W.J., Frysinger, R.C., Bashore, T.R., Downs, K.E., van Wouwe, N.C., and van den Wildenberg, W.P.M. (2010). Subthalamic nucleus stimulation influences expression and suppression of impulsive behavior in Parkinson's disease. *Brain*.

Wylie, S.A., van den Wildenberg, W., Ridderinkhof, K.R., Claassen, D.O., Wooten, G.F., & Manning, C.A. (2012). Differential susceptibility to motor impulsivity among functional subtypes of Parkinson's disease. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*, *83*(12), 1149–1154.

Chapitre VI

Contribution expérimentale 3

Title :

The cognitive structure of time estimation impairments in adults with ADHD.

Authors :

Isabel Suarez[1], Francisco Lopera[2], David Pineda[2], Laurence Casini[1]

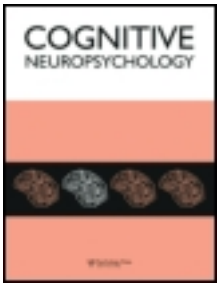
Affiliation :

1. Aix-Marseille Université, CNRS, Laboratoire de Neurosciences Cognitives, UMR 7291, Marseille, France.
2. Neurosciences Group, University of Antioquia, Medellin, Colombia.

Keywords:

ADHD adults, attention, pacemaker-counter clock, temporal bisection task.

This article was downloaded by: [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini]
On: 11 October 2013, At: 08:22
Publisher: Routledge
Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



Cognitive Neuropsychology
Publication details, including instructions for authors and subscription information:
http://www.tandfonline.com/loi/pcgn20

The cognitive structure of time estimation impairments in adults with attention deficit hyperactivity disorder

Isabel Suarez[a], Francisco Lopera[b], David Pineda[b] & Laurence Casini[a]

[a] CNRS, Laboratoire de Neurosciences Cognitives, Aix-Marseille Université, Marseille, France

[b] Neurosciences Group, University of Antioquia, Medellin, Colombia

Published online: 10 Oct 2013.

To cite this article: Isabel Suarez, Francisco Lopera, David Pineda & Laurence Casini , Cognitive Neuropsychology (2013): The cognitive structure of time estimation impairments in adults with attention deficit hyperactivity disorder, Cognitive Neuropsychology

To link to this article: http://dx.doi.org/10.1080/02643294.2013.842548

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions

Cognitive Neuropsychology, 2013
http://dx.doi.org/10.1080/02643294.2013.842548

Routledge
Taylor & Francis Group

The cognitive structure of time estimation impairments in adults with attention deficit hyperactivity disorder

Isabel Suarez[1], Francisco Lopera[2], David Pineda[2], and Laurence Casini[1]

[1]CNRS, Laboratoire de Neurosciences Cognitives, Aix-Marseille Université, Marseille, France
[2]Neurosciences Group, University of Antioquia, Medellin, Colombia

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

We compared the performance of 15 adults with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) and a group of 16 control adults on a temporal bisection task in auditory and visual modalities. The point of subjective equality (PSE) and the difference limen (DL) were computed to analyse performance. The main findings were that (a) individuals with ADHD overestimated the duration of both the auditory and visual stimuli in comparison to the control group, as evidenced by a shift in their mean PSE; (b) individuals with ADHD also showed less precision in their estimates than did the control group as evidenced by flatter psychometric functions; and (c) the degrees of overestimation and imprecision in subjects with ADHD were comparable across modalities. These results, discussed in the framework of the pacemaker–counter clock model of time estimation, suggest that temporal difficulties encountered by ADHD patients might be explained both by an alertness effect at the level of the switch that directs pulses into the accumulator and also by distortions of durations stored in reference memory.

Keywords: Attention deficit hyperactivity disorder adults; Attention; Pacemaker–counter clock; Temporal bisection task.

Attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) is the most commonly diagnosed behavioural disorder afflicting children. It corresponds to symptoms of inattention, hyperactivity, and impulsivity (APA, 2000). The persistence of the disorder into adulthood has been estimated at about 70% (Spencer, Biederman, & Mick, 2007), leading to substantial health and economic difficulties as a consequence of poor social, behavioural, and academic outcomes (Currie & Stabile, 2004).

A common characteristic of adults with ADHD is that sufferers often have difficulty with "time management" (Barkley, 1997). This trait has mainly been interpreted as the result of the inability to anticipate and predict events, both of which are considered to require an accurate perception of time intervals. Estimating time intervals

Correspondence should be addressed to Laurence Casini, LNC, Pôle 3C, Case C, 3 place Victor Hugo 13331 Marseille cedex 3, France (E-mail: laurence.casini@univ-amu.fr).

The authors warmly thank Sarah Winlow for proofreading this text.
This work was funded by the CNRS and Aix-Marseille Université and also received the support of the programme Sostenibilidad 2009–2010 del Codi and of the Universidad de Antioquia.

© 2013 Taylor & Francis

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

in a range from seconds to minutes is an important adaptive skill for making predictions about one's environment (Meck, 2005), such as crossing streets (Zakay & Block, 1997) and making valid decisions (Wittmann & Paulus, 2008). For individuals with ADHD, deficits in interval timing might underlie several problems. For example, impulsivity can be seen as a temporally inadequate behaviour yielding responses that are made too early, which could underlie several problems, such as deficits in waiting behaviour (Barkley, 1997), delaying responses (Sonuga-Barke, Saxton, & Hall, 1992), and delaying gratification (Douglas & Parry, 1983; Gorenstein & Newman, 1980). Individuals suffering from ADHD also have difficulty in representing past events in the correct temporal order, which could lead them to experience long frustrating time frames (Barkley, Murphy, & Bush, 2001; McInerney & Kerns, 2003).

Temporal processing has been studied mostly in children with ADHD (for review, see Toplak, Dockstader, & Tannock, 2006), and several studies report deficits in temporal reproduction and temporal production tasks, but only a few studies have investigated temporal performance in adults with ADHD. Among them, Barkley et al. (2001) extended findings on time perception in children with ADHD to adults by showing that those with ADHD made shorter reproductions and greater reproduction errors than a control group. More recently, some studies have reported difficulties in time estimation by using different tasks, such as verbal estimation (Pollak, Kroyzer, Yakir, & Friedler, 2009) and paced finger tapping (Valera et al., 2010).

Current theoretical models of ADHD provide different accounts of time perception deficits in interval timing (Toplak et al., 2006). One explanation for this finding is based on Barkley's theory (Barkley, 1997), which states that impaired working memory in ADHD results in deficient time evaluation. In time-reproduction tasks, participants must hold the target duration in memory in order to reproduce it. Therefore, the load on one's working memory is particularly critical in this task. An alternative proposed explanation of the difficulty in time-reproduction tasks is that children with ADHD cut short the task to avoid experiencing the temporal time frames that they dislike. This "delay aversion" that characterizes ADHD is expressed in underestimations that children with ADHD produce in the reproduction task (Sonuga-Barke, Taylor, Sembi, & Smith, 1992). This is congruent with the data of Smith and colleagues (Smith, Taylor, Warner-Rogers, Newman, & Rubia, 2002), who reported that children with ADHD significantly underestimated time by prematurely responding in a 12-s rather than a 5-s time-reproduction task.

Functional models of time estimation could also aid the understanding of temporal deficits observed in individuals with ADHD. The prevalent view in cognitive theories of psychological time is that we time intervals using an internal clock consisting of three components: (a) a clock stage, composed of a pacemaker–counter device, (b) a memory stage, and (c) a decision-comparison stage. An interval is specified by the accumulation of pulses emitted at a regular rate by a pacemaker. The more pulses that are accumulated, the longer the subjective estimation of duration. The influence of different factors on this internal clock has been extensively studied. One of the most documented effects is that subjective duration depends on attention allocated to time (Brown, 1997; Casini & Macar, 1997; Hicks, Miller, Gaes, & Bierman, 1977; Hicks, Miller, & Kinsbourne, 1976; Macar, Grondin, & Casini, 1994; McClain, 1983). It has been shown that, first, the more attentional resources are diverted from the temporal parameters, the worse the temporal performance, and, second, this decrease in temporal performance is due to a systematic shortening of subjective duration. This has been explained by the proposal that during periods when attention is not allocated to time, pulses are lost, reducing the number of pulses accumulated, yielding shorter estimated durations (Brown, 1997; Burle & Casini, 2001; Casini & Macar, 1997; Zakay, 1989). Therefore, symptomatic inattention in ADHD could also cause their difficulties with time estimation. If this is explained on the basis of inattention, then each

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

time ADHD patients stop attending to time, some pulses would be lost; therefore ADHD patients should present a bias towards shorter estimates compared to control subjects. However, it is also possible that temporal difficulties could be due purely to temporal processing (clock stage) or to deficits at the memory or decision stages.

To better understand the cause of temporal difficulties related to ADHD, we compared the performance of adults with ADHD and of controls on a temporal bisection task. Participants were initially trained to discriminate between a short and long duration signal—the anchor durations. In the subsequent test phase, they classified probe signals as short or long, relative to the anchor durations experienced in training. Some of these probe signals were the same as the anchor durations, but most were of intermediate duration. This task has the advantage of providing two distinct measures of performance: the difference limen (DL), which can be interpreted as a measure of participants' temporal precision, and the point of subjective equality (PSE), which determines whether or not participants presented a shift in their temporal judgements with either an underestimation or an overestimation of durations. These two indices have been classically used to examine effects of attention, memory, and pacemaker changes in interval timing.

Finally, Toplak and Tannock (2005) reported greater differences between groups in the visual than in the auditory modality, suggesting a possible influence of the modality. Subjects were therefore tested using both the visual and auditory modalities.

METHOD

Participants

We tested two groups of subjects, recruited through the Science Investigation Center of the University of Antioquia (Colombia): 15 ADHD adults (age 18–29 years, mean = 22.13, 14 males) and 16 healthy adults (age 19–25 years, mean = 21.68, 11 males). All participants gave informed consent to the experimental procedure, following the Helsinki Declaration (1964). The study was approved by the Ethical Committee of the Investigation Center of the University of Antioquia (Colombia).

Selection procedure for the ADHD group

Adults in the ADHD group were recruited from the clinical database of the Neurosciences Clinic of the University of Antioquia (Colombia). All participants in the present study were selected among patients who had been diagnosed with ADHD as children, who continue to be observed by the psychiatrists of the clinic, and for whom the diagnosis was again confirmed in their young adulthood by two psychiatrists of the clinic in the last two years.

Clinical diagnoses and definitions of ADHD (i.e., affected or nonaffected, as defined by the *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders–Fourth Edition, Text Revision, DSM–IV–TR*; American Psychiatric Association, 2000) used in this clinic have been extensively described in detail elsewhere (Palacio et al., 2004) and are only briefly described here. For diagnoses in children, structured diagnostic interviews were conducted in the Neurosciences Clinic by a team of professionals supervised by an expert psychiatrist who reviewed all interviews and conducted confirmatory clinical interviews with all participants. Parents underwent a full psychiatric structured interview regarding their offspring [Diagnostic Interview for Children and Adolescents–Revised Parents Version (DICA–IV–P) Spanish version translated with permission from W. Reich (Reich, 2000)]. Parents and teachers of school-age children also provided behaviour rating scales. Final diagnoses were reached by consensus on the basis of the results of structured interviews, collateral historical information, and clinical interviews for each family lineage member through the best estimate procedure (Reich, 2000) by a committee of four bilingual clinicians, all of whom have extensive experience with ADHD. Definitely affected subjects had met full DSM–IV ADHD criteria during childhood, with onset before age 7 years, and with persistence of clearly

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

impairing symptoms in more than one setting. In cases of discordance between an individual's self-report of symptoms and collateral reports, the supervising psychiatrist obtained further collateral information and probed more deeply for evidence of early impairment. For confirmation in young adulthood, patients were given a structured interview for current functioning and evaluating symptoms of ADHD described in DSM–IV by two different psychiatrists.

For this study, in order for the ADHD group to be as homogeneous as possible but also not reduced to only one symptom (impulsivity or attention), only adults who had been diagnosed with the combined ADHD type in childhood and with diagnosis confirmed in young adulthood were contacted and solicited for their participation.

It is important to note that all participants selected for this study had been under medication (methylphenidate) at different periods of their life but had not taken medication in the six months prior to the experiment.

Criteria for the control group

The control group was composed of adults without ADHD recruited at the University of Antioquia. Inclusion criteria were a lack of history of diagnosis of ADHD on the basis of a retrospective assessment of ADHD by self-completion of a 61-item Spanish version of the Wender Utah Rating Scale (WURS; Rodriguez-Jimenez et al., 2001) and failure to meet the cut-off point.

Exclusion criteria for both groups

Exclusion criteria included (a) a diagnosis of additional psychiatric (major depression, panic disorder, suicide risk, anxiety, substance abuse, psychoactive substance use, psychotic disorders) or neurological disorder on the basis of a Spanish version of the structured psychiatric interview mini mental test (MINI, Sheehan et al., 1998), (b) current or recent drug abuse (less than 6 months), and (c) an intelligence quotient (IQ) of less than 80, evaluated with the short form of the Wechsler Adult Intelligence Scale–Third Edition (WAIS–III, Wechsler, 1997), including four subtests: Similarities and Vocabulary tests to estimate verbal IQ, and Picture Completion and Block Design tests to estimate performance IQ.

In addition to IQ measures, the working memory index was assessed, for both groups, using three items of the WAIS–III (Arithmetic, Digit Span, and Letter–Number sequencing).

Procedure

The experiment consisted of two different experimental sessions, each corresponding to one modality. The order of sessions was counterbalanced between participants (in each group, half the participants carried out the visual modality session first followed by the auditory modality, and the other half in the opposite order). Each session lasted about 15 minutes and with a break of 10 minutes between sessions.

Participants were comfortably seated in a dimly lit, soundproof room. Two response keys were available. In the auditory modality, white noise was delivered through headphones, and, in the visual modality, a red full-circle appeared on a video screen. Participants had to judge the duration of the stimulus. The experiment was controlled by a computer running T-scope (Stevens, Lammertyn, Verbruggen, & Vandierendonk, 2006).

For each modality, before the test phase, participants undertook training. In the training phase, only the anchor durations were used (auditory modality: 150 and 430 ms; visual modality: 300 and 900 ms). Different duration ranges were used in each modality, because their respective temporal thresholds are known to be different (Lhamond & Goldstone, 1974). The training phase consisted of two parts. First, participants were presented with the two standard durations, each presented four times in alternation. Participants were instructed just to observe the stimuli, with no response required. The stimuli were described for the participants by the experimenter, who indicated in Spanish whether a stimulus was "short" or "long" in tandem with its presentation. Next, the two anchor durations were randomly presented 10 times, and subjects indicated

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

whether the stimulus presented was short or long by pressing the appropriate response key, using either the right or the left index finger. The association between the response (short or long) and the hand used (right or left) was counterbalanced between participants. Feedback was not given after each response but only at the end of the block of 10 trials, as in the test phase. Feedback after each response was not necessary because the anchor durations were easily distinguished.

The mean percentages of correct responses were as follows: ADHD visual: 94.3% ± 7.6; ADHD auditory: 94.6% ± 6.6; control visual: 92.77% ± 9.6; and control auditory: 94% ± 10.5. There were no significant differences between groups in either of the concerned modalities [auditory: $t(29) = 0.49$; visual: $t(29) = 1.41$].

In the test phase, in the auditory modality, white noise could be of five different durations (150 ms, 220 ms, 290 ms, 360 ms, 430 ms), and, in the visual modality, the red circle appeared on the video screen for five different durations (300 ms, 450 ms, 600 ms, 750 ms, 900 ms). Participants were required to indicate whether the presented stimuli were short or long by pressing the appropriate response key. Feedback was not given.

Each session contained two blocks of 50 trials corresponding to five stimuli (= 5 durations), each delivered 10 times (intertrial interval = 2 s).

RESULTS

Demographic and neuropsychological variables

Differences between demographic characteristics of control and ADHD groups were tested using independent-sample t tests. As shown in Table 1, no significant differences existed in age, IQ scores, or working memory index. As expected, WURS scores were significantly different.

Results for temporal tasks

The classification data obtained in the duration bisection procedure may be quantified as the proportion of long responses the participant made at each signal duration for each modality and can be well described by a sigmoidal function. Sigmoidal functions were fitted to the response functions of each participant for each modality. This function allowed us to estimate the two dependent variables: the point of subjective equality (PSE) and the difference limen (DL). The PSE is the signal duration at which a participant is equally likely to classify the signal as short or long. It represents the subjective midpoint between the short and long anchor values that the participant learned in training. An increase in the PSE (a rightward shift of the curve) means that participants chose more often to respond "short"; inversely, a decrease in the PSE (a leftward shift of the curve) means that participants were biased towards selecting to respond "long". The PSE, reflecting a shift of the curve, therefore allows us to observe whether the participants presented a *bias* in their temporal judgements towards either an underestimation or an overestimation of durations. The DL is a measure of the "slope" of the participants' response function when plotted. It is calculated by subtracting the duration that the participant classifies as long 25% of the time from the duration that the participant classifies as long 75% of the time and dividing by two. It can be interpreted as a measure of participants' temporal precision because steep slopes are indicative of precise temporal processing whereas shallow slopes indicate greater variability in the interval-timing system. Both indices were calculated using a linear regression method.

The most interesting feature of these measures is that they allow for the detection of subtle differences between groups, differences that are missed by other measures. Indeed, DL and PSE can be different between groups indexing differences of judgements for the very close intermediate durations whereas no differences are observed for the anchor durations (see results observed in the training phase).

One ADHD patient was excluded because he anticipated more than 50% of responses in both modalities. In addition, in the auditory modality, one control subject and one ADHD patient

Table 1. *Demographic and neuropsychological variables for both groups*

Characteristic	ADHD ($N = 15$) Mean ± *SD*	Control ($N = 16$) Mean ± *SD*	*t*-value	*p*-value
Age (years)	21.6 ± 4	22.2 ± 1.6	0.55	.6
IQ	102.9 ± 10.6	100.9 ± 10.1	0.53	.59
WMI	90.5 ± 8.7	95.8 ± 12.8	1.39	.17
WURS	55.3 ± 10.9	18.7 ± 9.5	9.92	.0001

Note: ADHD = attention-deficit/hyperactivity disorder; IQ = intellectual quotient; WMI = Working Memory Index; WURS = Wender Utah Rating Scale.

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

obtained percentages close to 50% of "short" responses, whatever the duration presented, preventing estimation of DL and PSE. Analyses were carried out on 15 control subjects and 13 ADHD subjects for the auditory modality, and on 16 control subjects and 14 ADHD subjects for the visual modality.

We first report comparisons between groups (using independent-sample *t* tests) in each modality, then a comparison of effect size between modalities (using paired-sample *t* tests).

Auditory modality

As illustrated by Figure 1, the two groups differed significantly for both the DL and for the PSE. Mean DL was larger for ADHD patients than for control subjects, $t(26) = 1.72$, $p < .05$, suggesting that ADHD patients were more variable in their judgements and had more difficulty in discriminating between the short and long stimuli. The mean PSE was less for the ADHD group than for the control group, $t(26) = 1.91$, $p < .05$. This indicates that for the intermediate targets, durations were judged as short more often by control subjects and were identified as long more often by the ADHD patients, who overestimated intermediate durations.

Visual modality

In this modality, the differences between groups were also significant for the DL and the PSE. Figure 2 shows (a) an increase in mean DL for

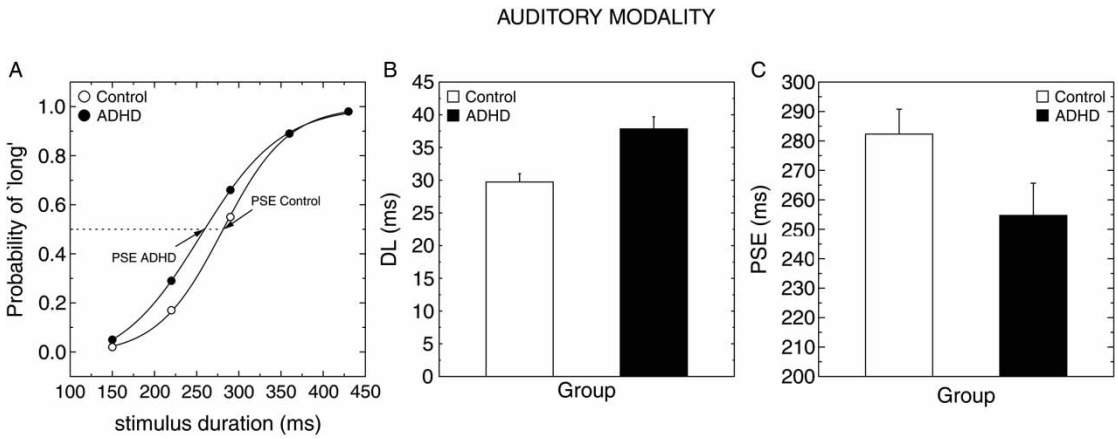


Figure 1. *Auditory temporal bisection task. (A): Mean probability of "long" responses as a function of the stimulus duration for control and attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) groups. A logistic function is fitted to the average performance of the participants performing the bisection temporal task. Point of subjective equality (PSE) is indicated for control and ADHD groups. (B): Mean difference limen (DL in ms) for both groups. (C): Mean PSE (in ms) in both groups. A decrease in PSE means that patients overestimated durations.*

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

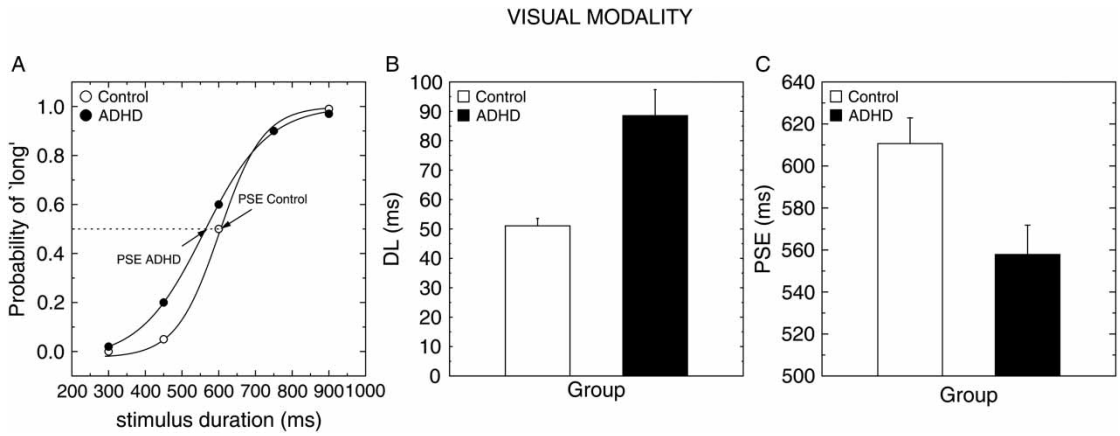


Figure 2. *Visual temporal bisection task. (A): Mean probability of "long" responses as a function of the stimulus duration for control and attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) groups. A logistic function is fitted to the average performance of the participants performing the bisection temporal task. Point of subjective equality (PSE) is indicated for control and ADHD groups. (B): Mean difference limen (DL in ms) for both groups. (C): Mean PSE (in ms) in both groups. A decrease in PSE means that patients overestimated durations.*

ADHD patients compared to control subjects, $t(28) = 3.1$, $p < .001$, again suggesting that patients with ADHD were more variable in their judgement for intermediate durations, and (b) that mean PSE was less for the ADHD group in comparison to the control group, $t(28) = 2.3$, $p < .01$, demonstrating that ADHD patients also overestimated durations of intermediate intervals in the visual modality.

Comparisons between auditory and visual modalities

To compare effect size observed in auditory and visual modalities in subjects with ADHD, we calculated one index called size-PSE for each subject in each modality. Size-PSE expresses the percentage of overestimation (the size of the PSE shift) in subjects with ADHD compared to the mean PSE obtained in the control group; it corresponds to the following ratio: [(mean PSE of control group − subject PSE)/(mean PSE of control group)] × 100. To compare the variability between modalities, we used the Weber fraction (WF), which corresponds to the following ratio calculated for each subject: DL/PSE. It is a measure of timing variability that takes into account the duration being timed.

Table 2 presents these measures for both modalities. We observe that patients with ADHD overestimated durations to the same degree in both modalities (no difference on size-PSE) and that the variability adjusted to PSE was similar in both the visual and auditory modalities (no difference on WF).

In addition, we investigated whether temporal overestimations were correlated to working

Table 2. *Weber fractions and effect size of overestimation in each modality and results of statistical analyses comparing effect size between modalities*

Index	*Auditory modality mean* ± SD	*Visual modality mean* ± SD	t-*value*	p-*value*
WF	0.16 ± 0.09	0.16 ± 0.08	0.79	.44
size-PSE (%)	9.7 ± 15.1	8.6 ± 10.7	1.02	.33

Note: WF = Weber fraction; PSE = point of subjective equality; size-PSE = effect size of overestimation. Statistical analyses: paired *t*-tests.

memory index and/or WURS scores. For working memory index, no correlation was found in either of the concerned modalities (auditory modality: $r = -.03$; visual modality: $r = .34$); however, significant correlations were found between size-PSE and WURS scores in both modalities (auditory modality: $r = .58$, $p < .05$; visual modality: $r = .61$, $p < .05$).

DISCUSSION

This study provides further evidence that ADHD is associated with a deficit in temporal processing, even in the case of adults. Not only did adults with ADHD present larger perceptual variability, which suggests that they had more difficulty in performing the temporal bisection task, but these patients also overestimated duration intervals compared to control subjects. In addition, as similar deficits were obtained in both modalities tested, temporal deficit does not appear to be impacted by modality type.

In the duration bisection procedure, increased variability is revealed by a shallower slope of the psychophysical function, which is frequently interpreted as attentional in origin in the framework of the pacemaker–counter clock model. Different studies have shown that an increase in the variability of switch latency may be due to reduced attention (Allan, 1992; Droit-Volet, 2003; Whiterspoon & Allan, 1985) and, more specifically, to the function of attention known as alertness (Posner & Petersen, 1990). To detect the visual or the auditory stimulus as soon as it occurs, subjects have to increase their alertness and stay alert until the stimulus starts. If subjects have difficulties in maintaining a high level of alertness during trials, the variability of switch latency may increase, thus reducing temporal sensitivity. Consequently, we may assume that the lower sensitivity to duration in the bisection task found in individuals with ADHD might be in part due to the amount of noise produced by the switch closing of the internal clock.

Maintaining a high level of alertness is one function of attention considered as different from the capacity to maintain attention selectively on a stimulus, as is the case, for example, when attention is focused on an auditory or visual stimulus during the whole duration of the trial. The role of focused attention has also been pointed out in temporal judgements. It has been proposed that attention may determine the quality of pulse accumulation. Under full attention, the switch is supposed to close and to remain closed for the entire duration of the stimulus, whereas when less attention is being paid, the switch may oscillate or flicker between closed and opened states, which would lead to fewer pulses being accumulated and thus durations to be judged as shorter, as is the case when a temporal task is performed concurrently with an attention-consuming secondary task (Brown, 1997; Burle & Casini, 2001; Casini & Macar, 1997). In the present study, durations were estimated as longer by adults with ADHD than by control subjects—a result that therefore cannot be explained by a deficit of focused attention. These results can be related to those found by Pollak et al. (2009) who reported that the presence of a distractor did not impact time evaluation in adults with ADHD, contrary to the observations of Barkley and colleagues in children (Barkley, Koplowitz, Anderson, & McMurray, 1997). It is possible that adults with ADHD compensate for their attention deficit. Prox, Dietrich, Zhang, Emrich, and Ohlmeier (2007) have studied event-related potentials reflecting attentional processing in adults with ADHD. Their data suggest that adults with ADHD learn to gather their attention more strongly than healthy adults in order to achieve the same results and compensate for their impairment.

Alternatively, in the framework of the pacemaker–counter model, time overestimation may be explained by an acceleration of the pacemaker rate. If the clock runs faster, more pulses are accumulated, and temporal intervals seem longer, explaining the leftward shift observed in the PSE. Moreover, we observed that scalarity was respected between auditory and visual modality (with no difference between WF), for which we used two different duration ranges, which means

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

that the effect was multiplicative with the duration values. This is congruent with an effect on the pacemaker rate (Burle & Casini, 2001; Penney, Gibbon, & Meck, 2000). Indeed, if the pacemaker runs faster, the effect has to be greater for longer than for shorter durations (i.e., proportional to the duration values). These data might support the hypothesis that a faster pacemaker rate could be at the origin of overestimations, but a faster than normal clock speed results in a shift in an estimate of duration only when the experience of time on the test trial is measured with a faster clock than that used to measure the reference duration during the training phase (Meck, 1996). For example, in the bisection-procedure task, if the reference durations are measured with a relatively slower clock speed during a training session, and on the test trials a faster clock is used, then more pulses would be accumulated during the same test duration, and the signal would seem longer than it really is, leading to overestimation. Hence the findings for patients with ADHD should be explained by differential clock speeds during the training session, and the test phase may be due to different motivational states. However, if the fast clock speed is used both when the reference duration is encoded and when the comparison duration is experienced, which seems a more prudent and likely explanation, then signal classifications are accurate, and neither under- nor overestimations are observed.

An alternative possibility is that the overestimations are a consequence of systematic memory distortions. In the bisection task, it is assumed that in each trial the subject compares a value stored in the accumulator during the current trial with values previously stored in reference memory and associated with the two anchor durations presented during the learning phase. If the transfer to reference memory is defective and systematically results in a loss of pulses, values stored in reference memory would be distorted short. As a consequence, durations presented in the current trial would be judged as longer than those that were actually presented. Moreover, some authors have proposed that memory representations of anchor durations are stored as distributions; therefore sampling from their distributions produces trial-by-trial variance (Droit-Volet & Wearden, 2001; Wearden, 1991). In this case, the variability of memory of the short and long standards would be a kind of sensitivity parameter controlling the slope of psychophysical functions: The fuzzier the memory of the short and long standards, the flatter the slope of the psychophysical function, which is the case in the present study. Therefore, it is possible that patients with ADHD constructed more variable representations of anchor durations in visual as in auditory modality.

Studies with functional neuroimaging techniques performed with ADHD children suggest dysfunction of the ventral and dorsolateral prefrontal cortex, the anterior cingulate, and neostriatum (Bush et al., 1999; Castellanos et al., 1996; Durston et al., 2003; Rubia et al., 1999, 2000). In addition, it has been reported that methylphenidate, which is highly effective in the treatment of ADHD and which exerts its effects via dopaminergic pathways, was able to normalize striatal circuitry function and could improve frontal activation in children and adolescents with ADHD (Shafritz, Marchione, Gore, Shaywitz, & Shaywitz, 2004; Vaidya et al., 1998). Similar to findings in childhood ADHD, it has been shown that prefrontal cortex, anterior cingulate cortex, and basal ganglia are also involved in adult ADHD (Ernst et al., 2003; Zametkin et al., 1990). Schneider et al. (2010) reported a functional magnetic resonance imaging (fMRI) study in which brain activation was investigated with a continuous performance test (CPT). They found not only impaired activation of frontostriatal and parietal attentional networks but also correlations between symptom severity and dysfunction of neuronal systems across adult subjects with a history of ADHD in childhood. Therefore timing dysfunctions observed in patients with ADHD may be due to disruption of frontal lobe structures known to be involved in memory.

This hypothesis of memory distortion also receives some support from work by Malapani and colleagues who demonstrated dysfunctional representation of memory for time by manipulating dopamine levels in patients with Parkinson

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

disease (Malapani et al., 1998). Perhaps deficits in dopamine balance in patients with ADHD could also lead to temporal memory dysfunction.

A growing body of evidence in the literature of psychology of time, coming from functional neuroimaging studies as well as patient or animal studies, supports the idea that the basal ganglia, the cerebellum, the supplementary motor areas, and the prefrontal cortex would be the neural substrates of timing (for a review, see Coull, Cheng, & Meck, 2011). Basal ganglia, like the cerebellum, have already been proposed as playing a key role as a pacemaker or "internal clock" (Ivry & Spencer, 2004; Meck & Benson, 2002). Since all of these structures have been shown to be dysfunctional in adolescents and adults with ADHD (Noreika, Falter, & Rubia, 2013; Rubia et al., 2000, 2001; Teicher et al., 2000), one hypothesis among others could be that dysfunction of these brain regions might explain poor performance in timing. In this line, by using fMRI to study neural substrates of impaired sensorimotor timing in adults with ADHD, Valera et al. (2010) suggested that subsecond timing abnormalities would result from atypical activation of corticocerebellar and corticostriatal timing systems. Moreover, there are several studies showing that the treatment of ADHD with dopamine agonists, such as methylphenidate, both attenuates most timing deficits and restores the functioning of underlying fronto-striato-cerebellar networks (for review, see Noreika et al., 2013).

To conclude, this study confirms temporal deficits in adults with ADHD, and in the framework of the pacemaker model, the data suggest that the temporal deficit might result from an alertness impairment affecting the level of the switch that allows pacemaker pulses into an accumulator or from impairment of memory. It is interesting to note that time seems to be perceived as longer in patients with ADHD, which could lead to the illusion of time stretching. The illusion of time stretching might explain several behavioural characteristics expressed in ADHD. Some symptoms of impulsivity, such as impatience and difficulty in waiting for things that are desired, expressed as an aversion to delay and a preference for immediate reward (Sonuga-Barke, Saxton, & Hall, 1998; Sonuga-Barke et al., 1992), could result from this feeling of elongated time. This could also explain why individuals with ADHD quickly become bored with a task, unless they are doing something enjoyable, which should disrupt their attention from temporal aspects and so shorten passing time. In the same manner, some symptoms of hyperactivity such as constantly being in motion or difficulty doing quiet tasks or activities could also be due to the feeling that a long time period has already elapsed.

This study, however, contains at least two limitations. First, the generalization of our findings may be questionable, because our sample of participants only included combined-type ADHD. It would be interesting to investigate bisection temporal performance in different subtype ADHD patients, for example in predominantly inattentive subtype ADHD patients. Second, in this study, we used subsecond durations. A distinction is often made between the processing of durations of more or less than one second. Some authors propose that time estimation of suprasecond durations would be cognitively mediated, whereas measurement of subsecond durations is supposed to be of a highly perceptual nature and not accessible to cognitive control (Karmarkar & Buonomano, 2007; Michon, 1985; Rammsayer & Lima, 1991). Future studies using suprasecond durations are warranted. And finally, further different temporal tasks need to be carried out in order to confirm and generalize our results.

Manuscript received 30 October 2012
Revised manuscript received 22 July 2013
Revised manuscript accepted 4 September 2013
First published online 10 October 2013

REFERENCES

Allan, L. (1992). The internal clock revisited. In F. Macar, V. Pouthas, & W. Friedman (Eds.), *Time, action, and cognition: Towards bridging the gap* (pp. 191–202). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

American Psychiatry Association. (2000). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (4th revised ed.). Washington, DC: American Psychiatric Association (DSM-IV-R).

Barkley, R. (1997). Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: Constructing a unifying theory of ADHD. *Psychological Bulletin*, *121*, 65–94.

Barkley, R. A., Koplowitz, S., Anderson, T., & McMurray, M. B. (1997). Sense of time in children with ADHD: effects of duration, distraction, and stimulant medication. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *3*, 359–369.

Barkley, R. A., Murphy, K. R., & Bush, T. (2001). Time perception and reproduction in young adults with attention deficit hyperactivity disorder. *Neuropsychology*, *15*(3), 351–360.

Brown, S. W. (1997). Attentional resources in timing: Interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks. *Perception and Psychophysics*, *59*(7), 1118–1140.

Burle, B., & Casini, L. (2001). Dissociation between activation and attention effects in time estimation: Implications for internal clock models. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*(1), 195–205.

Bush, G., Frazier, J. A., Rauch, S. L., Seidman, L. J., Whalen, P. J., Jenike, M. A., ... Biederman, J. (1999). Anterior cingulate cortex dysfunction in attention-deficit/hyperactivity disorder revealed by fMRI and the counting Stroop. *Biological Psychiatry*, *45*(12), 1542–1552.

Casini, L., & Macar, F. (1997). Effects of attention manipulation on perceived duration and intensity in the visual modality. *Memory and Cognition*, *25*, 812–818.

Castellanos, F. X., Giedd. J. N., Eckburg, P., Marsh, W. L., King, A. C., Hamburger, S. D., ... Rapoport, J. L. (1996). Quantitative brain magnetic resonance imaging in attention-deficit hyperactivity disorder. *Archives of General Psychiatry*, *53*(7), 607–616.

Coull, J., Cheng, R. K., & Meck, W. (2011). Neuroanatomical and neurochemical substrates of timing. *Neuropsychopharmacology*, *36*(1), 3–25.

Currie, J., & Stabile, M. (2004). Child mental health and human capital accumulation: The case of ADHD. *National Bureau of Economical Resources*, WP 10435.

Douglas, V. I., & Parry, P. A. (1983). Effects of reward on delayed reaction time task performance of hyperactive children. *Journal of Abnormal Child Psychology*, *11*, 313–326.

Droit-Volet, S. (2003). Alerting attention and time perception in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *85*, 372–384.

Droit-Volet, S., & Wearden, J. (2001). Temporal bisection in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *80*, 142–159.

Durston, S., Tottenham, N. T., Thomas, K. M., Davidson, M. C., Eigsti, I. M., Yang, Y. H., ... Casey, B. J. (2003). Differential patterns of striatal activation in young children with and without ADHD. *Biological Psychiatry*, *53*(10), 871–878.

Ernst, M., Kimes, A. S., London, E. D., Matochik, J. A., Eldreth, D., Tata, S., ... Bolla, K. (2003). Neural substrates of decision making in adults with attention deficit hyperactivity disorder. *American Journal of Psychiatry*, *160*(6), 1061–1070.

Gorenstein, E. E., & Newman, J. P. (1980). Disinhibitory psychopathology: A new perspective and a model for research. *Psychological Review*, *87*, 301–315.

Hicks, R. E., Miller, G. W., Gaes, G., & Bierman, K. (1977). Concurrent processing demands and the experience of time-in-passing. *American Journal of Psychology*, *90*, 431–446.

Hicks, R. E., Miller, G. W., & Kinsbourne, M. (1976). Prospective and retrospective judgements of time as a function of amount of information processed. *American Journal of Psychology*, *89*(4), 719–730.

Ivry, R. B., & Spencer, R. M. (2004). The neural representation of time. *Current Opinion in Neurobiology*, *14*, 225–232.

Karmarkar, U. R., & Buonomano, D. V. (2007). Timing in absence of clocks: Encoding time in neural network states. *Neuron*, *53*, 427–438.

Lhamond, W. T., & Goldstone, S. (1974). Studies of auditory-visual differences in human time judgment: 2. More transmitted information with sounds than lights. *Perceptual and Motor skills*, *39*, 295–307.

Macar, F., Grondin, S., & Casini, L. (1994). Controlled attention sharing influences time estimation. *Memory and Cognition*, *22*(3), 673–686.

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

McClain, L. (1983). Interval estimation: Effect of processing demands on prospection and retrospection reports. *Perception and Psychophysics*, *34*(2), 185–189.

McInerney, R. J., & Kerns, K. A. (2003). Time reproduction in children with ADHD: Motivation matters. *Child Neuropsychology*, *9*(2), 91–108.

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

Meck, W. H. (1996). Neuropharmacology of timing and time perception. *Cognitive Brain Research*, *3*, 227–242.

Meck, W. H. (2005). Neuropsychology of timing and time perception. *Brain and Cognition*, *58*, 1–8.

Meck, W. H., & Benson, A. M. (2002). Dissecting the brain's internal clock: How frontal-striatal circuitry keeps time and shifts attention. *Brain and Cognition*, *48*, 195–211.

Michon, J., & Jackson, J. (1985). *Time, mind and behavior*. Heidelberg: Springer Verlag.

Noreika, V., Falter, C. M., & Rubia, K. (2013). Timing deficits in attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD): Evidence from neurocognitive and neuroimaging studies. *Neuropsychologia*, *51*(2), 235–266.

Palacio, J. D., Castellanos, F. X., Pineda, D. A., Lopera, F., Arcos-Burgos, M., Quiroz, Y. T., ... Muenke, M. (2004). Attention-deficit/hyperactivity disorder and comorbidities in 18 Paisa Colombian multigenerational families. *Journal of American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, *43*(12), 1506–1515.

Penney, J., Gibbon, W. H., & Meck, W. (2000). Differential effects of auditory and visual signals on clock speed and temporal memory. *Journal of Experimental Psychology: Human, Perception and Performance*, *26*, 1770–1787.

Pollak, Y., Kroyzer, N., Yakir, A., Friedler, M. (2009). Testing possible mechanisms of deficient supra-second time estimation in adults with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Neuropsychology*, *23*, 679–686.

Posner, M., & Petersen, S. (1990). The attention system of human brain. *Annual Review of Neuroscience*, *13*, 25–42.

Prox, V., Dietrich, D. E., Zhang, Y. Y., Emrich, H. M., & Ohlmeier, M. D. (2007). Attentional processing in adults with ADHD as reflected by event-related potentials. *Neuroscience Letters*, *419*, 236–241.

Rammsayer, T. H., & Lima, S. D. (1991). Duration discrimination of filled and empty auditory intervals: Cognitive and perceptual factors. *Perception and Psychophysics*, *50*, 565–574.

Reich, W. (2000). Diagnostic interview for children and adolescents (DICA). *Journal of American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, *39*, 59–66.

Rodríguez-Jiménez, R., Ponce, G., Monasor, R., Jiménez-Giménez, M., Pérez-Rojo, J. A., Rubio, G., ... Palomo, T. (2001). Validation in the adult Spanish population of the Wender Utah Rating Scale for the retrospective evaluation in adults of attention deficit/hyperactivity disorder in childhood. *Revista de neurologia*, *33*(2), 138–144.

Rubia, K., Overmeyer, S., Taylor, E., Brammer, M., Williams, S. C. R., Simmons, A., ... Bullmore, E. T. (1999). Hypofrontality in attention deficit hyperactivity disorder during higher-order motor control: A study with functional MRI. *American Journal of Psychiatry*, *156*(6), 891–896.

Rubia, K., Overmeyer, S., Taylor, E., Brammer, M., Williams, S. C. R., Simmons, A., ... Bullmore, E. T. (2000). Functional frontalisation with age: Mapping neurodevelopmental trajectories with fMRI. *Neuroscience and Biobehavioral reviews*, *24*(1), 13–19.

Rubia, K., Taylor, E., Smith, A. B., Oksannen, H., Overmeyer, S., & Newman, S. (2001). Neuropsychological analyses of impulsiveness in childhood hyperactivity. *British Journal of Psychiatry*, *179*, 138–143.

Schneider, M. F., Krick, C. M., Retz, W., Hengesch, G., Retz-Junginger, P., Reith, W., Rösler, M. (2010). Impairment of fronto-striatal and parietal cerebral networks correlates with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) psychopathology in adults — A functional magnetic resonance imaging (fMRI) study. *Psychiatry Research : Neuroimaging*, *183*, 75–84.

Shafritz, K. M., Marchione, K. E., Gore, J. C., Shaywitz, S. E., & Shaywitz, B. A. (2004). The effects of methylphenidate on neural systems of attention in attention deficit hyperactivity disorder. *American Journal of Psychiatry*, *161*(11), 1990–1997.

Sheehan, D. V., Lecrubier, Y., Sheehan, K. H., Amorim, P., Janavs, J., Weiller, E., ... Dunbar G. C. (1998). The mini-international neuropsychiatric interview (MINI): The development and validation of a structured diagnostic psychiatric interview for DSM-IV and ICD-10. *Journal of Clinical Psychiatry*, *59*, 22–33.

Smith, A., Taylor, E., Warner-Rogers, J., Newman, S., & Rubia, K. (2002). Evidence for a pure time perception deficit in children with ADHD. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *43*(4), 529–542.

Sonuga-Barke, E. J. S., Saxton, T., & Hall, M. (1998). The role of interval underestimation in hyperactive children's failure to suppress responses over time. *Behavioural Brain Research*, *94*, 45–50.

Sonuga-Barke, E. J. S., Taylor, E., Sembi, S., & Smith, J. (1992). Hyperactivity and delay aversion. I. The effect of delay on choice. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *33*(2), 387–398.

Spencer, T. J., Biederman, J., & Mick, E. (2007). Attention-deficit/hyperactivity disorder: Diagnosis, lifespan, comorbidities, and neurology. *Journal of Pediatric Psychology*, *32*, 631–642.

Stevens, M., Lammertyn, J., Verbruggen, F. & Vandierendonk, A. (2006). Tscope: A C library for programming cognitive experiments on the MS Windows platform. *Behavior Research Methods*, *38*, 280–286.

Teicher, M. H., Anderson, C. M., Polcari, A., Glod, C. A., Maas, L. C., & Renshaw, P. F. (2000). Functional deficits in basal ganglia of children with attention-deficit/hyperactivity disorder shown with functional magnetic resonance imaging relaxometry. *Nature Medicine*, *6*(4), 470–473.

Toplak, M. E., Dockstader, C., & Tannock, R. (2006). Temporal information processing in ADHD: Findings to date and new methods. *Journal of Neuroscience Methods*, *151*, 15–29.

Toplak, M. E., & Tannock, R. (2005). Time perception: Modality and duration effects in attention-deficit-hyperactivity disorder (ADHD). *Journal of Abnormal Child Psychology*, *33*(5), 639–654.

Vaidya, C. J., Austin, G., Kirkorian, G., Ridlehuber, H. W., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (1998). Selective effects of methylphenidate in attention deficit hyperactivity disorder: A functional magnetic resonance study. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *95*(24), 14494–14499.

Valera, E. Spencer, R., Zeffiro, T., Makris, N., Spencer, T. J. Faraone, S., ... Seidman, L. J. (2010). Neural substrates of impaired sensorimotor timing in adult attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biological Psychiatry*, *68*, 359–367.

Wearden, J. H. (1991). Human performance on an analogue of an interval bisection task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *43B*, 59–81.

Wechsler, D. (1997). *WAIS-III administration and scoring manual.* San Antonio, TX: The Psychological Corporation.

Whiterspoon, D., & Allan, L. (1985). Time judgements and the repetition effect in perceptual identification. *Memory & Cognition*, *13*, 101–111.

Wittmann, M., & Paulus, M. P. (2008). Decision making, impulsivity and time perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *12*, 7–12.

Zakay, D. (1989). Subjective and attentional resource allocation: An integrated model of time estimation. In I. Levin, & D. Zakay (Eds.), *Time and human cognition* (pp. 365–397). North-Holland: Elsevier Science Publishers.

Zakay, D., & Block, R. A. (1997). Temporal cognition. *Current Directions in Psychological Sciences*, *6*(1), 12–16.

Zametkin, A. J., Nordahl, T. E., Gross, M., King, A. C., Semple, W. E., Rumsey, J., ... Cohen, R. M. (1990). Cerebral glucose metabolism in adults with hyperactivity of childhood onset. *New England Journal of Medicine*, *323*(20), 1361–1366.

Downloaded by [Aix-Marseille Université], [Laurence Casini] at 08:22 11 October 2013

Discussion générale

Discussion générale

L'objectif de ce travail a été d'étudier le rôle de l'attention dans le contrôle de l'interférence au cours d'une tâche de conflit, la tâche de Simon (Simon, 1969). Pour cela, nous l'avons organisé en deux parties, la première basée sur une approche comportementale dans laquelle nous avons utilisé le paradigme de la double-tâche afin d'évaluer le contrôle de l'interférence en situation de réduction des ressources attentionnelles et une autre partie plus neuropsychologique dans laquelle nous avons étudié les performances de patients présentant un TDAH dans une tâche de Simon mais également dans une tâche de production temporelle, connue pour être très demandeuse en attention. Les résultats obtenus dans chacune des expériences ont été discutés dans chacun des articles précédents, la discussion générale suivante tente davantage de faire un bilan de l'ensemble de ces contributions et de les mettre en perspective avec l'état actuel de nos connaissances.

1. L'attention joue-t-elle un rôle dans le contrôle de l'interférence ?

1.1. Mise en évidence d'une modulation attentionnelle de l'effet d'interférence

L'ensemble des expériences a été réalisé afin de déterminer si les mécanismes de contrôle de l'interférence mis en jeu dans la tâche de Simon étaient sous contrôle cognitif (contrôle « top-down ») et plus précisément dépendaient de l'attention. Pour tenter de répondre à cette question nous avons manipulé spécifiquement les ressources attentionnelles disponibles. Les participants ont effectué la tâche de Simon soit en condition de simple-tâche (ST), soit en condition de double-tâche (DT), c'est-à-dire en concurrence avec une tâche secondaire. Notre hypothèse était la suivante: si les mécanismes responsables du contrôle de l'interférence nécessitent de l'attention, ils devraient être, *a minima*, sensibles aux manipulations attentionnelles (Posner & Snyder, 1975; Shiffrin & Schneider, 1977; Norman & Shallice,

1986) et par conséquent lorsque les ressources disponibles ne sont plus suffisantes parce qu'elles sont partagées entre des tâches concurrentes, l'expression de ce contrôle devrait être altérée.

Les résultats présentés dans la contribution expérimentale 1 nous ont permis de tirer plusieurs conclusions. Premièrement, nous avons observé un allongement des TR en DT par rapport à ST dans les trois expériences, ce qui nous autorise à penser que les ressources attentionnelles ont bien été modulées et donc notre manipulation expérimentale réussie. Deuxièmement et plus pertinent pour notre étude, nous avons mis en évidence une interaction de second ordre Quantile X Condition X Congruence montrant que l'effet de l'attention sur la pente est différent pour les deux conditions simple tâche et double-tâche(expériences 2 et 4), ce qui nous a permis de suggérer que les mécanismes responsables du contrôle de l'interférence seraient sous contrôle attentionnel et donc dépendraient d'un contrôle cognitif de type «top-down». Cette proposition est cohérente avec certains modèles actuels expliquant la disparition de l'effet Simon pour les réponses les plus lentes, par exemple le modèle de « suppression de l'activation » proposé par Ridderinkhof (2002a). Ce modèle, aujourd'hui largement reconnu, apparaît comme une extension du modèle de la double-route. Selon celui-ci, le caractère non pertinent du stimulus (sa position) active, par une route rapide, la réponse ipsilatérale au stimulus, réponse qui doit être supprimée de manière active pour que la réponse requise par le caractère pertinent du stimulus (sa couleur) et activant la route lente puisse être produite. Cette suppression se développerait progressivement au cours du temps. Ainsi, pour les TR les plus courts, la suppression n'aurait pas le temps de se mettre en place mais, en revanche, pour les TR longs ce mécanisme serait efficace et pourrait arrêter l'activation de la réponse incorrecte. Par conséquent, dans les essais compatibles, les TR lents et corrects seraient moins facilités par l'activation automatique et dans les essais incompatibles, les TR lents et corrects seraient moins retardés par celle-ci, ce qui se traduit par une réduction de l'effet Simon plus

importante lorsque les TR sont longs que lorsqu'ils sont courts, effet reflété par la pente négative observée sur les courbes-delta.

Dans la littérature, plusieurs études expérimentales apportent des arguments en faveur du modèle de la suppression active. Par exemple, Burle et collaborateurs (2002) ont étudié la dynamique temporelle de ce mécanisme de suppression en présentant de manière séparée dans le temps et avec un délai variable une information sur la caractéristique non pertinente du stimulus (sa position) et le stimulus (porteur de l'information pertinente, sa couleur). Leur hypothèse était que la suppression du contrôle de l'interférence devrait être plus forte lorsque le délai entre l'indice renseignant sur la position du stimulus et la cible était plus long. Leurs résultats ont montré que la courbe-delta prenait des valeurs négatives indiquant une inversion de l'effet Simon quand l'information non pertinente précédait l'information pertinente avec un délai suffisamment long. Ceci est en faveur d'un ajustement stratégique de la pente de la courbe-delta, et donc soutient l'idée d'un mécanisme de suppression actif. Par ailleurs, plus récemment dans une étude utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, Fortsmann et collaborateurs (2008a, 2008b) ont montré une corrélation positive entre l'activation du cortex frontal inférieur droit et la valeur de la pente négative des courbes-delta, c'est-à-dire que plus la diminution de l'effet de l'interférence pour les TR les plus longs était importante, plus le cortex préfrontal droit été activé, ce qui suggère un rôle de cette structure dans la suppression de l'interférence. On peut trouver également des arguments en faveur de ce modèle dans les études réalisées chez des patients. Wylie et collaborateurs (2010) ont mené une étude chez les patients parkinsoniens connus pour présenter un déficit de l'inhibition motrice. Ils ont observé une pente de la courbe-delta plus positive chez ces patients que chez les sujets contrôles, ce qui est cohérent avec leurs difficultés à inhiber une action. De manière très intéressante, lorsque ces patients étaient stimulés au niveau des noyaux sous-thalamiques (NST), la pente de la courbe-delta devenait plus négative suggérant un rôle de cette structure

dans la modulation de la pente et apportant également des arguments supplémentaires soutenant l'idée que la pente de la courbe-delta serait une bonne mesure de la suppression de l'interférence.

Cependant, nous devons néanmoins souligner qu'un modèle alternatif de la réduction de l'effet Simon pour les TR les plus longs a été proposé par Hommel (1994). Selon ce modèle, la réduction de l'effet Simon au cours du temps résulterait d'un processus de décroissance passive de l'activation automatique de la réponse par la voie rapide plutôt que d'un mécanisme soumis à un contrôle supérieur. On se réfère d'ailleurs souvent à cette hypothèse par l'expression de « modèle de la décroissance spontanée» *(spontaneous decay model)*. L'activation de la réponse inappropriée codée par la position du stimulus diminuerait spontanément avec le temps jusqu'à disparaitre. Nos résultats ne semblent pas aller dans ce sens. En effet, si la pente négative des courbes-deltas reflète un processus d'inactivation spontanée de la réponse déclenchée automatiquement, il n'y a pas de raison de penser qu'elles puissent être modulées par une manipulation attentionnelle.

Néanmoins, il reste possible qu'une décroissance spontanée atténue l'effet d'interférence pour les TR longs, mais elle ne peut pas expliquer à elle seule que l'effet Simon s'inverse dans certaines situations (quand la courbe-delta prend des valeurs négatives). On peut cependant envisager que ces deux processus coexistent comme l'ont proposé récemment Hubner et collaborateurs (2013) dans deux expériences dans lesquelles ils ont manipulé le délai entre un indice spatial et l'apparition de la cible soit de manière bloquée, soit de manière randomisée. Leurs résultats ont montré que l'effet du caractère non pertinent du stimulus (sa position) pouvait être contrôlé de manière stratégique selon les demandes de la tâche. Selon eux, lorsque la suppression active de la réponse déclenchée par la route rapide ne pouvait pas être mise en place pour des raisons stratégiques, alors la décroissance spontanée de l'activation de cette réponse pouvait prendre le relais ce qui se manifestait par une décroissance de la pente

de la courbe-delta. Ces résultats suggèrent que l'inhibition s'ajuste stratégiquement selon la demande contextuelle ; c'est-à-dire seulement quant cela est nécessaire.

1.2. Que nous apprennent les manipulations attentionnelles sur la nature des mécanismes responsables de la décroissance de l'effet Simon ?

Un autre résultat intéressant que nous avons également obtenu dans notre première contribution expérimentale est que la suppression de l'effet Simon pour les TR les plus longs n'a pas été obtenue avec toutes les tâches secondaires. En effet, lorsque celle-ci était une tâche de production de durées, les delta-plots ont révélé une diminution de leur pente en ST comme en DT. Ce résultat nous a donc amené à poser l'hypothèse que la modulation de l'effet de l'interférence par l'attention, si elle semble bien exister, pourrait néanmoins être sous la dépendance de ressources attentionnelles spécifiques.

Cette idée est en ligne avec l'hypothèse des ressources multiples (Wickens, 1983) selon laquelle il existerait plusieurs réservoirs attentionnels dont les ressources seraient spécifiquement dédiées à un type de processus particulier et un conflit aurait lieu uniquement en cas de concurrence pour les ressources d'un même réservoir. Wickens a proposé qu'il existerait au moins trois réservoirs : un pour la modalité d'entrée (par exemple, auditif *versus* visuel) un pour la modalité de sortie (par exemple, vocal *versus* manuel) et un pour le code central (par exemple, spatial *versus* verbal). Si l'on applique cette proposition à notre étude, l'on peut noter que la suppression de l'activation de la voie directe n'a pas eu lieu lorsque la tâche secondaire était une tâche de poursuite visuo-motrice (expériences 2 et 4). Or cette tâche sollicitait les mêmes ressources attentionnelles que la tâche de Simon pour la modalité d'entrée (visuelle), pour la modalité de sortie (sortie motrice segmentaire), et pour le code central (code spatial). Cependant, la suppression a eu lieu lorsque la tâche secondaire était une

tâche de production de durées (expérience 1) qui impliquait également une entrée sensorielle visuelle et une sortie motrice segmentaire, mais pas de code central spatial. On pourrait donc penser que le point critique ici serait celui du code central, mais il est à noter que si la tâche de production de durées partageait effectivement bien les mêmes ressources attentionnelles pour les modalités d'entrée et de sortie que la tâche de Simon, on peut noter néanmoins deux différences majeures entre les deux tâches: premièrement, dans la tâche temporelle, le stimulus visuel n'est pas porteur d'informations comme c'est le cas pour la tâche de Simon et deuxièmement, la réponse motrice ne demande pas de choix entre plusieurs effecteurs comme c'est également le cas dans la tâche de Simon. Par conséquent, interpréter nos données dans le cadre du modèle proposé par Wickens peut rester un peu trop limité.

D'autres modèles sont peut-être plus pertinents à ce titre. Dans les modèles de « cross talk », (Navon, 1984; Navon et Miller, 1987 ; Hazeltine & Wifall., 2011 Shumacher et al., 2011) il est proposé que l'interférence puisse se produire non seulement quand il y a un chevauchement explicite entre les stimuli et les réponses spécifiques pour les deux tâches, mais aussi quand il existe un lien commun entre les modalités d'entrée et de sortie. Dans notre étude, on observe que la suppression n'a pas eu lieu dans les expériences 2 et 4 lorsque la tâche secondaire de poursuite visuo-motrice impliquait un lien fort entre le stimulus visuel en entrée et la réponse motrice en sortie, comme c'est le cas pour la tâche de Simon. Ceci pourrait donc être un point pertinent à prendre en compte et à approfondir pour mieux comprendre les caractéristiques nécessaires de la tâche secondaire pour qu'elle empêche la suppression de la réponse automatique activée par la voie directe.

Enfin, un autre point commun important entre la tâche de poursuite visuo-motrice et la tâche de Simon est que les stimuli contiennent un code spatial, ce qui n'est pas le cas dans la tâche temporelle.

En conséquence, à partir de nos résultats, nous pourrions proposer que le mécanisme de

suppression doive partager les mêmes ressources attentionnelles que celles utilisés pour lier le stimulus et la réponse dans la tâche de Simon. Il serait intéressant d'étudier de manière plus détaillée cette hypothèse.

En outre, ces résultats soutiennent l'idée de l'existence d'un mécanisme de supervision qui module la mise en jeu des différents processus cognitifs. L'existence d'un tel mécanisme a déjà été proposé par différents auteurs, il renvoie, par exemple, à la notion de système superviseur attentionnel mentionné par Norman & Shallice (1986) ou à celle de système central exécutif qui intègre non seulement des processus attentionnels mais aussi la mémoire de travail (Baddeley, 1996).

2. Que nous apprennent les patients avec un TDA/H sur le contrôle de l'interférence ?

Notre travail avait pour but de comprendre le rôle de l'attention dans le contrôle de l'interférence. Après avoir étudié cette question en utilisant le paradigme de la double-tâche, il nous a semblé également opportun d'étudier ces processus dans une population défaillante d'un point de vue attentionnel, les personnes adultes avec un TDA/H. Dans la deuxième partie expérimentale, nous avons donc étudié le contrôle de l'interférence dans la tâche de Simon chez ces patients. Notre hypothèse était que si le contrôle de l'interférence dépend de l'attention, les capacités attentionnelles étant défaillantes dans cette population, l'expression de ce contrôle devrait être altérée.

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, les patients TDA/H sont également caractérisés par des symptômes d'impulsivité. Ces symptômes ont d'ailleurs été à l'origine des modèles les plus souvent proposés pour expliquer le TDAH, notamment celui des fonctions exécutives proposé par Barkley (1997). Par conséquent, dans notre étude, nous avons essayé d'étudier de manière séparée deux processus mis en jeu dans la tâche de Simon et qui pourraient être reliés

à l'impulsivité. Un sujet impulsif pourrait être soit plus sensible à la présence de l'information spatiale non pertinente et ainsi activer plus facilement la route rapide, soit moins capable d'inhiber l'activation automatique de la réponse contrôlée par cette route. Pour cela, nous avons utilisé des outils spécifiques que nous avons présentés dans le chapitre 1 et qui sont : 1/ les analyses de distribution des erreurs (CAF) et des activations incorrectes (CIAF) pour évaluer la sensibilité des sujets au déclenchement automatique de la réponse par la position du stimulus et 2/ la pente de la courbe-delta et le taux de correction pour étudier la suppression de l'activation automatique.

2.1. Un défaut du contrôle de l'interférence sans impulsivité

Tout d'abord dans notre étude (contribution expérimentale 2), nous avons observé que l'effet Simon était plus large chez les patients avec un TDA/H comparé aux sujets contrôles. Ce résultat est cohérent avec d'autres études rapportant la même chose dans des tâches de conflit chez les patients adultes avec un TDA/H (Soutschek et al., 2013; Bush et al., 1999; King et al., 2007; Lundervold et al., 2011; Walker et al., 2000). Par conséquent, si nous nous arrêtons à ces résultats, comme le font la plupart des autres études, notre conclusion devrait être que ces patients présentent un déficit du contrôle de l'interférence et donc par extension un déficit d'impulsivité. Mais c'est là que les outils que nous avons utilisés démontrent toute leur utilité et leur finesse.

Premièrement, les deux indices que nous avons utilisés pour étudier la suppression de la réponse automatique (pente des courbe-delta et taux de correction) vont dans le même sens et montrent que ce mécanisme n'est pas défaillant chez les patients avec un TDAH. En effet, les analyses de distribution des TR et plus spécifiquement les courbes-delta montrent que l'effet Simon diminue pour les TR les plus longs chez les patients avec un TDA/H comme chez les

sujets contrôles. De plus, les taux de correction calculés grâce aux erreurs partielles (ou ébauches d'erreur), ne montrent pas de différence entre les deux groupes de sujets adultes. Dans le cadre du modèle de suppression de l'activation (Ridderinkhof, 2002a), ces résultats suggèrent que la capacité à supprimer l'activation automatique de la réponse inappropriée par la route rapide n'est pas affectée chez les patients adultes avec un TDA/H. Ces résultats qui ne vont pas dans le sens d'un déficit du contrôle de l'inhibition sont néanmoins cohérents avec une étude récente de Soutschek et collaborateurs (2013) dans laquelle les auteurs évaluent le contrôle de l'interférence dans une tâche de Stroop chez les adultes avec un TDA/H en utilisant aussi les analyses de distribution. Les auteurs ont rapporté un effet d'interférence plus large chez les patients adultes avec un TDA/H, mais cet effet diminue pour les TR les plus longs. Ceci suggère que les mécanismes responsables du contrôle de l'interférence restent efficaces chez ces sujets.

Il est à noter que ces deux indices vont dans le même sens, il est donc probable que le mécanisme de suppression mis en évidence par la pente négative de la courbe-delta soit similaire, au moins en partie, à celui sous-jacent au taux de correction. Cette idée est cohérente avec celle proposée par Burle (2002) selon laquelle les ébauches seraient un corrélat physiologique de la suppression observée sur les courbes-deltas.

Deuxièmement, l'analyse de distribution des erreurs, que l'on y intègre (CIAF) ou non (CAF) les ébauches d'erreurs, ne montre pas de différence entre nos groupes sur les pourcentages d'erreurs ou d'activations incorrectes rapides. Ce résultat va dans le même sens que l'absence d'effet sur le nombre total des activations incorrectes et suggère que l'expression de l'activation automatique de la réponse inappropriée n'est pas affectée chez les patients adultes avec un TDA/H. L'effet Simon plus large observé chez les adultes avec un TDAH ne semble donc pas dû non plus au fait que ces sujets seraient plus susceptibles que les adultes contrôles de déclencher une réponse automatique.

L'ensemble de ces résultats converge vers l'idée que ni l'expression de l'activation par la route rapide, ni la suppression de cette activation n'est à l'origine d'un effet Simon plus important chez les patients adultes avec un TDA/H. La question est alors de savoir à quoi est dû cet effet. N'oublions pas, à ce titre, qu'un résultat intéressant de cette étude est que les TR des patients avec un TDA/H étaient plus longs que ceux des sujets contrôles alors que le taux d'erreurs était le même. Ceci suggère donc que ce ralentissement n'est pas dû au fait que les patients avec un TDA/H auraient choisi de faire moins d'erreurs mais bien au fait qu'ils sont plus lents. Le ralentissement semble être une caractéristique fréquemment retrouvée chez les adultes avec un TDA/H (par exemple, Alderson et al., 2007; Epstein et al., 2011; Castellanos et al., 2005). Il nous semble donc possible que l'effet Simon plus important que nous avons observé chez nos patients ne soit pas dû à un déficit du contrôle de l'interférence *per se* comme proposé dans de nombreuses études (Shubert et al., 2013; Bush et al., 1999; King et al., 2007; Lundervold et al., 2011; Walker et al., 2000) mais soit plutôt le sous-produit d'un ralentissement cognitif général. La question à laquelle nous devons alors répondre est de savoir à quoi est dû ce ralentissement.

2.2. Un défaut de vigilance à l'origine d'un effet d'interférence plus grand

L'analyse des indices chronométriques nous apporte quelques réponses. Premièrement, le temps moteur (TM) n'est pas différent entre les groupes ce qui élimine l'idée que les adultes avec un TDA/H puissent être ralentis au niveau de l'exécution. Deuxièmement, le temps prémoteur (TPM) et la latence des activations incorrectes (LAI) sont plus longs pour les adultes avec un TDA/H, ce qui suggère que le ralentissement chez ces patients concerne des étapes perceptives ou centrales. En conséquence, il est probable que toutes les étapes de traitement du stimulus soient globalement retardées entraînant alors un déficit du contrôle de

l'interférence. Ceci pourrait être dû à un dysfonctionnement de certains processus de type vigilance ou attention soutenue, ou encore motivation. Si le niveau de vigilance est plus faible chez ces patients, ils pourraient avoir plus de difficultés à détecter rapidement les stimuli et tous les processus qui en découlent seraient alors retardés d'autant.

Cette hypothèse d'un déficit de la vigilance est soutenue, d'une part, par les résultats des analyses de corrélation entre les indices de la tâche de Simon et la tâche de CPT qui révèlent que les sujets les plus lents sont également ceux qui ont les performances les plus faibles dans ce test d'attention soutenue, mais d'autre part, on peut également rapprocher ces résultats de ceux obtenus dans la tâche de bissection temporelle (contribution expérimentale 3). Dans celle-ci, les adultes avec un TDA/H montrent une plus grande variabilité dans leurs jugements perceptifs catégoriels que les sujets contrôles. Or dans le cadre du modèle de l'horloge interne, un des modèles prédominants en psychologie du temps, cette augmentation de la variabilité est fréquemment interprétée comme ayant une origine attentionnelle, de type vigilance. Différentes études ont montré que l'augmentation de la variabilité peut être le résultat d'un défaut du fonctionnement de l'interrupteur à cause d'une baisse de l'attention soutenue ou de la vigilance (Allan, 1992; Droit-Volet, 2003; Whiterspoon et Allan, 1985). Ceci confirme donc l'idée d'une baisse de vigilance chez les sujets avec un TDA/H.

Donc, en conclusion que nous apprennent ces études réalisées chez des patients avec un TDA/H sur le contrôle de l'interférence ?

Premièrement, nous concluons qu'on peut observer un effet d'interférence aggravé sans avoir un déficit d'impulsivité ou d'inhibition, deuxièmement, que celui-ci peut être dû à un défaut de vigilance, et troisièmement, que la vigilance n'affecte ni le déclenchement automatique de la réponse, ni l'inhibition, bien que l'inhibition soit modulée par l'attention sélective comme nous l'a montré la contribution expérimentale 1.

Enfin, d'un point de vue méthodologique ces résultats soulignent l'importance de l'utilisation

de méthodes plus sophistiquées que les simples indices de tendance centrale tels que la moyenne et le taux d'erreur. Des conclusions erronées risquent d'être tirées sur le contrôle de l'interférence simplement en regardant l'effet Simon. Or comme nous l'avons vu, plusieurs processus contribuent de manière indépendante à ce contrôle et il est important de pouvoir les dissocier.

3. Que nous apprennent ces études sur le TDA/H?

Dans l'état actuel de nos connaissances, les déficits présentés par les patients adultes avec un TDA/H dans diverses tâches cognitives restent encore méconnus et très controversés. A la différence de chez les enfants, les manifestations du TDA/H ont été peu étudiées chez l'adulte. Il semblerait néanmoins qu'elles soient différentes de celles rapportées chez l'enfant (Bange & Mouren, 2009 ; Hart et al., 1995), de même que les aires cérébrales dont le taux d'activité serait affecté en lien avec le TDAH (pour revue, voir Cortese, 2012).Cet ensemble de faits suggère que les mécanismes défaillants chez l'adulte ne sont pas les mêmes que ceux rapportés chez l'enfant.

3.1. Contrôle de l'interférence et TDA/H

En ce qui concerne le contrôle de l'interférence chez l'adulte, les résultats expérimentaux de la contribution 2, nous permettent de confirmer un déficit dans ce contrôle puisque les sujets avec un TDA/H ont obtenu un effet Simon plus large. En outre, si on l'inscrit dans le modèle de la suppression de l'activation (Ridderinkhoff, 2002a), notre travail a permis d'étudier plus en détails certains processus mis en jeu dans ce contrôle de l'interférence et nos résultats suggèrent que les adultes avec un TDA/H ne présentent ni une sensibilité plus importante au déclenchement automatique de la réponse par la route rapide, ni un déficit de la capacité à

supprimer cette activation. Compte tenu des symptômes impulsifs manifestés chez l'adulte avec un TDA/H, nos résultats peuvent paraître contre-intuitifs, ils sont pourtant cohérents avec ceux obtenus dans d'autres études testant le contrôle de l'interférence (Shubert et al.2013; Bush et al., 1999; King et al., 2007; Lundervold et al., 2011; Walker et al., 2000 Boonstra et al., 2005 ;Willcutt et al., 2005) ; Soutschek et al., 2013) .

Comme mentionné dans la partie précédente, le défaut du contrôle d'interférence observé chez nos patients seraient plutôt dû à une baisse de la vigilance ou de la motivation, affectant la capacité de nos sujets à réagir face aux changements de l'environnement. Ceci aurait pour conséquence des difficultés à détecter rapidement les stimuli et ainsi un ralentissement des processus mis en jeu dans le traitement de l'information, ralentissement à l'origine de l'effet Simon plus important observé chez les adultes avec un TDA/H.

Il est à noter cependant que nos travaux ne remettent pas en cause les déficits d'inhibition rapportés chez l'enfant (Ridderinkhof et al., 2005). Mais il est possible que les symptômes d'impulsivité présents chez l'enfant aient été en partie surmontés chez l'adulte. Cette idée est cohérente avec les études qui montrent que les aires cérébrales associées au contrôle cognitif peuvent être modulées de manière différente chez l'enfant et l'adulte (Cortese, 2012). En outre, il est à noter que les adultes qui ont participé à nos études n'étaient pas sous médication, ce qui signifie que même s'ils présentaient les symptômes du TDA/H, ils étaient capables de vivre de manière suffisamment satisfaisante pour ne pas avoir besoin de médicaments. Ils ont donc très vraisemblablement développé des stratégies compensatrices importantes.

3.2. Attention et TDA/H

En ce qui concerne le déficit attentionnel associé au TDA/H, la contribution expérimentale 3 est plus particulièrement intéressante. Les adultes avec un TDA/H ont montré une variabilité

perceptive catégorielle plus importante que les sujets contrôles lors de la réalisation d'une tache de bissection temporelle. Cette variabilité perceptive est classiquement interprétée dans le cadre du modèle de l'horloge interne comme un déficit de la vigilance ou attention soutenue (Allan, 1992; Droit-Volet, 2003; Whiterspoon et Allan, 1985). Par ailleurs, les données issues de cette même contribution expérimentale ne sont pas en faveur d'un déficit de l'attention sélective chez les adultes avec un TDA/H. En effet, en psychologie du temps de nombreuses études ont montré qu'un déficit de l'attention sélective se traduit par une sous-estimation temporelle (Brown, 1997; Burle et Casini, 2001; Casini & Macar, 1997 ; Zakay, 1989) et non par une surestimation comme observé dans notre étude. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Polak et collaborateurs (2009) qui ont montré que la présence d'un élément distracteur n'avait pas d'incidence sur les jugements temporels d'adultes avec un TDA/H ; en revanche ils s'opposent aux données recueillies par Barkley et collègues dans une étude explorant les capacités temporelles chez les enfants avec un TDA/H (Barkley et al., 1997). Il est possible que les adultes compensent certains déficits attentionnels. Prox et collaborateurs (2007) ont étudié les potentiels évoqués qui reflètent le traitement attentionnel chez les adultes atteints de TDA/H. Leurs données suggèrent que ceux-ci apprennent à rassembler leur attention plus fortement que les adultes contrôles afin d'atteindre les mêmes résultats et ainsi compenser leurs déficits.

Un dernier résultat instructif a été obtenu dans cette expérience de bissection temporelle. Le déplacement du point d'égalité subjective vers la gauche chez les sujets avec un TDA/H par rapport aux sujets contrôles a montré que ces patients surestimaient les durées aussi bien dans la modalité visuelle que dans la modalité auditive. Ce résultat peut s'interpréter par un déficit de la mémoire de référence. Dans les tâches de bissection temporelle, il est fait l'hypothèse, qu'à chaque essai, les sujets comparent la durée de l'essai en cours stockée dans la mémoire de travail avec les représentations des durées modèles stockées antérieurement lors de

l'entraînement dans la mémoire de référence. Si la mémoire de référence est plus fragile chez les patients, il va s'en suivre que la représentation de la durée stockée en mémoire de référence va être associée à un nombre d'impulsions plus petit. Ainsi, à chaque comparaison, le sujet aura l'impression que la durée présentée est plus longue que celle stockée en mémoire de référence, ce qui entraînera une surestimation. Cette hypothèse est bien sûr à approfondir avec d'autres protocoles temporels.

Ainsi, les données issues de la contribution expérimentale 3 ont non seulement permis de suggérer que les adultes avec un TDA/H ne présentaient pas de trouble de l'attention sélective, au moins dans le domaine temporel, mais ils ont également permis de proposer que ces patients présentaient très certainement un déficit de la vigilance ou de l'attention soutenue ou encore un déficit de la mémoire de référence.

En conclusion, les modèles cognitifs que nous avons utilisés pour interpréter nos données, que ce soit dans le domaine du traitement de l'information ou de la psychologie du temps, semblent fournir un cadre intéressant pour comprendre les déficits présents chez les adultes avec un TDA/H. Néanmoins nos résultats peuvent tout à fait soutenir d'autres modèles explicatifs du TDA/H, comme par exemple le modèle « cognitif-énergétique » proposé par Sergeant (Sergeant, 2000) ou celui du dysfonctionnement motivationnel proposé par Sonuka-Barke (Sonuka- Barke, 2003).

Enfin, nous sommes conscients que la présence ou l'absence d'un effet n'est pas une preuve suffisante pour conclure sur la présence ou l'absence d'un déficit et d'autres études restent nécessaires pour approfondir nos hypothèses. Bien des points restent à étudier, et notamment travailler en tenant compte des sous-types de patients pourrait être très utile, de même que des comparaisons plus contrôlées entre enfants et adultes.

Perspectives et projets

Suite à l'ensemble du travail réalisé, plusieurs hypothèses ont été proposées qu'il nous semble intéressant d'approfondir. Nous souhaitons poursuivre notre travail dans deux directions, d'une part nous souhaitons approfondir notre compréhension des mécanismes mis en jeu dans le contrôle de l'interférence, d'autre part, nous aimerions également faire progresser nos connaissances en ce qui concerne le TDAH.

1. Le contrôle de l'interférence.

1.1. La nature des ressources attentionnelles sollicitées lors du mécanisme de suppression de l'activation

Dans notre étude, nous avons observé que la suppression de l'activation n'avait pas eu lieu lorsque la tâche secondaire était une tâche de poursuite visuo-motrice alors qu'elle n'était pas perturbée quand la tâche concurrente était une production de durées. Ceci a amenés à deux conclusions : 1/ la suppression de l'activation dépendrait de ressources attentionnelles spécifiques et 2/ varier la nature de la tâche secondaire pourrait nous apporter des informations sur la nature des ressources attentionnelles impliquées. Nous positionnant dans le cadre des modèles de l'interférence en double-tâche de type « crosstalk » (Navon, 1984; Navon et Miller, 1987 ; Hazeltine & Wifall, 2011; Shumacher et al., 2011), selon lesquels l'interférence serait liée à l'activation simultanée des liens spécifiques entre les modalités d'entrée et de sortie, nous avons fait l'hypothèse que la nature de l'association entre le stimulus et la réponse pouvait être un des facteurs clés.

Nous pourrions donc envisager de reprendre le protocole de la double-tâche en gardant la même association visuo-motrice pour la tâche de Simon mais en variant les associations entre stimulus et réponse pour la tâche de poursuite : visuo-vocale ou auditive-motrice. Si notre hypothèse s'avère exacte, nous devrions observer la mise en place de la réduction de

l'interférence pour les TR les plus longs en simple comme en double-tâche puisque les liens visuo-vocal et auditif-moteur mis en jeu dans les tâches secondaires secondaires ne devraient pas interférer avec le lien visuo-manuel de la tâche de Simon.

1.2. Manipulation de la quantité de ressources attentionnelles et contrôle de l'interférence

Les résultats que nous avons obtenus dans la première contribution expérimentale ont apporté quelques arguments en faveur de l'idée que les mécanismes de suppression de la réponse activée par la voie rapide ont besoin d'attention pour se mettre en place. Pour apporter des arguments plus directs en faveur de cette hypothèse, il serait intéressant d'utiliser une méthode de répartition de l'attention sur la base de consignes explicites. Cette méthode consiste à donner aux sujets une consigne précise de la quantité d'attention allouée à chacune des deux tâches (par exemple, 100 % tâche 1 - 0% tâche 2; 80% tâche 1 - 20% tâche 2; 50% tâche 1 - 50% tâche 2; 20% tâche 1 - 80% tâche 2; 0% tâche 1 - 100% tâche 2). On pourrait reprendre la double-tâche de poursuite visuo-manuelle et tâche de Simon et simplement modifier la consigne donnée aux participants selon les blocs d'essai ou d'essai en essai. Notre prédiction est que cette modulation attentionnelle devrait avoir un effet sur le dernier segment de la pente de la courbe-delta : lorsque moins d'attention serait accordée à la tâche de poursuite visuo-manuelle, la pente de la courbe-delta devrait être plus marquée.

1.3. L'attention est-elle nécessaire aux processus d'inhibition de manière plus générale ?

Nous avons montré dans cette thèse que l'attention est nécessaire pour la mise en place d'un mécanisme spécifique d'inhibition de la réponse activée automatiquement par la position du stimulus, comme c'est le cas dans la tâche de Simon. Il serait intéressant maintenant de savoir

si ce rôle de l'attention peut être généralisé à d'autres processus d'inhibition motrice, comme par exemple ceux engagés dans la tâche de Stop.

Pour répondre à cette question, nous pourrions envisager l'utilisation d'un paradigme de double- tâche similaire à celui utilisé dans le cadre de cette thèse mais en remplaçant la tâche de Simon par une tâche de Stop.

2. Le Trouble déficitaire d'attention et hyperactivité (TDA/H)

2.1. Rôle de la dopamine dans l'estimation du temps chez le TDA/H.

Le modèle de l'horloge interne nous a offert un cadre très intéressant pour comprendre les déficits temporels chez l'adulte avec un TDA/H et mieux cerner le type de déficits attentionnels de ces patients. Il serait intéressant maintenant d'aborder cette question d'un point de vue plus neurobiologique. Nombre d'études en psychologie du temps ont mis en évidence un rôle de la dopamine dans les processus de jugements temporels (pour revue, voir Coull et al., 2011). Or comme nous l'avons vu dans l'introduction, le système dopaminergique semble défaillant chez les patients avec un TDA/H. Cette défaillance serait partiellement corrigée lors de la prise de méthyphénidate. Aussi, il nous semble pertinent d'envisager l'étude des performances temporelles de patients adultes avec un TDA/H sous traitement régulier selon qu'ils sont ON ou OFF médication.

2.2. Etude du contrôle de l'interférence chez l'enfant TDA/H

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, il semble y avoir des différences entre les manifestations associées au TDA/H chez les enfants et chez l'adulte. Par exemple, l'étude de Ridderinkhof et collaborateurs (2004) étudiant le contrôle de l'interférence dans une tâche d'Eriksen a montré que les enfants avec un TDA/H avaient un problème d'inhibition (qui

serait surmonté avec la prise de méthylphenidate). Nous n'avons pas mis en évidence ce problème d'inhibition chez les adultes même en utilisant des méthodes d'analyse permettant de dissocier de manière encore plus fine que les analyses de distribution utilisées par Ridderinkhof et collègues les mécanismes d'activation de la réponse automatique de ceux de suppression de celle-ci. Nous proposons donc d'étudier les performances d'enfants avec un TDA/H dans la tâche de Simon couplée aux analyses de distribution et aux enregistrements électromyographiques pour analyser les ébauches d'erreur. De plus, il serait intéressant aussi de réaliser cette étude en tenant compte des différents sous-types de TDA/H.

2.3 Le déficit de vigilance chez les adultes avec un TDA/H affecte-t-il la capacité à détecter ou le critère de décision ?

Nous avons proposé dans nos études réalisées avec les patients que les adultes avec un TDA/H auraient un déficit de l'attention soutenue ou vigilance. Dans l'expérience étudiant la tâche de Simon, nous avons conclu que si le niveau de vigilance était plus faible chez ces patients, cela pourrait entraîner des difficultés à détecter rapidement les stimuli et donc retarder tous les processus qui en découlent. Pour vérifier que le défaut de vigilance soit à l'origine d'un déficit de détection, il serait intéressant d'utiliser la détection du signal (TDS).

La TDS est un modèle statistique du traitement de l'information perceptive qui permet d'évaluer séparément les composantes sensorielles et décisionnelles contenues dans la réponse du sujet. En d'autres termes, elle fournit des indices (d') et (β), caractérisant respectivement la phase d'encodage de l'information et la phase décisionnelle. Le postulat de base est que tout message sensoriel résultant d'une observation se décompose en deux quantités indépendantes: le signal et le bruit. Dans une tâche de détection ou discrimination le sujet est soumis à une séries de présentations aléatoires d'un signal superposé à du bruit (S+B) et du bruit seul (B).

L'indice (d') définit la sensibilité du sujet à la tâche, il peut être considéré comme un indicateur de la difficulté de jugement sensoriel, dans le sens où il augmente quand les deux distributions s'écartent et donc que la zone de recouvrement est faible, c'est-à-dire quand le jugement est facile, et il diminue quand les discriminations deviennent plus difficiles, cas où les deux distributions sont proches et alors présentent une zone de recouvrement importante. Si notre prédiction est exacte, les sujets adultes avec un TDA/H devraient montrer une réduction de (d') et pas ou peu de variation de (β), par rapport aux sujets contrôles, confirmant bien un déficit dans la détection du stimulus.

3. Généralisation des outils utilisés à d'autres pathologies du contrôle cognitif

Comme nous l'avons vu dans le cadre de cette thèse, les différentes mesures utilisées et le modèle cognitif de la suppression de l'activation nous ont offert un cadre très intéressant pour mieux comprendre les mécanismes mis en jeu dans le contrôle de l'interférence et également pour affiner notre compréhension des déficits associés au TDA/H chez l'adulte. En effet, les adultes avec un TDA/H peuvent avoir un effet d'interférence plus important et un ralentissement général dans une tâche de Simon sans nécessairement avoir un problème d'activation automatique de la réponse ou d'inhibition, pourtant dans la littérature du TDA/H, un déficit de l'interférence a été à plusieurs reprises interprété comme un déficit de l'inhibition. Or comme nous l'avons montré dans notre travail, des outils plus fins peuvent nous aider à mieux comprendre la nature de ces déficits. Il pourrait alors être intéressant d'utiliser ces mêmes outils pour mieux comprendre les déficits cognitifs dans d'autres pathologies. Récemment, l'utilisation de ces outils chez des patients parkinsonien engagés dans une tâche de Simon a permis de dissocier un déficit de l'inhibition de celui de la sensibilité à la capture automatique. Cette piste doit être poursuivie et approfondie.

Bibliographie

Allain, S., Burle, B., Hasbroucq, T., and Vidal, F. (2009). Sequential adjustments before and after partial errors. *Psychon. Bull. Rev*. 16, 356–362.

Andersen, R.A. (1989).Visual and eye movement functions of the posterior parietal cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 12,377-403.

Allan, L. (1992). The internal clock revisited. In F. Macar, V. Pouthas, & W. Friedman (Eds.), *Time, action, and cognition: Towards bridging the gap* (pp. 191–202). Dordrecht

Allain, S., Carbonnell, L., Burle, B., Hasbroucq, T., & Vidal, F. (2004) On-line executive control: an electromyographic study. *Psychophysiology*, 41(1), 113-116.

American Psychiatric Association. (1968). Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders. SecondEdition (DSM-II).Washington DC. Traduction française: Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux. Paris: Masson, 1968.

American Psychiatric Association. (1980). Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders. Third Edition (DSM-III).Washington DC. Traduction française: Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux. Paris: *Masson*, 1980.

American Psychiatric Association. (1987). Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders. Third Edition Revised (DSM-III-R).Washington DC. Traduction française: Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux. Paris: *Masson*, 1987.

American Psychiatric Association. (1994). Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders. Forth Edition (DSM-IV).Washington DC. Traduction française: Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux. Paris: *Masson*, 1996.

American Psychiatric Association. (2000). Diagnostic and statistical manual of mental disorders. Forth Edition Revised (DSM IV-TR). Washington DC. Traduction française: Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux. Paris: *Masson*, 2004.

Alderson, R.M., Rapport, M.D., & Kofler, M.J. (2007). Attention-deficit/hyperactivity disorder and behavioural inhibition: A meta-analytic review of the stop-signal paradigm. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 35, 745–758.

Baddeley, A., & Delia Sala, D. (1996).Working memory and executive control. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Series B, 351, 1397-1404

Bange, F., & Mouren, M.C. (2009). Comprendre et soigner l'hyperactivité chez l'adulte. Paris: *Dunod*.

Barkley, R.A. (1997). Behavioral Inhibition, Sustained Attention , and Executive Functions: Constructing a Unifying Theory of ADHD. *Psychological Bulletin*, 121, 65-94.

Barkley, R. A., Grodzinsky, G., & DuPaul, G. J. (1992). Frontal lobe functions in attention deficit disorder with and without hyperactivity: a review and research report. *Journal of abnormal child psychology*, *20*(2), 163–188.

Berquin, P.C., Giedd, J.N., Jacobsen L.K., Hamburger S.D. ,Krain, A.L. , Rapoport, J.L., Castellanos, F.X. (1998): Cerebellum in attention-deficit hyperactivity disorder: Amorphometric MRI study. *Neurology*. 50:1087–1093.

Biederman, J., Faraone, S.V., Weber, W., Russell, R., Rater, M., & Park, K. (1997).Correspondence between DSM-III-R and DSM-IV attention-deficit hyperactivity disorder. Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry, 36, 1682-1687

Booth, J.E., Carlson, C.L., Tucker, D.M., (2007). Performance on a neurocognitive measure of alerting differentiates ADHD combined and inattentive subtypes: A preliminary report .*Archives of Clinical Neuropsychology*, 22,423-432

Boonstra, A.M., Oosterlaan, J., Sergeant, J.A., & Buitelaar, J.K. (2005). Executive functioning in adult ADHD: a meta-analytic review. *PSYCHOLOGICAL MEDICINE-LONDON-*, *35*(8), 1097.

Botvinick, M.M., Braver, T.S., Barch, D.M., Carter, C.S., & Cohen, J.D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108(3), 624-652

Boulanger, C. (1892). Contribution à l'étude de l'instabilité mentale (Henri Jouve ed.).

Bourneville, D.M. (1897). Le traitement médico-pédagogique des différentes formes de L'idiotie. Paris: *Alcan*.

Broadbent, D. (1958). Perception and communication. London: Pergamon Press.

Brodeur, D., & Pond, M. (2001).The development of selective attention in children with attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 20, 163-188.

Brown, S.W. (1997). Attentional resources in timing: Interference effects in concurrent temporal and non temporal working memory tasks. *Perception and Psychophysics, 59(7),* 1118-1140.

Buhusi, C.V., Meck, W.H., 2005. What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nat. Rev. Neurosci*. (6), 755–765.Carrol, C.A., Boggs, J., O'Donnell, B.F., Shekhar, A., Hetrick, W.P

Burle, B., & Bonnet, M. (1999). What's an internal clock for? From temporal information processing to temporal processing of information. *Behavioural Processes*, 45, 59-72.

Burle, B., & Casini, L. (2001). Dissociation between activation and attention effects in time estimation : Implications for internal clock models. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 27(1),* 195-205.

Burle, B., Possamaï, C. A., Vidal, F., Bonnet, M., and Hasbroucq, T. (2002). Executive control in the Simon effect: an electromyographic and distributional analysis. *Psychological Research*. 66, 324–336

Bush, G., Frazier, J.A., Rauch, S.L., Seidman, L.J., Whalen, P.J., Jenike, M.A., (1999) Anterior cingulate cortex dysfunction in attention-deficit/hyperactivity disorder revealed by fMRI and the counting Stroop. *Biological Psychiatry*.45:1542–52.

Cantwell, D.P. Attention deficit dissorder : A review of the past 10 years. (1996) *J AmAcad Child Adolesc Psychiatry*, 35: 978-987

Casini, L., & Macar, F. (1997). Effects of attention manipulation on perceived duration and intensity in the visual modality. *Memory and Cognition, 25*, 812-818.

Castellanos, F.X., & Tannock, R. (2002). Neuroscience of attention-deficit/hyperactivity disorder: the search for endophenotypes. *Nature*, 3,617-628.

Castellanos, F.X., Giedd, J. N., Berquin, P.C., Walter, J.M., Sharp, W., Tran, T., Vaituzis, A.C., Blumenthal, J.D., Nelson, J., & Bastain, T. M. (2001). Quantitative brain magnetic resonance imaging in girls with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Archives of General Psychiatry*, 58(3), 289.

Cepeda, N.J., Cepeda, M.L., Kramer, A.F. (2000). Task switching and attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 28,213-226.

Cherry, E.C. (1953). Some experiments on the recognition of speech with one and with two ears. *Journal of acoustical Society of America*, 25, 975-979.

Castellanos, F.X., Sonuga-Barke, E.J.S., Scheres, A., Di Martino, A., Hyde, C., & Walters, J. R. (2005). Varieties of attention-deficit/hyperactivity disorder-related intra-individual variability. *Biological Psychiatry*, 57, 1416–1423

Cohen, J.D., Dunbar, K., & McClelland, I.L. (1990). On the control of automatic processes : A parallel distribued processing account of the Stroop effect. *Psychological Review*, 97,332-361.

Corbetta, M. & Shulman, G.L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-drivenattention in the brain. *Nature Neuroscience Reviews*, 3:201-215.

Corbetta, M., Miezin, F.M., Shulman, G.L., and Petersen, S.E. (1993).A PET study of visuo-spatial attention. The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience, *13*(3), 1202–1226.

Cortese, S., Kelly, C., Chabernaud, C., Proal, E., Di Martino, A., Milham, M. P., & Castellanos, F. X. (2012). Toward systems neuroscience of ADHD: a meta-analysis of 55 fMRI studies. *The American journal of psychiatry*, *169*(10), 1038–1055.

Costentin, J. (1995) Dopamine et transmissions dopaminergiques. *Neuropeptides et neuromédiateurs*. Éditions Inserm, Paris: 97-105.

Coull, J., Cheng, R.K., & Meck, W. (2011). Neuroanatomical and neurochemical substrates of timing. *Neuropsychopharmacology, 36(1)*, 3-25.

de Jong, R., Liang, C.C., & Lauber, E. (1994). Conditional and unconditional automaticity: a dual-process model of effects of spatial stimulus-response correspondence. *Journal of Experimental Psychology:Human Perception and Performance*, 20(4), 731-750

Deutsch, J.A., & Deutsch, D. (1963). Attention: Some theoretical considerations. *Psychological Review*, 93, 283-321.

Diedrichsen, J., Hazeltine, E., Kennerley, S., & Ivry, R. B. (2001).Absence of bimanual interference during directly cued actions effect.*Journal of Experimental Psychology*, 101, 70–76.

Donders, F.C. (1868). « Over de snelheid van psychische procesen ». Archiv für Anatomie und Physiologie, 8, 657-681. Traduction in: W.G. Koster (Ed.), Attention and Performance II. *Acta Psychologica*, 30, 412-431

Drechsler, R., Brandeis, D., Fôldényi, M., Imhof , K., & Steinhausen, H. C. (2005). The course of neuropsychological functions in children with attention deficit hyperactivity disorder from late childhood to early adolescence. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 46,824-836.

Duncan, J. (1986). Consistent and varied training in the theory of automatic and controlled information processing. *Cognition*, 23(3), 279-284.

Durston, S. (2003). A review of the biological bases of ADHD: What have we learned from imaging studies? Mental Retardation and Developmental Disabilities. *Research Reviews*, 9(3), 184-195.

Eimer, M., Hommel, B., & Prinz, W. (1995). Stimulus-Response compatibility and response selection. *Acta psychologica*, 90(1-3), 301-313.

Epstein, J.N., C.K., Conners, G., Sitarenios D., & Erhardt. (1998). Continuous performance test results of adults with attention deficit hyperactivity disorder. *Clin. Neuropsychol*. 12: 155–168.

Epstein, J.N., Langberg, J.M., Rosen, P.J., Graham, A., Narad, M.E., Antonini, T.N.,.Altaye, M. (2011). Evidence for higher reaction time variability for children with ADHD on a range of cognitive tasks including reward and event rate manipulations. *Neuropsychology*, 25(4), 427–441.

Epstein, J.N., Erkanli, A., Conners, C.K., Klaric, J., Costello, J.E., & Angold, A. (2003). Relations between Continuous Performance Test performance measures and ADHD behaviors. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 31, 543-554.

Eriksen, B.A. et Eriksen, C.W. (1974). Effects of noise letters upon the identication of target letter in a non-search task. *Perception & Psychophysics*, 16:143-149.

Ernst, M., Kimes, A. S., London, E. D., Matochik, J. A., Eldreth, D., Tata, S., Bolla, K. (2003). Neural substrates of decision making in adults with attention deficit hyperactivity disorder. *The American journal of psychiatry*, *160*(6), 1061–1070.

Fan, J., McCandliss, B.D., Sommer, T., Raz, M. & Posner, M.I. (2002). Testing the efficiency and independence of attentional networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(3), 340–347.

Faraone, S.V., Biederman, J., & Freedman, D. (2000). Validity of DSM-IV subtypes of attention deficit hyperactivity disorder: A family study perspective. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 37,185-193.

Faraone, S.V., Biederman, J., Weber, J., & Russell, R.L. (1998). Psychiatric, neuropsychological and psychological features of DSM-IV subtypes of attention deficit/hyperactivity disorder: Results from a clinically referred sample. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 37,185-193.

Forstmann, B.U., Jahfari, S., Scholte, H.S., Wolfensteller, U., van den Wildenberg, W.P.M., and Ridderinkhof, K.R. (2008a). Function and structure of the right inferior frontal cortex predict individual differences in response inhibition: a model-based approach. *J. Neurosci.* 28, 9790–9796.

Forstmann, B.U., van den Wildenberg, W.P.M., and Ridderinkhof, K.R. (2008b). Neural mechanisms, temporal dynamics, and individual differences in interference control. *J. Cogn. Neurosci.* 20, 1854–1865

Fraisse, P. (1957). Psychologie du temps. *Presses Universitaires de France*, Paris.

Frankenhaeuser, M. (1959). Estimation of time, an experimental study. Alquist et Wiksell.

Gainetdinov, R.R., & Caron, M.G. (2000). An animal model of attention deficit hyperactivity disorder. *Molecular medicine today*, *6*(1), 43–44.

Geurts, H.M., Verte,S., Oosterlaan ,J., Roeyers, H., Sergeant, J.A. (2005). ADHD subtypes: do they differing their executive functioning profile? *Archives of Clinical Neuropsychology*, 20,451-411.

Gibbon. J., Church R.M, Meck W.H. (1984). Scalar timing in memory. In: Gibbon J, Allan L (eds) Timing and time perception. *Acad Sci*.,423:52–77

Giros. B., Jaber, M., Jones, S.R, Wightman, R.M., Caron, M.G. (1996). Hyper-locomotion and indifference to cocaine and amphetamine in mice lacking the dopamine transporter. *Nature* 379:606 – 612

Goldstein, S., & Goldstein, M. (1990). Managing Attention Disorders in Children. A Guide for Practitioners. *Wiley,John Wiley & Sons*, Toronto

Gratton, G., Coles, M.G., & Donchin, E. (1992). Optimizing the use of information: strategic control of activation of responses. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121(4), 480-506.

Gray, J.A., (1987a). Perspectives on anxiety and impulsivity: A commentary. *Journal of Research in Personality*, 21,493-509.

Greenwald, A.G., & Shulman, H.G. (1973). On doing two things at once: II. Elimination of the psychological refractory period. *Journal of experimental psychology*, *101*(1), 70–76.

Gustafsson, P., Thernlund, G., Ryding, E., Rosen, I., & Cederblad, M. (2000). Associations between cerebral blood-flow measured by single photon emission computed tomography (SPECT), electro-encephalogram (EEG), behaviour symptoms, cognition and neurological soft signs in children with attention-deficit hyperactivity disorder (ADHD). *Acta paediatrica (Oslo, Norway: 1992)*, *89*(7), 830–835.

Hart, E.L., Lahey, B.B., Loeber, R., Applegate, B., & Frick, P. J. (1995). Developmental change in attention-deficit hyperactivity disorder in boys: a four-year longitudinal study. *Journal of abnormal child psychology*, *23*(6), 729–749.

Hasbroucq, T., Burle, B., Akamatsu, M., Vidal, F., & Possamaï, C.A. (2001). An electromyographic investigation on the effect of Stimulus-Response mapping on choice reaction time. *Psychophysiology*, 38(1), 157-162

Hasbroucq, T., Burle, B., Bonnet, M., Possamaï, C.A., & Vidal, F. (2002). Treatment dynamics in sensorimotor disorders: the contribution of electrophysiology. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 56(2), 75-97.

Hasbroucq, T., Mouret, I., Seal, J., & Akamatsu, M. (1995). Finger pairings in two-choice reaction time tasks: Does the between-hands advantage reflect response preparation? *Journal of Motor Behavior*, 27(3), 251-262.

Hasbroucq, T., Possamaï, C. A., Bonnet, M., and Vidal, F. (1999). Effect of the irrelevant location of the response signal on choice reaction time: an electromyographic study in humans. *Psychophysiology* 36, 522–526.

Hazeltine, D. Teague, R.B. Ivry .(2002). Simultaneous dual-task performance reveals parallel response selection after practice *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28 pp. 527–545

Hazeltine, E., & Wifall, T. (2011). Searching working memory for thesource of dual-task costs. *Psychological Research*.

Hazeltine, E., Bunge, S.A., Scanlon, M.D., & Gabrieli, J.D.E. (2003). Material-dependent and material-independent selection processes in the frontal and parietal lobes: an event-related fMRI investigation of response competition. *Neuropsychologia*, 41(9), 1208–1217.

Heaton, S.C., Reader, S. K, Preston, A.S., Fennell, E.B., Puyana, O.E., Gill, N., Johnson, J.H. (2001). The Test of Every day Attention for Children (TEA-Ch): Patterns of performance in children with ADHD and clinical controls. *Child Neuropsychology*, 7, 251-264.

Hervey, A.S., Epstein, J.N., & Curry, J.F. (2004). Neuropsychology of adults with attention – deficit/hyperactivity disorder: a meta analytic review. *Neuropsychology*, 18, 485-503.

Hicks, R.E., Miller, G.W., & Kinsbourne, M. (1976). Prospective and retrospective judgements of time as a function of amount of information processed. *American Journal of Psychology, 89(4)*, 719-730.

Hicks, R.E., Miller, G.W., Gaes, G., & Bierman, K. (1977). Concurrent processing demands and the experience of time-in-passing. *American Journal of Psychology, 90*, 431-446.

Hommel, B. (1994). Spontaneous decay of response code activation. *Psychological Research*. 56, 261-268

Hommel, B., Proctor, R.W., & Vu, K.P. (2004). A feature-integration account of sequential effects in the Simon task. *Psychological Research*, 68(1), 1-17.

Huang-Pollock, C.L., Nigg, J.T., & Carr, T.H. (2005). Deficient attention is hard to find: applying de perceptual load model of selective attention to attention deficit hyperactivity disorder subtypes, *Journal of child psychology and psychiatry*, 46, 1211-

1218.

Huang-Pollock, C.L., Nigg, J.T., Halperin, J.M. (2006). Single dissociation findings of ADHD deficits in vigilance but not anterior or posterior attention systems. *Neuropsychology*, 20,420-429.

Hunton, D.L., Corbetta, M., Shulman, G.M., Miezin, F.M. et Petersen, S.E. (1995). Common areas of parietal activation for shifts of spatial attention and tasks involving the conjunction of visual features. *Soc. Neurosci. Abstr*., 21, 937

Hübner, R., & Mishra, S. (2013). Evidence for strategic suppression of irrelevant activation in the Simon task. *Acta psychologica, 144*(1), 166–172.

Jacoby, L.L. (1991). A process dissociation framework: separating automatic from intentional uses of memory. *J Mem Lang* 30:513–

James, W. (1890). The principles of psychology (Vol.1).New-york: Henry Holt.

Jiang, Y., & Kanwisher, N. (2003). Common neural substrates forresponse selection across modalities and mapping paradigms. *Journal of Cognitive Neuroscience*,15(8), 1080–1094

Johnson, K.A., Kelly, S.P., Bellgrove, M.A., Barry, E., Cox, M., Gill, M., & Robertson, I.H. (2007). Response variability in Attention Deficit Hyperactivity Disorder: Evidence for neuropsychological heterogeneity. *Neuropsychologia*, 45,630-638.

Jolicœur, P., & Dell'Acqua, R. (1999). Attentional and structural constraints on visual encoding. *Psychological research*, 62, 154-164.

Kahneman, D. (1973). Attention and effort. New York: *Prentice-Hall*.

Klein, R.G., & Mannuzza, S. (1991). Long-term outcome of hyperactive children: A review. *Journal of the American Academy of Child &Adolescent Psychiatry*, 30,383–387

Kluger, A.N., Siegfried, Z., & Ebstein, R.P. (2002). A meta-analysis of the association between DRD4 polymorphism and novelty seeking. *Molecular psychiatry, 7*(7), 712–717.

King, J.A., Michael C., Marcel B., Isabella H., and D.Y. Von Cramon . (2007). "Inefficient Cognitive Control in Adult ADHD: Evidence from Trial-by-trial Stroop Test and Cued Task Switching Performance." *Behavioral and Brain Functions,* 3 (1): 42.

Konrad, K., & Eickhoff, S.B. (2010). Is the ADHD brain wired differently? A review on structural and functional connectivity in attention deficit hyperactivity disorder. *Human brain mapping, 31*(6), 904–916. doi:10.1002/hbm.21058

Kornblum, S. (1994). The way irrelevant dimensions are processed depends on what they overlap with: the case of Stroop- and Simon-like stimuli. *Psychological Research,* 56(3), 130-135.

Kornblum, S., Hasbroucq, T., & Osman, A. (1990). Dimensional overlap: cognitive basis for stimulus-response compatibility-a model and taxonomy. *Psychological Review*, 97(2), 253-270.

Koschack, J., Kunert, H.J., Derichs, G., Weniger, G., & Irle, E. (2003). Impaired and enhanced attentional function in children with attention deficit/hyperactivity disorder. *Psychological Médecine,* 33,481-489

Krain, A.L., & Castellanos, F.X. (2006). Brain development and ADHD. *Clinical Psychology Review,* 26,433-444.

Levy, J., & Pashler, H. (2001). Is dual-task slowing instruction dependent? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance,* 27,862–869

Lien, M.C., Schweickert R., & Proctor, R.W. (2003). Task switching and response correspondence in the psychological refractory period paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 29, 692-712

Luce, R.D. (1986). Response times: their role in inferring elementary mental organization. New York: Oxford Science Publications.

Lundervold, A.J., Steinunn A., Helene H., Anne H., Kerstin J.P., and Jan Haavik. (2011). "Attention Network Test in Adults with ADHD-the Impact of Affective Fluctuations." *Behav Brain Funct* 7: 27.

Macar, F., Grondin, S., & Casini, L. (1994). Controlled attention sharing influences time estimation. *Memory and Cognition., 22(3),* 673-686.

MacDonald, A.W., Cohen, J.D., Stenger, V.A., & Carter, C.S. (2000). Dissociating the role of dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. Science, 288, 1835–183

Mannuzza, S., Klein, R.G., Bessler, A., Malloy, P., & Lapadula, M. (1993). Adult outcome of hyperactive boys: Educational achievement, occupational rank and psychiatric status. *Archives of General Psychiatry*, 50, 565–576.

McCann, R.S., & Johnston, J.C. (1992). Locus of the single-channel bottleneck in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 471 - 484.

McClain, L. (1983). Interval estimation: effect of processing demands on prospection and retrospection reports. *Perception and Psychophysics, 34(2),* 185-189.

Meyer, D.E. & Kieras, D.E. (1997a). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: I. Basic mechanisms. *Psychological Review*, 104, 3-65.

Meyer, D.E. & Kieras, D.E. (1997b). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance:Part 2. Accounts of psychological refractory-period phenomena. *Psychological Review*, 104, 749 – 791.

Milich, R., Balentine, A.C., & Lynam, D.R. (2001). ADHD Combined Type and ADHD Predominantly Inattentive Type Are Distinct and Unrelated Disorders. *Clinical Psychology: science and practice,* 8,463-488

Moray, N. (1959). Attention in dichotic listening: affective cues and the influence of instructions. *The Quartely Journal of Experimental Psychology*, 11, 56-60.

Moscovitch, M. (1992) Memory and working-with-memory: a component process model based on modules and central systems. *J Cogn Neurosci* ,4:257–267

Navon, D. (1984). Resources–A theoretical soupstone?. *Psychological Review*, 91, 216–234.

Navon, D., & Gopher, D. (1979). On the economy of the human processing system. Psychological review, 86, 3, 214-255.

Navon, D., & Miller, J. (1987). Role of outcome conflict in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13, 435–448.

Navon, D., & Miller, J.O. (2002). Queuing or sharing? A critical evaluation of the single-bottleneck notion. *Cognitive Psychology*, 44, 193-251.

Norman, D.A., & Shallice, T. (1986).Attention to action: Willed and automatic control of behaviour. In R.J. Davidson, G.E. Schwartz, & D. Shapiro (Eds.), Consciousness and self regulation: Advances in Research and Theory, Vol. 4 (pp. 1-18). New York: Plenum Press.

Notebaert, W., Soetens, E., & Melis, A. (2001). Sequential analysis of a Simon task-evidence for an attention-shift account. *Psychological Research*, 65(3), 170-184.

O'Dougherty, M., Neuchterlein, K.H., & Drew, B. (1984). Hyperactive and hypoxic children: Signal detection, sustained attention and behavior. *Journal of Abnormal Psychology*, 93,178-191.

Oosterlaan J., Logan G.D., Sergeant, J.A. (1998): Response inhibition in AD/HD, CD, comorbid AD/HDCD, anxious and control children: A meta-analysis of studies with the stop task. *J Child Psychol Psychiatry* 39:411–425

Ornstein, R.E. (1969). On the experience of time. Middlesex, England: Penguin.

Pardo, J.V., Pardo, P.J, Janer, K.E. (1990) The anterior cingulatecortex mediates processing selection in the Stroop attentional conflict paradigm. *Proc Natl Acad Sci USA*, 87:256–259.

Pashler, H. & Johnston, J. (1989). Chronometric evidence for central postponement in temporally overlapping tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*,41A, 19-45.

Pashler, H. (1984). Processing stages in overlapping tasks: Evidence for a central bottleneck. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 358-377.

Pashler, H. (1989). Dissociations and dependencies between speed and accuracy: Evidence for a two-component theory of divided attention in simple tasks. *Cognitive Psychology*, 21, 469 - 514.

Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, 116, 220 – 244.

Pennington, B.F., & Ozonoff, S. (1996). Executive Functions and Developmental Psychopathology. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 57, 5 1-87.

Petersen, S.E., Corbetta, M., Miezin, F.M., Shulman, G.L., & Raichle, M.E. (1993).The effects of selective attention on visual processing measured with performance and PET (positron emission tomography) .In T.Ono, L.Squire, D.Perrett, 336 Petersen, Corbetta, Miezin, and Shulman & M.E. Raichle (Eds.), Brain mechanisms of perception and memory:From neuron to behavior. NewYork:*Oxford University Press*.

Polanczyk, G., de Lima, M.S., Horta, B.L., Biederman, J., Rohde, L.A. (2007). The worldwide prevalence of ADHD: a systematic review and metaregression analysis. *Am J Psychiatry*; 164:942–948

Posner, M.I., Boies, S.J. (1971). Components of attention. *Psychological Revue*. 78:391-408

Posner, M.I. & Petersen, S.E. (1990). The attention system of the human brain. *Annu Rev Neurosci*. 1990;13:25–42.

Posner, M.I. & Raichle, M.E. (1994). Images of Mind. *Scientific American Books*.

Posner, M.I. & Snyder, C.R. (1975). Facilitation and inhibition in the processing of signals. In P.M.A. Rabbitt & S. Dornic (Eds.), Attention & Performance V (pp. 669-682).London: *Ademic Press*.

Posner, M.I (1980) Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 2, 3-25.

Posner, M.I. & Cohen,Y. (1984).Components of visual orienting. In H.Bouma & D.Bouwhuis (Eds.), Attention and Performance X (pp.531-556). London: Lawrence Erlbaum *Psychological Science*, 12,493–498.

Praamstra, P., Kleine, B.U., & Schnitzler, A. (1999). Magnetic stimulation of the dorsal premotor cortex modulates the Simon effect. *Neuroreport*, 10(17), 3671-3674.

Pollack, Y., Kroyzer, N., Yakir, A., Friedler, M. (2009). Testing possible mechanisms of deficient supra-second time estimation in adults with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Neuropsychology, 23*, 679-686.

Prox, V., Dietrich, D.E., Zhang, Y.Y., Emrich, H.M., & Ohlmeier, M.D. (2007). Attentional processing in adults with ADHD as reflected by event-related potentials. *Neuroscience Letters , 419,* 236-241

Quay, H.C. (1997). Inhibition and attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 25(1), 7-13

Ratcliff, R. (1979).Group reaction time distributions and analysis of distribution statistics. *Psychological Bulletin*, 86(3), 446-461

Ridderinkhof, K.R. (2002a). "Activation and suppression in conflict tasks: empirical clarification through distributional analyses," in *Attention and Performance*, Vol. XIX, Common Mechanisms in Perception and Action, eds W. Prinz and B. Hommel (Oxford: Oxford University Press), 494–519.

Ridderinkhof, K.R. (2002b). Micro and macro-adjustments of task set: activation and suppression in conflict tasks. *Psychological Research*. 66, 312–323.

Ridderinkhof, K.R., van den Wildenberg, W.P.M., Wijnen, J., and Burle, B. (2004). "Response inhibition in conflict tasks is revealed in delta plots," in *Cognitive Neuroscience of Attention*, ed. M. Posner (New York: Guilford Press), 369–377.

Ridderinkhof, K.R., Scheres, A., Oosterlaan, J., & Sergeant, J.A. (2005). Delta plots in the study of individual differences: New tools reveal response inhibition deficits in AD/HD that are eliminated by methylphenidate treatment. *Journal of Abnormal Psychology*, *114*(2), 197.

Rommelse, N.N.J., Altink, M.E., De Sonneville, L.M.J., Buschgens, C.J.M., Buitelarr, J., Oosterlaan, J.,Sergeant, J.A. (2007) . Are Motor inhibition and cognitive flexibility dead ends in ADHD? *Journal of Abnormal Child Psychology*, 35,951-961.

Rubia, K., Overmeyer, S., Taylor, E., Brammer, M., Williams, S.C., Simmons, A. (1999). Hypofrontality in attention deficit hyperactivity disorder during higher-ordermotor control: a study with functional MRI. *American Journal of Psychiatry*; 156:891–6

Sagvolden, T., Aase, H., Zeiner, P., & Berger, D. (1998). Altered reinforcement mechanisms in attention-deficit/hyperactivity disorder. *Behavioural brain research*, *94*(1), 61–71.

Sanders, A.F. (1998). Elements of human performance: reaction processes and attention in human skills. Mahwah, NJ: Erlbaum.

Schachar, R., Logan, G., Wachsmuth, R., & Chajczyk, D. (1988). Attaining and maintaining preparation: A comparison of attention in hyperactive, normal, and disturbed control children. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 16,361-378.

Schneider, M.F., Krick, C.M., Retz, W., Hengesch, G., Retz-Junginger, P., Reith, W., & Rösler, M. (2010). Impairment of fronto-striatal and parietal cerebral networks correlates with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) psychopathology in adults - a functional magnetic resonance imaging (fMRI) study. *Psychiatry research*, *183*(1), 75–84. doi:10.1016/j.pscychresns.2010.04.005

Shiffrin, R.M. & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological Review*, 88 (2), 127-189.

Schonwald, A. (2005). Update: attention deficit/hyperactivity disorder in the primary care office. *Current opinion in pediatrics*, *17*(2), 265–274.

Soutschek, A., Schwarzkopf, W., Finke, K., Hennig-Fast, K., Müller, H. J., Riedel, M., Schubert, T. (2013). Interference control in adult ADHD: no evidence for interference control deficits if response speed is controlled by delta plots. *Acta psychologica*, *143*(1), 71–78. doi:10.1016/j.actpsy.2013.02.013

Schumacher, E.H., & D'Esposito, M. (2002). Neural implementation of response selection in humans as revealed by localized effects of stimulus-response compatibility on brain activation. *Human Brain Mapping*,17(3), 193–201

Schumacher, E.H., Cole, M.W., & D'Esposito, M. (2007). Selection and maintenance of stimulus-response rules during preparation and performance of a spatial choice-reaction task. *Brain Research*,1136(1), 77–87

Schumacher, E.H., Seymour, T.L., Glass, J. M., Fencsik, D.E., Lauber, E.J., Kieras, D.E., et al. (2001). Virtually perfect time sharing in dual-task performance: uncorking the central cognitive bottleneck. *Psychological science*, *12*(2), 101–108.

Schumacher, E., Schwarb, H., Lightman, E., & Hazeltine, E. (2011).Investigating the modality specificity of response selection usinga temporal flanker task. *Psychological Research.*75(6)499-512

Schumacher, E.H., Seymour, T., Glass, J.M., Lauber, E.J., Kieras, D.E., & Meyer, D.E. (1997).Virtually perfect time sharing in dual-task performance. Paper presented at the 38th annual meeting of the Psychonomic Society, Philadelphia, PA sharing in dual-task performance: uncorking the central cognitive bottleneck. *Psychological Science*, 12, 101–108

Sergeant, J.A. (2000). The cognitive-energetic model: an empirical approach to Attention Deficit Hyperactivity Disorder. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 24, 7-12.

Sergeant, J.A., Oosterlaan, J., & Van der Meere, J. (1999). Information processing and energetic factors in attention – deficit / hyperactivity disorder. In: Quay, H.C., Hogan, A. (Eds.). *Handbook of disruptive behaviors disorders*, (pp.75-104). New-York: Plenum Press.

Shafritz, K.M., Marchione, K.E., Gore, J.C., Shaywitz, S.E., Shaywitz, B.A. (2004) The effects of methylphenidate on neural systems of attention in attention deficit hyperactivity disorder. *American Journal of Psychiatry*.161:1990–1997

Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. Philosophical Transactions of Royal Society of London. Serie B, *Biological sciences*, 298(1089), 199-209.

Shallice, T. (2002). Fractionation of the Supervisory System. Dans D.T. Stuss & R. T. Knight (Eds.), Principles of Frontal Lobe Function (pp. 261-277). Oxford NY: *University Press*.

Shannon, C.E. & Weaver, W. (1948) The Mathematical Theory of Communication. *University of Illinois Press*, Urbana and Chicago.

Shiffrin, R.M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. Psychological Review, 22, 127-190. single-bottleneck notion. *Cognitive Psychology*, 44, 193-251.

Simon, J.R., & Rudell, A.P. (1967). Auditory S–R compatibility:The effect of an irrelevant cue on information processing. *Journal of Applied Psychology*, 51,300−304

Simon, J.R. (1969). Reactions toward the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology,* 81, 1974–1976

Smid, H.G.O.M., Mulder, G., and Mulder, L.J.M. (1990). Selective response activation can begin before stimulus recognition is complete: a psycho-physiological and error analysis of the continuous flow. *Acta Psychological*. 74, 169–201

Solanto, M.V., Abikoff, H., Sonuga-Barke, E., Schachar, R., Logan, G.D., Wigal, T., (2001): The ecological validity of delay aversion and response inhibition as measures of

impulsivity in AD/HD: A supplement to the NIMH multi-modal treatment study of AD/HD.*J Abnorm Child Psychol* 29:215–228

Sonuga-Barke, E.J.S. (1994): On dysfunction and function in psychological theories of childhood disorder. *J Child Psychol Psychiatry*.35:801-815.

Sonuga-Barke, E.J.S. (2003). The dual pathway model of AD/HD: an elaboration of neuro-developmental characteristics. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 27, 593-604.

Sowell, E.R., Tompson, P.M.,Welcome, S.E., Henkenius, A.L., Toga, A.W., & Peterson, B. S. (2003). Cortical abnormalities in children and adolescents with attention-deficit hyperactivity disorder. *The Lancet*, 362, 1699-1707

Speckman, P.L., Rouder, J.N., Morey, R.D., and Pratte, M.S. (2008). Delta plots and coherent distribution ordering. *Am. Stat*. 62, 262–266

Stephan, D.N., & Koch, I. (2010). Central cross-talk in task switching: Evidence from manipulating input-output modality compatibility. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*,36(4), 1075–1081.

Still, G.F. (1902). The Coulstonian lectures on some abnormal physical conditions in children. *Lancet*, 1, 1008-1012.

Stins, J.F., Tollenaar, M.S., Dorine, I.E., Slaats-Willemse, D.I.E., Buitelaar, J.K., Swaab-Barneveld, H., Verhulst, F.C., Polderman, T.C., & Boomsma, D.I. (2005). Sustained attention and executive functioning performance in attention deficit/hyperactivity disorder. *Child Neuropsychology*, 11,285-294

Stroop, J.R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18:643-662.

Sturm, W. (2002). Neuro-anatomie fonctionnelle de l'attention. In J. Couillet, M. Leclerc, C. Moroni &P. Azouvi (Eds.). *Neuropsychologie de l'attention* (pp. 55 - 72). Marseille : Solal.

Stürmer, B., Leuthold, H., Soetens, E., Schröter, H., and Sommer, W. (2002). Control over location-based response activation in the Simon task: behavio-ral and electrophysiological evidence *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform*. 28, 1345–1363

Tannock, R. (1998) . Attention Deficit Hyperactivity Disorder: Advances in Cognitive, Neurobiological, and Genetic Research. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 39, 65-99.

Theios, J. (1975) . The components of response latency in simple human information processing tasks. In P.M.A. Rabbitt, & S. Dornic (Eds.), Attention and Performance V. (pp. 418-440). London: Academic Press.

Thomas, E.A. & Weaver, W.B. (1975). Cognitive processing and time perception. *Perception and Psychophysics*, 17, 353-367.

Thorley, G. (1984). Review of follow-up and follow-back studies of childhood hyperactivity. *Psychological Bulletin*, 96,116–132.

Tombu, M., & Jolicœur, P. (2002). All-or-none bottleneck versus capacity sharing accounts of the psychological refractory period phenomenon. *Psychological Research*, 66, 274–286.

Tombu, M., & Jolicœur, P. (2003) A central capacity sharing model of dual-task performance. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 29,3-18.

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 characteristic frequency. *Perception*, 19:705-743.

Treisman, A.M. (1960).Contextual cues in selective listening. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 12, 242-248.

Tucha, L., Tucha, O.,Walitza, S., Sontag, T.A., Laufkôtter, R., Linder, M., & Lange, K. W. (2009). Vigilance and sustained attention in children and adults with ADHD. *Journal of attention disorders*, 72,410-421.

Tucha, O.,Walitza,S., Mecklinger, L., Sontag, T.A., Kubber, S.,Linder, M., & Lange, K.W. (2006). Attentional functioning in children with ADHD predominantly hyperactive-impulsive type and children with ADHD-combined type. *Journal of neural transmission*, 113, 1943-1953.

Tzourio, N., Massioui, F., Crivello, F., Joliot, M., Renault, B., and Mazoyer, B. (1997). Functional anatomy of auditory attention studied with PET. *NeuroImage*, 5:63–77

Vaidya, C.J, Austin, G., Kirkorian, G., Ridlehuber, H.W., Desmond, J.E., Glover, G.H., Gabrieli, J.D. (1998). Selective effects of methylphenidate in attention deficit hyperactivity disorder: A functional magnetic resonance study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 95:14494–14499

Valera, E.M., Faraone, S.V., Murray, K.E., & Seidman, L.J. (2007). Meta-analysis of structural imaging findings in attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biological Psychiatry*, 61(12), 1361-1369

Vander Meere, J., & Sergeant, J. (1987). A divided attention experiment with pervasively hyperactive children. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 15,379-392.

Van den Wildenberg, W.P.M., Wylie, S.A., Forstmann, B.U., Burle, B., Hasbroucq, T., & Ridderinkhof, K.R. (2010). To head or to heed? Beyond the surface of selective action inhibition: a review. *Frontiers in human neuroscience*, *4*, 222.

Vincent, S.B. (1912) The function of the vibrossae in the behavior of the white rat. *Behavioral Monograph I.*

Walker, A.J., Shores, E.A., Trollor, J.N., Lee, T., & Sachdev, P.S. (2000). "Neuropsychological Functioning of Adults with Attention Deficit Hyperactivity Disorder." *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22 (1) (February): 115–124.

Wagenmakers, E.J., Grasman, R.P.P.P., and Molenaar, P.C.M. (2005). On the relation between the mean and the variance of a diffusion model response time distribution. *J. Math. Psychol*. 49, 195–204.

Weiss, G., & Hechtman, L. (1986). Hyperactive children grown up. *New York: Guilford Press.*

Weiss, G., Hechtman, L., Perlman, T., Hopkins, J., & Wener, A. (1979). Hyperactives as young adults: a controlled prospective ten-year follow-up of 75 children. *Archives of general psychiatry*, *36*(6), 675–681.

Welford, A.T. (1952). The "psychologicalrefractory period" and the timing of high speed performance -- A review and a theory. *British Journal of Psychology*, 43, 2-19.

Wickens, C.D. (1980). The structure of attentional resources. In R. Nickerson (Ed.),Attention and performance VIII (pp. 239–257).Hillsdale, NJ: Erlbaum

Wickens, C.D., Sandry, D.L., & Vidulich, M. (1983). Compatibility and resource competition between modalities of input, central processing and output. *Human Factors*, 25, 227–248

Wilens, T.E., Biederman, J., Spencer, T. J., & Prince, J. (1995). Pharmacotherapy of adult attention deficit/hyperactivity disorder: A review. *Journal of Clinical Psychopharmacology*, 15,270–279

Willcutt, E.G., Doyle, A.E., Nigg, J.T., Faraone, S.V. & Pennington, B.F. (2005). Validity of the executive function theory of attention deficit/hyperactivity disorder. *Biological Psychiatry*, 57, 1336-1346.

Whiterspoon, D., & Allan, L. (1985). Time judgements and the repetition effect in perceptual identification. *Memory & Cognition, 13,* 101–111.

Wohl, M., Purper-Ouakil, D., Mouren, M.C., Ades, J., Gorwood, P. (2005). Meta-analysis of candidate genes in attention-deficit hyperactivity disorder. *Encephale* 31(4Pt 1): 437–447.

Wu, K.K., Anderson, V., & Castiello, U. (2002). Neuropsychological evaluation of deficits in executive functioning for ADHD children with or without learning disabilities. *Developmental Neuropsychology*, 22, 501-531.

Wylie, S.A., Ridderinkhof, K.R., Elias, W.J., Frysinger, R.C., Bashore, T.R., Downs, K.E., van Wouwe, N.C., and van den Wildenberg, W.P.M. (2010). Subthalamic nucleus stimulation influences expression and suppression of impulsive behavior in Parkinson's disease. *Brain*.

Yeo, B.T., Krienen, F.M., Sepulcre, J., Sabuncu, M.R., Lashkari D., Hollinshead M., Roffman, J.L., Smoller J.W., Zöllei L., Polimeni J.R., Fischl B., Liu H., Buckner R.L. (2011) The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *J Neurophysiol*; 106:1125–1165

Zakay, D. (1989). Subjective and attentional resource allocation: an integrated model of time estimation. In I. Levin, & D. Zakay (Eds.), *Time and human cognition* (pp. 365-397). North-Holland: Elsevier Science Publishers.

Zametkin, A.J, Nordahl, T.E, Gross, M., King, A.C, Semple, W.E, Rumsey, J., Hamburger, S., Cohen, R.M. (1990). Cerebral glucose metabolism in adults with hyperactivity of childhood onset. *N Engl J Med*. 323:1361–1366