

Université de Lyon Diplôme délivré par l'Université Lumière Lyon 2

Ecole Doctorale Neurosciences Et Cognition

Thèse de Doctorat de Neuropsychologie

FONCTIONS EXÉCUTIVES ET CONDUITE AUTOMOBILE.

Le 10/01/2008

Monsieur le Professeur Bernard LAURENT

Mr B. LAURENT. Professeur, CHU Bellevue, Saint Etienne, Mr C. MARIN-LAMELLET. Chargé de Recherche, INRETS, Lyon, Mr P. Allain. Maître de conférences habilité à diriger des recherches, Université d'Angers, *Rapporteur* Mr C. RAINVILLE. Professeur, Université de Montréal, Canada. *Rapporteur* Mr M. ISINGRINI. Professeur, Université de Tours. Mr O. KOENIG. Professeur, Université Lyon 2. Mme J. CHARLTON. Professeur, Monash University Accident Research Centre, Australie.

Table des matières

Remerciements . .	1
Résumé .	3
Communications Scientifiques . .	5
Glossaire . .	7
Contrat de diffusion .	9
Introduction Générale .	11
Partie 1 – Contexte Théorique . .	15
Chapitre 1. Fonctionnement exécutif et conduite automobile .	15
1. Le Fonctionnement exécutif . .	15
2. La conduite automobile .	33
Chapitre 2. Vieillessement cognitif normal et conduite automobile . .	41
1. Qu'est ce que « vieillir » ? . .	41
2. Conduire en vieillissant .	50
Chapitre 3. Maladie d'Alzheimer et conduite automobile .	57
1. Qu'est ce que « la Maladie d'Alzheimer » ? .	57
2. Conduire avec la Maladie d'Alzheimer .	73
Problématique et Hypothèses . .	83
Partie 2 – Données expérimentales .	87
Introduction . .	87
Chapitre 1. Méthodologie . .	89
1. Les participants . .	89
2. Matériel et Méthode . .	90
3. Analyses Statistiques et exploitation des résultats . .	107
Chapitre 2. Résultats : Vieillessement normal . .	109
1. Fonctionnement cognitif global . .	109
2. Flexibilité mentale .	113

3. Mise à jour .	115
4. Inhibition . .	117
5. La situation de tourne-à-gauche .	120
6. Analyses de régression multiple .	121
7. Synthèse des résultats .	126
Chapitre 3. Résultats : La maladie d'Alzheimer .	127
1. Fonctionnement cognitif global . .	128
2. Flexibilité mentale .	131
3. Mise à jour .	134
4. Inhibition . .	136
5. La situation de tourne-à-gauche .	139
.	140
6. Analyses de régression multiple .	140
7. Synthèse des résultats .	145
Discussion .	147
1. Effets du vieillissement normal sur les fonctions exécutives en conduite . .	147
1. Evaluations neuropsychologiques .	147
2. Evaluations en situation de conduite .	151
2. Effets de la maladie d'Alzheimer sur les fonctions exécutives en conduite . .	157
1. Evaluations neuropsychologiques .	157
2. Evaluations en situation de conduite .	160
Conclusions et perspectives . .	169
Références Bibliographiques .	173
Annexes . .	195
Annexe 1 .	195
1. Formulaire d'informations données aux volontaires . .	195
2. Formulaire de consentement validé par le CCPPRB .	195
Annexe 2 .	198
Questionnaire médical d'inclusion des participants .	198

Annexe 3. . .	200
1. Photographie du grand simulateur .	200
2. Photographie du petit simulateur .	200
Annexe 4 .	201
1. Consignes pour l'expérience de mise à jour .	201
2. Consignes pour l'expérience de flexibilité .	201
3. Consignes pour l'expérience d'inhibition .	201
4. Consignes pour l'expérience de tourne-à-gauche . .	201
Annexe 5 .	203
1. Panneaux utilisés dans l'expérience de mise à jour .	203
2. Panneaux utilisés dans l'expérience de flexibilité .	203
Annexe 6 .	205
Plan du trajet dans la situation de tourne-à-gauche .	205
Résumé .	206
Abstract .	207

Remerciements

*Je souhaite tout d'abord remercier les personnes qui ont accepté d'être membres de mon jury. Je remercie **Mr Philippe Allain** et **Mr Constant Rainville** pour avoir accepté de lire et de juger ce travail, **Mr Michel Isingrini** pour avoir accepté de participer à ce jury et **Mr Olivier Koenig** pour avoir participé à ce jury, pour m'avoir fait connaître les sciences cognitives et pour avoir toujours gardé un œil attentif sur mon travail. Enfin, je tiens à remercier **Mme Judith Charlton** d'être venue de si loin pour apprécier mon travail de thèse. Je suis très heureuse que nous puissions entamer cette fabuleuse collaboration.*

*Je tiens également à remercier vivement **Mr Bernard Laurent** qui a accepté de diriger ce travail de thèse, pour son soutien, sa réactivité et ses conseils très précieux, qui m'ont considérablement aidée tout au long de ce travail.*

*Je tiens particulièrement à exprimer ma profonde gratitude à **Claude Marin-Lamellet** qui a su me donner l'envie d'aller jusqu'au bout et qui a toujours cru en moi. Je vous remercie très vivement pour votre confiance, votre soutien constant, votre bonne humeur et votre immense disponibilité. Au-delà de nos conversations scientifiques, tous nos échanges ont été une source très riche d'enseignement pour moi. Ce travail vient d'aboutir, mais ce n'est pas une fin en soi et j'espère qu'il s'ouvrira sur de nouvelles perspectives de collaborations.*

*Mes remerciements vont également à **tous les membres** du LESCOT et plus particulièrement à **Corinne Brusque**, la directrice, pour son accueil très sympathique au sein du laboratoire, pour sa bienveillance et son soutien tout au long de mon parcours au sein de l'INRETS. Je remercie bien sûr l'INRETS qui m'a accordé sa confiance en m'octroyant une bourse de 3 ans pour réaliser ce travail de recherche.*

*Je remercie **Aline Alauzet**, **Catherine Gabaude** et **Laurence Paire-Ficout**, pour toutes les connaissances qu'elles m'ont apportées. Je remercie tout particulièrement **Aline** pour son aide, ses relectures sérieuses et ses remarques toujours pertinentes ! un grand merci à vous trois pour votre aide et votre bonne humeur ! Merci à mes compagnons de galère, **Olivier** et **Eric**, et à ceux qui sont passés par là et qui m'ont démontré que c'était réalisable, **Adriana**, **Béa**, **Alex**, **Céline** et **Nico**, heureusement que vous étiez là ! **Nicolas Dapzol** a également grandement participé à sa façon dans l'achèvement de ce travail. Merci Nico de m'avoir soutenue, fait beaucoup rire et surtout pour m'avoir guidée dans l'obscur labyrinthe des statistiques...*

*L'élaboration du protocole expérimental n'aurait jamais pu se faire sans l'aide précieuse de l'équipe lyonnaise du laboratoire MSIS. Je remercie donc sincèrement **Max Duraz** pour la conception technique du simulateur et **Isabelle Aillerie** pour la réalisation des scénarii et pour la conception des bases virtuelles. Merci Isabelle pour ton aide précieuse, pour l'intérêt que tu portes à ce travail et pour toutes nos discussions. Je n'oublie pas **Stéphane Aillerie**, que je remercie pour son aide au quotidien, sa disponibilité même dans l'urgence et surtout pour sa bonne humeur constante !*

*Je remercie bien sûr toutes les personnes anonymes citées dans ce travail sous le nom de « participants ». Sans eux, ce travail ne serait pas. Je tiens également à remercier les neurologues qui ont porté un intérêt à mon travail et m'ont permis de rencontrer des patients volontaires, **Pierre Haond**, **Thierry Arnoux**, **Jean-Jacques Depassio**, **Pierre Krolak-Salmon**, ainsi que **Isabelle Rouch**, **Odile Hibert** et **Anne Truche**. Je remercie également sincèrement **Bernard Croisile**, **Philippe Neuschwander**, **Isabelle Gallice** et **Claire Gédéon** pour leur*

participation active au cours de ce projet de recherche.

*Je remercie également très chaleureusement **Marie-France Boyer** pour son aide dans la sélection médicale des participants. Merci aussi pour avoir pris soin de moi au cours de ces années de « galère auto-immunitaire » !*

*Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont entourée au cours de ce périple. Je pense en particulier à **Judith et Michel**, à **Manu**, à **Steph**, ainsi qu'à **Aurore, Lara et Tom** qui ont traversé et traversent encore des moments bien difficiles... Merci à **Claire** et à **Claire** ... Nous nous sommes soutenues mutuellement pour atteindre le même but et nous allons y arriver ! Merci à toutes les deux d'avoir été là...*

*Mes plus profonds remerciements vont bien sûr à **Rodolphe** qui a supporté avec amour et générosité la position difficile de « conjoint de thésard ». Sans toi rien n'aurait été possible... Et enfin, merci à **mes parents** qui me soutiennent depuis toujours. Vous avez su me guider jusque là, vous êtes formidables ! Je suis particulièrement fière d'être votre fille...*

Cette thèse a été financée par le programme de bourses doctorales de l'INRETS.

**Le Temps s'est égaré dans la vallée immense OÙ la Lune, sans cesse, verse son miel clair
Devant moi, les reflets de la nuit qui me serre
Tourbillonnent dans mon âme, ils y chantent et y dansent... Ludovic C. Le Lac Endormi.**

Résumé

Dans un contexte d'augmentation générale du nombre de conducteurs âgés et du nombre de conducteurs en stade précoce de maladie d'Alzheimer, nous nous sommes intéressés au rôle particulier joué par les fonctions exécutives dans l'activité de conduite automobile. L'objectif de ce travail de recherche était en effet d'étudier, d'une part, comment les fonctions exécutives évoluent dans le vieillissement cognitif normal et dans le stade précoce de la maladie d'Alzheimer, d'autre part, comment cette évolution peut être évaluée dans des situations de conduite.

Le modèle exécutif proposé par Miyake *et al.* (2000) a été retenu comme cadre théorique pour l'évaluation du fonctionnement exécutif. Nous suggérons en effet, que les trois fonctions exécutives décrites par Miyake *et al.*, la flexibilité mentale, la mise à jour des informations en mémoire de travail ainsi que l'inhibition, sont trois composantes essentielles qui interviennent à différents niveaux de l'activité de conduite.

Notre démarche expérimentale a consisté en une évaluation neuropsychologique des trois composantes exécutives, par le biais d'une batterie de tests. Cette évaluation a été combinée à une expérimentation sur simulateur de conduite. Nous avons mis au point quatre scénarii de conduite, dont trois évaluaient chacun l'une des trois composantes exécutives. Le dernier scénario était une situation naturelle de conduite avec des intersections à gauche qui impliquait les trois composantes à la fois. En conduite réelle, cette situation d'intersection avec tourne-à-gauche est en effet une situation particulièrement accidentogène pour les conducteurs âgés.

Les résultats indiquent tout d'abord une dégradation légère de deux des trois composantes exécutives dans le vieillissement cognitif normal, la mise à jour et l'inhibition, mais pas de la flexibilité. Les trois composantes exécutives n'évoluent donc pas de manière similaire dans le vieillissement cognitif normal qui préserve pour un certain temps la capacité de flexibilité mentale. Ensuite, nous avons observé une dégradation significative des trois composantes chez les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer. Les trois composantes exécutives sont donc sensibles au vieillissement pathologique. Par ailleurs, les expériences en situation de conduite indiquent des résultats similaires et corrélés à ceux obtenus par les évaluations neuropsychologiques. Les situations de conduite mises au point sur le simulateur sont donc pertinentes pour l'évaluation des trois composantes exécutives en situation écologique. Enfin, les résultats de la situation de conduite naturelle avec intersections en tourne-à-gauche montrent que les composantes exécutives sont indispensables à la bonne gestion de cette situation particulière. Notre travail de recherche présente donc à la fois des aspects fondamentaux d'amélioration des connaissances concernant l'implication des fonctions exécutives dans la conduite automobile et des aspects appliqués, permettant de mieux appréhender le vieillissement normal et pathologique en vue de proposer des outils de dépistage des conducteurs à risque.

En définitive, ce travail offre des perspectives de recherche futures concernant l'amélioration des connaissances sur les aspects cognitifs de la conduite automobile. Ceci devrait permettre d'élargir ce champ de recherche notamment à d'autres pathologies qui touchent le fonctionnement exécutif et pour lesquelles les patients se trouvent en forte demande d'autonomie, et donc en forte demande vis-à-vis de la conduite automobile. C'est le cas par exemple des patients ayant subi un traumatisme crânien grave. De plus, des perspectives intéressantes sont également offertes concernant les possibilités non seulement d'évaluation,

Fonctions exécutives et Conduite automobile.

mais aussi de réadaptation de la conduite grâce à la mise au point de ce type de protocoles sur simulateur de conduite.

Communications Scientifiques

Article :

Etienne, V., Marin-Lamellet, C., & Laurent, B. (En révision). Evolutions du fonctionnement exécutif dans le vieillissement normal. *Revue Neurologique*.

Etienne, V., Marin-Lamellet, C. (2007, Juin). Mental flexibility impairment in drivers with early Alzheimer's disease: A driving simulator approach. Paper presented at the 3rd *Young Researchers Seminar of ECTRI*. Brno, Czech Republic.

Marin-Lamellet, C., Etienne, V., & Bedoin, N. (2007, Juin). Driving Competence and traumatic brain injuries. Paper presented at the 11th *International Conference on Mobility and Transport for Elderly and disabled people (TRANSED)*. Montreal, Canada.

Etienne, V., & Marin-Lamellet, C. (2006, Septembre). Effects of Alzheimer's disease on Functional Representations of driving Situations. Paper presented at the *Workshop on maintaining independence in transportation as a senior: Driving or using alternative means of Transport?* Montréal, Canada.

Etienne, V., Marin-Lamellet, C., & Laurent, B. (2006, Juillet). Impairments of Executive Functions in Drivers with Early Alzheimer's disease: a Driving Simulator Approach. Paper presented at the 7th *International Conference of Applied Psychology*. Athens, Greece.

Etienne, V., & Marin-Lamellet, C. (2005, Novembre). Déficits Attentionnels dans la Maladie d'Alzheimer et Conduite Automobile. *Revue Neurologique*, 161 (12), 4S118.

Marin-Lamellet, C., Kerleroux, J., Etienne, V., Bedoin, N., Gabaude, C., & Lafont, S. (2005, Octobre). Efficience cognitive des traumatisés crâniens et conduite automobile. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 48, 515.

Etienne, V., & Marin-Lamellet, C. (2006, Septembre). *Left-Turn Scenario in a simulated driving situation: Evaluation of Executive impairments*. Meeting on the development of standards for the evaluation of fitness to drive using driving simulators. Montreal, Canada.

Etienne, V., & Marin-Lamellet, C. (2005, Mars). *Les déficits exécutifs en conduite automobile. Etude dans la Maladie d'Alzheimer et le Traumatisme Crânien*. 1^{er} Séminaire du Réseau Attention (RESAT). Lyon, France.

Marin-Lamellet, C., & Etienne, V. (2007). Efficience cognitive de traumatisés crâniens modérés ou graves et accès à la conduite automobile : Suivi longitudinal dans la région Rhône-Alpes. Rapport final de Convention CNSR-INRETS/LESCOT, 132 p.

Marin-Lamellet, C., & Etienne, V. (2006). *Les démences*. in A. Chapon, C. Gabaude & A. fort (Eds). Défauts d'attention et conduite automobile : Etat de l'art et nouvelles orientations pour la recherche dans les transports. p. 66-68. Collection INRETS.

Marin-Lamellet, C., & Etienne, V. (2006). *Les séquelles du traumatisme crânien*. in A. Chapon, C. Gabaude & A. fort (Eds). Défauts d'attention et conduite automobile : Etat de l'art et nouvelles orientations pour la recherche dans les transports. p. 69-71. Collection INRETS.

Glossaire

AST :	<i>Anti-Saccade Test</i>
CDR :	Clinical Dementia Rating
CDT :	Clock Drawing Test
CVLT :	California Verbal Learning Test
CVU :	Champ Visuel Utile
GREFEX :	Groupe de Réflexion sur l'Évaluation des Fonctions EXécutives
INRETS :	Institut national de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
LESCOT :	Laboratoire d'Ergonomie et de Sciences COgnitives pour les Transports
LGT :	Local global Test
M :	Moyenne
MCI :	Mild Cognitive Impairment
MCST :	Modified Card Sorting test (version de Nelson, 1976)
MMSE :	Mini Mental State Evaluation
MSIS :	Laboratoire Modélisation, Simulation et Simulateurs de conduite
PASAT :	Paced Auditory Serial Addition Test
SD :	écart-type
SST :	Stop Signal Test
TAG :	Tourne-à-gauche
TdL :	Test de la Tour de Londres
TEP :	Tomographie par émission de positrons
TMoT :	Tone Monitoring Test
TMT :	Trail Making Test
TR :	Temps de réponses
UFOV :	Useful Field of View
WCST :	Wisconsin Card Sorting Test

Contrat de diffusion

Ce document est diffusé sous le contrat Creative Commons « Paternité – pas d'utilisation commerciale - pas de modification » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.

Introduction Générale

Notre début de XXI^{ème} siècle est marqué par des phénomènes démographiques particuliers. En effet, la plupart des pays industrialisés voient leur population vieillir considérablement. Quels que soient les hypothèses et scénarii démographiques, la croissance de la population des personnes âgées est plus importante que celle des jeunes. Les générations du baby-boom, nées entre 1945 et 1965 atteindront l'âge de 65 ans entre 2010 et 2030. En France, si les tendances démographiques actuelles se maintiennent, on estime qu'au cours des 50 prochaines années, la population des plus de 65 ans augmentera d'environ dix millions d'individus. C'est dans le plus haut de la pyramide des âges que la croissance sera la plus spectaculaire. En effet, l'effectif des 75-85 ans triplera d'ici à 2050, et celui des plus de 85 ans va quadrupler .

Par ailleurs, l'amélioration de l'état général de santé des personnes vieillissantes et l'augmentation du nombre de conductrices âgées – les femmes ayant leur permis aujourd'hui dans la même proportion que les hommes – vont entraîner un accroissement considérable du nombre de conducteurs âgés, ceci dans un contexte d'augmentation générale du trafic. Cette augmentation du nombre de conducteurs âgés interroge à la fois les pouvoirs publics et la communauté scientifique parce qu'elle peut s'accompagner d'une augmentation du risque d'accident. Bien qu'il existe encore à l'heure actuelle un débat concernant les données accidentologiques , il semblerait que le risque d'accident augmente avec l'âge et que les conducteurs de plus de 65 ans ont un risque d'accident quasiment équivalent à celui des jeunes conducteurs . Ce qui interroge la communauté scientifique concerne les raisons de cette probabilité accrue d'accident dans le vieillissement. Si l'on sait que chez les jeunes conducteurs, ce sont les facteurs de

manque d'expérience et de prise de risque plus importante qui entraînent une accidentologie plus importante, on estime que ce sont plutôt les modifications du système cognitif qui interviennent dans les modifications de comportement des conducteurs âgés. En effet, la conduite automobile qui semble être, pour la plupart des gens, une activité banale, routinière et tout à fait automatique est en réalité une activité complexe qui fait intervenir le système cognitif à tous les niveaux.

Grâce aux travaux réalisés par la psychologie cognitive, qui s'est intéressée à cette activité, on sait aujourd'hui que, bien qu'un grand nombre de ses aspects soient effectivement automatisés et qu'ils interviennent sans prise de conscience, il reste une part importante de cette activité qui doit s'effectuer sous un contrôle cognitif important. Cette notion de contrôle cognitif fait référence à celle de « contrôle exécutif ». En effet, le système exécutif est un système cognitif de haut niveau qui a pour rôle principal de faciliter l'adaptation du sujet à des situations nouvelles ou non routinières, lorsque les stratégies automatiques et les routines d'actions ne suffisent pas à gérer la situation en cours .

L'activité de conduite requiert en permanence que le conducteur fasse appel à des routines d'actions bien automatisées, pour la gestion des commandes par exemple, mais aussi qu'il puisse ajuster son comportement et mettre en place des adaptations lorsqu'une situation inhabituelle survient. Le fonctionnement exécutif est le système qui va prendre en charge cette adaptation pour permettre la gestion de la situation. En effet, la plupart du temps et ce, sous l'effet de l'expérience, la conduite consiste en des séquences comportementales stéréotypées et automatiques mais il est également nécessaire d'effectuer des retours fréquents à des séquences qui sont sous le contrôle exécutif et attentionnel . Il nous paraît donc essentiel de nous intéresser spécifiquement au fonctionnement exécutif afin de mieux comprendre comment il intervient pendant la conduite automobile.

Par ailleurs, le vieillissement cognitif s'accompagne de modifications plus ou moins importantes d'un point de vue physique, psychologique et cognitif. Un nombre croissant d'études tendent à montrer que le système exécutif est également sensible aux effets du vieillissement, mais des interrogations subsistent en ce qui concerne les aspects spécifiques du fonctionnement exécutif qui seraient modifiés dans le vieillissement. En outre, lorsque l'on envisage le vieillissement cognitif, il est important de tenir compte des formes pathologiques qui peuvent l'accompagner. Les pathologies cognitives peuvent concerner différents processus, tels que l'attention, le langage, la mémoire ou encore le fonctionnement exécutif. La pathologie cognitive qui touche le plus les adultes âgés est la maladie d'Alzheimer . Cette maladie touche en France près d'un million de personnes et a récemment été déclarée grande cause nationale par le gouvernement. Dans ses stades avancés, cette démence entraîne en effet une dépendance et une perte d'autonomie importantes du patient. En revanche, dans le début de la maladie, le patient a peu conscience de ses déficits et tient particulièrement à son indépendance.

Cette démence dégénérative se définit par un déclin des capacités de mémoire, de langage, mais aussi du système exécutif. Si dans les stades avancés de maladie d'Alzheimer, l'arrêt de la conduite se fait de manière relativement naturelle, ce n'est pas le cas dans les stades débutants de la maladie où le patient n'a pas conscience de ses

déficits et se trouve en forte demande d'autonomie. C'est pourquoi, comme pour le vieillissement normal, des questions se posent sur le risque d'accident de ces conducteurs et sur les causes de cet éventuel sur-risque.

Dans ce contexte, il nous paraît important de nous intéresser, à la fois, à la manière dont la conduite automobile implique les fonctions exécutives et aux conséquences de la dégradation du fonctionnement exécutif sur l'activité de conduite, dans le vieillissement normal ainsi que dans le vieillissement pathologique. Nous nous plaçons dans le cadre de l'approche neuropsychologique, qui cherche à investiguer un système en étudiant les effets de sa dégradation. Nous allons donc chercher à mieux comprendre comment les fonctions exécutives interviennent dans la conduite automobile en nous intéressant aux conducteurs vieillissants. Notre travail de recherche présente à la fois des aspects fondamentaux d'amélioration des connaissances concernant l'implication des fonctions cognitives dans la conduite automobile et des aspects appliqués, permettant de mieux appréhender le vieillissement normal et le vieillissement pathologique en vue de proposer des outils de dépistage des conducteurs à risque.

Présentation du document

Ce document est composé de deux parties distinctes, l'une concernant le contexte théorique, l'autre ayant pour but de présenter notre travail expérimental.

La première partie est scindée en trois chapitres. Nous exposerons dans un premier temps ce que représentent les fonctions exécutives, ainsi que notre choix théorique qui s'est porté sur la modélisation de Miyake *et al.* . Puis, nous présenterons la conduite automobile en tant qu'activité cognitive et nous nous focaliserons sur l'implication des mécanismes exécutifs. Dans le second chapitre, nous nous intéresserons au vieillissement cognitif et plus particulièrement au vieillissement du fonctionnement exécutif, puis nous tenterons de mettre en lien ces aspects avec ceux de la conduite automobile. Enfin, le troisième et dernier chapitre de cette présentation théorique sera consacré à la présentation de la maladie d'Alzheimer. Nous observerons le même déroulement théorique que pour le vieillissement normal, en présentant d'abord les effets cognitifs de cette démence dégénérative en se focalisant également sur le fonctionnement exécutif, puis nous nous intéresserons à la littérature concernant la conduite automobile chez les patients avec maladie d'Alzheimer.

La seconde partie de notre travail présentera nos expérimentations et les résultats obtenus. Le premier chapitre consistera à présenter en détails le matériel utilisé, d'une part une batterie neuropsychologique d'évaluation du fonctionnement exécutif, d'autre part une expérimentation sur simulateur de conduite. Trois échantillons de participants seront comparés, des conducteurs jeunes, des conducteurs âgés en bonne santé et des conducteurs en stade précoce de maladie d'Alzheimer.

Le second chapitre sera consacré à l'analyse des résultats concernant l'évolution des fonctions exécutives dans le vieillissement, d'un point de vue neuropsychologique, puis nous analyserons les résultats concernant les expérimentations en situation de conduite. Enfin, nous comparerons les résultats obtenus par les jeunes conducteurs à ceux obtenus par les conducteurs âgés sains.

Le troisième chapitre sera consacré à l'analyse des résultats obtenus par les patients

avec maladie d'Alzheimer, dans lequel nous comparerons les résultats obtenus par les patients à ceux obtenus par les conducteurs âgés en bonne santé.

Nous discuterons ces résultats et les replacerons dans leur contexte scientifique et méthodologique. Enfin nous proposerons quelques perspectives de poursuite de ce travail, concernant à la fois les aspects fondamentaux d'amélioration des connaissances sur l'implication des fonctions exécutives dans la conduite automobile et concernant les aspects appliqués, en vue de proposer des outils d'évaluation et/ou de réadaptation à la conduite automobile pour des patients avec déficits cognitifs.

Partie 1 – Contexte Théorique

Chapitre 1. Fonctionnement exécutif et conduite automobile

1. Le Fonctionnement exécutif

Dans une acception très générale, le terme de « fonctions exécutives » renvoie à un ensemble complexe de mécanismes cognitifs qui permettent d'organiser, de contrôler et de réaliser nos actions et nos pensées . Parmi ces mécanismes, la planification de séquences d'actions, l'inhibition de réponses automatiques, la flexibilité et l'ajustement attentionnel, l'organisation des procédures en mémoire de travail, sont quelques exemples de ce que recouvre ce terme général. La notion des fonctions exécutives recouvre partiellement celle de l'attention, du raisonnement ou encore celle de la mémoire de travail. Le système exécutif est depuis longtemps associé au cortex préfrontal ainsi qu'aux voies qui lui sont reliées. Cette observation a d'abord été étayée par les études en neuropsychologie puis par les études en imagerie cérébrale .

Cette section présente tout d'abord un aperçu historique de l'apparition du concept de « fonctions exécutives » puis elle expose comment elles ont été modélisées en systèmes

en vertu de la loi du droit d'auteur.

en raison de leur complexité et de leurs liens avec les autres fonctions cognitives.

1.1. Naissance du concept : du syndrome frontal au syndrome dysexécutif

1.1.1. Repères historiques

Historiquement, l'étude du rôle du cortex frontal a débuté avec la description des troubles comportementaux du cas Phineas Gage, par son médecin, Harlow en 1868. Phineas Gage travaille à cette époque à la construction d'une ligne de chemin de fer. Suite à une explosion, une barre de fer (une barre à mine) lui traverse accidentellement le crâne et provoque des lésions frontales importantes. Il survit cependant à son accident et ne conserve que peu de séquelles physiques (troubles visuels). Mais alors qu'il était jusqu'à ce moment considéré comme sociable et fiable, cette blessure semble avoir eu des effets importants sur son comportement. Son humeur changeante, son tempérament devenu grossier et capricieux lui font changer souvent de travail. Lorsque ce cas est rapporté à la communauté scientifique, il provoque des changements dans la perception de la fonction et de la segmentation du cerveau en ce qui concerne les émotions et la personnalité (localisation des fonctions). Cependant, aucun élément n'a été décrit à cette époque concernant les capacités intellectuelles de Gage. Son médecin explique seulement que Gage avait de grandes difficultés quand il s'agissait de prendre des décisions, aussi simples que celle consistant à choisir un menu sur la carte d'un restaurant, et qu'il avait également des difficultés à planifier ses activités et à arriver à l'heure à son travail .

Puis, de la fin du dix-neuvième jusqu'à la moitié vingtième siècle, le concept de « troubles frontaux » tombe dans l'oubli. Il faudra attendre la deuxième moitié du vingtième siècle et les blessés de la Seconde Guerre Mondiale pour que réapparaissent la notion de syndrome frontal et son versant cognitif avec les travaux de Luria dans les années soixante . Luria s'est en effet vivement intéressé aux structures cérébrales frontales et au rôle qu'elles jouent dans la cognition humaine. Il a proposé une décomposition du cerveau en trois unités fonctionnelles distinctes : la première inclut la partie supérieure du tronc cérébral et le lobe limbique et joue un rôle dans les processus affectifs et la motivation ; la seconde comprend la partie postérieure du cortex, elle traite et stocke les informations externes et la troisième est constituée par le cortex frontal et a pour rôle de « programmer, réguler et contrôler les mouvements et l'activité » . Par ailleurs, lorsqu'il s'est intéressé à l'étude des grandes fonctions cognitives, Luria a proposé une approche systémique de la fonction . En effet, selon lui, les grandes fonctions cognitives humaines représentent des « systèmes fonctionnels » et impliquent la mise en jeu de « facteurs » différents, chaque facteur pouvant intervenir dans différents systèmes fonctionnels. Avec cette approche, Luria pose les bases des études neuropsychologiques du fonctionnement cognitif et plus particulièrement du fonctionnement des lobes frontaux . Il a plus spécialement concentré ses recherches sur cette troisième unité du cerveau. En effet, c'est à ce niveau que s'élabore la programmation des actions les plus complexes et que s'effectue le contrôle de leur réalisation. Le modèle proposé par Luria repose sur quatre étapes fondamentales, (1) l'analyse des données initiales, (2) l'élaboration et l'organisation des activités programmées, (3) l'exécution du programme et (4) la comparaison entre l'action réalisée

et le plan d'action initial. Avec Luria, le cortex préfrontal prenait donc son rôle d'intégrateur des habiletés cognitives et de contrôle pour la résolution de problèmes .

Néanmoins, le terme de « fonctions exécutives » n'apparaîtra que beaucoup plus tard sous la plume de Lezak pour qui les fonctions exécutives comprennent les « capacités mentales nécessaires pour formuler des buts, élaborer des plans et les capacités permettant de les exécuter effectivement » . Lezak a également consacré une grande part de ses recherches à l'étude et à l'évaluation des fonctions exécutives . En français, c'est le terme de fonctions « exécutives » qui est resté, mais il provient évidemment de l'anglais « *executive* », ce terme signifiant plus exactement qu'il s'agit de fonctions de « contrôle » ou de fonctions « d'administration » plutôt que de fonctions « d'exécution ».

1.1.2. Du Syndrome frontal au syndrome dysexécutif

Comme cela a été décrit plus haut, les lésions du cortex préfrontal entraînent des troubles du comportement ainsi que des troubles cognitifs spécifiques . La manière la plus aisée pour définir les fonctions exécutives est donc de décrire comment elles se détériorent dans la pathologie et c'est l'objectif des études en neuropsychologie. En effet, les lésions frontales et les lésions des régions reliées au cortex frontal entraînent des déficits dysexécutifs . Ces déficits peuvent être divisés en deux types de troubles, d'une part les troubles comportementaux et d'autre part, les troubles cognitifs .

Troubles comportementaux

De nombreux troubles comportementaux ont été rapportés dans la littérature concernant les pathologies frontales, qu'elles soient acquises ou dégénératives ainsi que dans le vieillissement normal . Devant cette multiplicité, le Groupe de Réflexion sur l'Evaluation des Fonctions Exécutives a proposé une classification précise des principaux troubles comportementaux liés à une pathologie frontale. Ils classent les troubles en fonction de leur degré de spécificité. Ce projet de classement est aujourd'hui encore sous la forme d'hypothèses et fait toujours l'objet d'une étude multicentrique de validation. Nous n'entrerons pas ici dans le détail de la description de ces troubles, mais nous présenterons simplement un descriptif du syndrome frontal général. Le tableau suivant (Tableau 1) en présente une synthèse générale.

Le premier trouble spécifique rapporté par Godefroy *et al.* est le trouble d'hypoactivité globale, caractérisé par une réduction générale des activités spontanées, une certaine apathie et un désintérêt pour ce qui entoure le patient. A l'inverse, d'autres patients peuvent présenter une hyperactivité globale, caractérisée par une forte augmentation de l'activité générale, une distractibilité plus importante, une augmentation du débit de parole sans augmentation du contenu (pauvreté du discours) ainsi que des réactions inappropriées et exagérées à l'environnement avec, le plus souvent, une désinhibition sociale. Les comportements stéréotypiques constituent le troisième type de troubles spécifiques et consistent en une persévération et une répétition de mouvement qui ne sont plus adaptés à la situation. Il s'agit de répétitions invariables de certains comportements, attitudes ou phrases.

Selon Godefroy *et al.* certains de ces troubles comportementaux pourraient en fait être associés à des déficits cognitifs et plus particulièrement à des déficits exécutifs. Ainsi, les persévérations et stéréotypies pourraient s'expliquer par des déficits de la flexibilité mentale, la distractibilité pourrait être liée à des troubles de la sélection attentionnelle et la confabulation pourrait s'expliquer, selon Godefroy *et al.*, par des troubles dans la sélection de souvenirs pertinents. De plus, les comportements d'utilisation et d'imitation sont fréquents dans la pathologie frontale. Ils pourraient également être expliqués comme la conséquence de troubles cognitifs de persévération mentale et d'un manque de flexibilité conceptuelle .

Tableau1. Principaux troubles comportementaux liés au syndrome dysexécutif.

Troubles spécifiques :	
	Hypoactivité globale avec aboulie et/ou apathie et/ou aspontanéité Hyperactivité globale avec distractibilité et/ou impulsivité et/ou désinhibition Persévération de règles opératoires et comportement stéréotypé Syndrome de dépendance à l'environnement
Troubles à l'étude :	
	Confabulation et paramnésies réplicatives Anosognosie et anosodiaphorie Troubles émotionnels et troubles du comportement social Troubles du comportement alimentaire, sexuel et sphinctérien

Source : Godefroy et al. , p. 900, Tableau 1.

En résumé, bien que les troubles comportementaux soient un versant incontournable du syndrome dysexécutif, il semblerait que les troubles cognitifs impliqués puissent expliquer une grande part de ces troubles comportementaux. Dans le cadre de notre travail, nous nous focaliserons uniquement sur ces troubles cognitifs.

Troubles cognitifs

Outre les troubles comportementaux qui apparaissent généralement, les troubles cognitifs sont quasiment toujours présents. Ils sont observés après des atteintes des régions frontales et concernent diverses pathologies neurologiques, telles que le traumatisme crânien , la démence fronto-temporale , les troubles schizophréniques , ou encore les pathologies telles que la maladie d'Alzheimer ou la maladie de Parkinson . Ces déficits cognitifs se traduisent par des troubles d'initiation et d'inhibition de l'action , des déficits d'attention divisée et de coordination , des déficits dans la résolution de problème complexes , ou encore dans le maintien et la mise à jour des informations en mémoire de travail .

Petit à petit, la notion de syndrome « frontal » va disparaître au profit de la notion de « syndrome dysexécutif » pour différentes raisons. D'une part l'avancée des techniques d'imagerie cérébrale a permis d'observer que des tests neuropsychologiques censés

évaluer les capacités exécutives impliquaient des régions cérébrales étendues bien au delà du cortex frontal . Les lobes frontaux sont d'autre part étroitement connectés avec un grand nombre de structures corticales et sous-corticales et des perturbations des fonctions exécutives peuvent également être observées chez des patients sans lésions du cortex préfrontal . En résumé, la définition des fonctions exécutives et du système exécutif par la description des conséquences des lésions a permis de poser les contours généraux de ce que le système exécutif peut englober.

Il semble à présent important de spécifier le rôle exact du système exécutif chez le sujet sain, ainsi que de spécifier quelles opérations cognitives il implique, ceci dans le but d'en présenter une modélisation générale. La partie suivante présente d'une part les définitions les plus courantes et les caractéristiques générales des fonctions exécutives et d'autre part un état des modèles théoriques de description du système exécutif, ainsi que le modèle retenu dans le cadre de ce travail de recherche, celui de Miyake *et al.* .

1.2. Définitions et modélisations du système exécutif

1.2.1 Définitions

Van der Linden *et al.* proposent que le rôle principal des fonctions exécutives est de faciliter l'adaptation du sujet à des situations nouvelles et ce notamment lorsque les routines d'actions, c'est-à-dire les habiletés cognitives surappries, ne peuvent suffire. Les fonctions exécutives semblent donc commencer là où la tâche requiert la mise en œuvre de processus contrôlés. Cette première définition montre que le système exécutif n'est pas un système simple et unitaire et qu'il regroupe un ensemble de processus différenciés jouant des rôles différents dans l'adaptation des comportements humains . Le système exécutif peut être considéré comme le chef d'orchestre du cerveau humain. Afin de distinguer les fonctions relevant du système exécutif de celles relevant d'autres processus cognitifs, il faut distinguer en premier lieu les processus dits « automatiques » des processus « volontaires » ou contrôlés . L'activité automatique prend en charge les tâches et les processus surappris, souvent répétés et leur exécution nécessite ainsi peu de ressources cognitives. La plupart de nos activités quotidiennes relèvent de ces processus automatiques. En revanche, lorsque les schémas automatiques ou les routines d'action ne peuvent permettre de gérer la situation en cours, ce sont des processus volontaires qui prennent la relève. Ces processus volontaires nécessitent un contrôle conscient de la situation et ils sont plus coûteux en ressources cognitives. Dans ces situations, la mise en œuvre des fonctions exécutives est requise. Ces fonctions exécutives se déclinent en un grand nombre de processus, incluant généralement le contrôle de l'attention, la capacité à diviser son attention , le maintien de l'attention pendant une durée prolongée, la manipulation mentale des informations en mémoire de travail, l'inhibition des réponses ou des informations non pertinentes, la planification, l'élaboration et la vérification d'hypothèses, la pensée abstraite ou encore le jugement et l'autocritique. Le système exécutif est donc un vaste système regroupant sous son nom un grand nombre de processus et de fonctions.

En résumé, le système cognitif est un système complexe qui a son siège dans les

régions frontales du cerveau mais qui ne s'y limite pas. Il a longtemps été considéré comme un système « fourre-tout » où l'on rangeait toutes les fonctions cognitives de haut niveau. La description du système exécutif fait par ailleurs appel à des approches qui se recouvrent partiellement et qui sont importantes dans le champ de recherche de la psychologie cognitive : les notions de mémoire de travail et de contrôle attentionnel. La partie suivante présente les principaux modèles développés en psychologie cognitive qui ont abouti à une modélisation du système exécutif. Ensuite, nous présenterons le modèle retenu dans le cadre de ce travail de thèse, le modèle modulaire de Miyake *et al.* et les raisons qui ont motivé ce choix.

1.2.2. Premiers modèles : la mémoire de travail

La notion de fonctions exécutives ou de système exécutif est généralement reliée à celle de contrôle attentionnel ou de mémoire de travail. C'est pourquoi il semble important de présenter ici les principaux modèles du contrôle attentionnel/exécutif. Le concept de mémoire de travail est en effet une construction théorique utilisée en psychologie cognitive pour « décrire le système qui sous-tend la capacité de maintenance des informations prépondérantes nécessaires à l'accomplissement d'une activité cognitive » .

Distinction de Schneider et Shiffrin (1977)

Schneider et Shiffrin introduisent pour la première fois dans la littérature sur l'attention et le contrôle attentionnel, la notion essentielle de distinction entre processus **automatiques** et processus **contrôlés**. Tout processus qui ne consomme pas de ressource attentionnelle et qui ne diminue pas la capacité générale de traitement restant disponible pour d'autres traitements est appelé « processus automatique » . En revanche, un processus dit « contrôlé » implique une capacité limitée, mobilise des ressources importantes, mais est adaptable à de nombreuses situations.

Cette distinction maintenant ancienne entre les deux types de processus a profondément marqué les orientations de recherche concernant le fonctionnement attentionnel. Cependant, certains auteurs ont rapidement critiqué les interprétations trop « abruptes » des résultats de Schneider et Shiffrin. C'est notamment le cas de l'équipe de Norman et Shallice qui ont nuancé cette distinction et introduit la distinction entre processus entièrement ou partiellement automatiques.

Modèle du SAS de Norman et Shallice (1986)

L'un des modèles qui a reçu le plus d'attention dans les années 80 est certainement la conception proposée par Norman et Shallice . Dans leur modèle (Figure 1), Norman et Shallice décrivent trois niveaux de contrôle qui sont chacun caractérisés par des programmes d'actions fonctionnellement différents. Le premier niveau est composé des processus **entièrement** automatiques, qui suivent des plans organisés mais rigides, appelés **schémas d'action**. Le second niveau, le niveau des processus **partiellement** automatiques, implique un système de contrôle appelé **gestionnaire des conflits**, où des données conscientes jouent un faible rôle mais permettent la sélection d'un schéma d'action plus approprié en cas de conflit ou de nouvelles contraintes dans la situation.

Enfin, si la tâche exige une prise de décision, une planification ou encore l'inhibition volontaire de réponses non pertinentes, le **système attentionnel superviseur** (SAS), qui constitue le troisième niveau, entre en jeu. Il implique des processus conscients et coûteux en ressources cognitives, mais également plus souples et permettant la gestion des situations nouvelles ou non routinières.

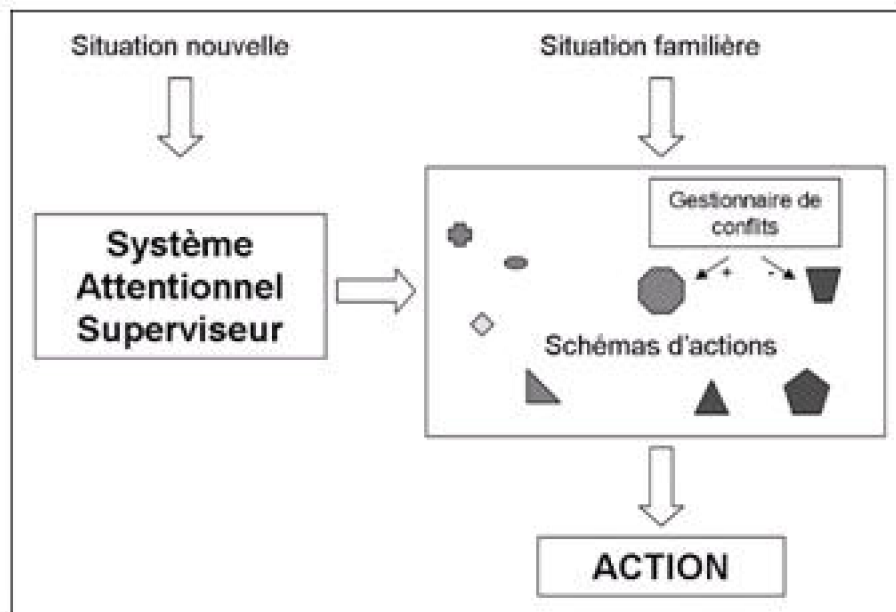


Figure 1. Modèle du contrôle attentionnel selon Norman et Shallice (1986)

Source : D'après Meulemans

Administrateur exécutif central selon Baddeley

Baddeley reprend les notions introduites par Norman et Shallice (1986), puis introduit le concept clé de **mémoire de travail**. Selon lui, mémoire et attention sont deux notions qui ne peuvent être disjointes. Il introduit également le concept de **système exécutif central**. Ainsi la notion de contrôle exécutif est-elle intégrée dans le fonctionnement des processus mnésiques par le biais du système exécutif central. La mémoire de travail n'est donc pas considérée comme un lieu de stockage d'information mais plutôt comme un ensemble de processus de traitement. Le modèle de Baddeley est ainsi constitué de l'administrateur central (qu'il assimile d'ailleurs au SAS de Norman et Shallice) et de deux systèmes périphériques, la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial. Baddeley attribue à l'exécutif central deux fonctions majeures, la première étant une fonction de contrôle : l'exécutif central est ainsi capable de sélectionner les stratégies cognitives et de coordonner l'information provenant des systèmes esclaves (Figure 2). La seconde fonction consiste pour l'exécutif central à affecter une partie de ses capacités à l'augmentation des quantités d'informations qui doivent être maintenues par les systèmes périphériques. Cette combinaison des fonctions implique qu'il existe au sein de l'exécutif central une forme de planification volontaire et de contrôle, ainsi qu'une forme de composante de traitement des ressources disponibles.

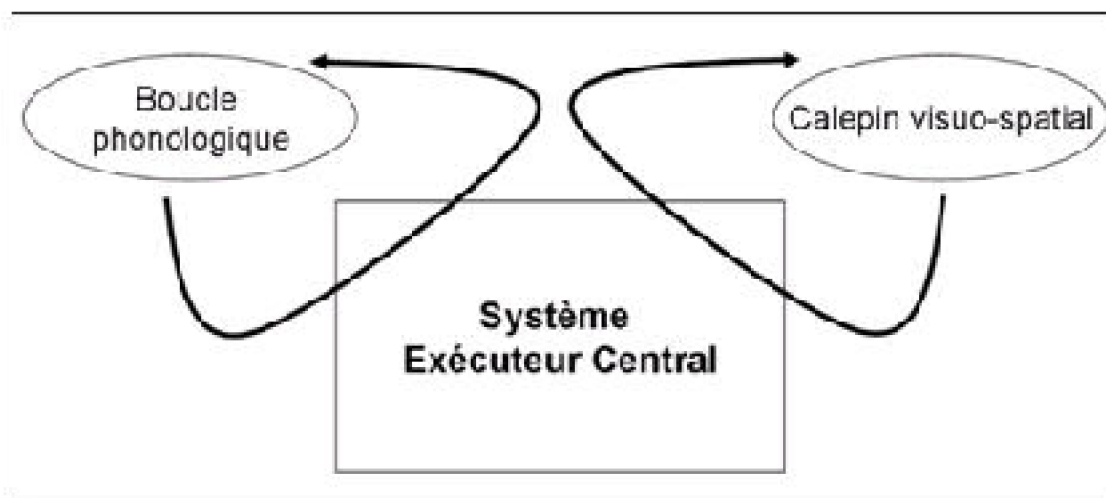


Figure 2. Modèle de la mémoire de travail selon Baddeley (1986)

Source : D'après Baddeley et al.

En définitive, ces trois modèles de description de la mémoire de travail et des processus attentionnels ont permis de placer le système exécutif au centre des études sur l'attention et sur le fonctionnement cognitif supérieur. D'autres modèles moins connus ont également vu le jour à partir des années 90 : des modèles connexionnistes, des modèles issus des neurosciences, comme le modèle du contrôle cognitif de Miller et Cohen ou le modèle en cascade de Koechlin. Ces modèles ne seront pas décrits ici, mais un ouvrage récent en recense une partie et présente les points forts de chacun. Ces différentes conceptions ont souvent privilégié un système de contrôle unique permettant de coordonner tous les processus exécutifs sous-jacents, mais certaines données actuelles issues de la neuropsychologie semblent remettre en cause cette approche. De plus, Baddeley, dans son article présentant l'exécuteur central (1996) se positionne également en faveur d'une conception modulaire de celui-ci. Toutefois la question de savoir si l'exécuteur central peut être envisagé comme un système coordinateur de multiples sous-systèmes exécutifs ou alors comme un ensemble de processus autonomes demeure ouverte dans sa conclusion.

Dans le cadre de notre travail de doctorat consacré à la mise en évidence du rôle des fonctions exécutives et du vieillissement dans le cadre particulier de la conduite automobile (décrit plus loin), une conception plus souple et modulaire du fonctionnement exécutif nous a paru plus pertinente à envisager, de par ses aspects dynamiques et l'indépendance relative des composantes sous-jacentes. Le modèle proposé par Miyake *et al.* semblait donc le plus à même de répondre à ces contraintes. C'est en effet le modèle modulaire du fonctionnement exécutif le plus élaboré à l'heure actuelle. La section suivante est consacrée à la description de ce modèle ainsi que des composantes qui le constituent.

1.2.3. Modélisation de Miyake *et al.* (2000)

Comme cela a été présenté plus haut, au fur et à mesure des avancées scientifiques concernant la modélisation du système exécutif, les modèles unitaires ont été de plus en plus remis en cause au profit des modèles modulaires du fonctionnement exécutif. Dans le cadre de notre travail de thèse nous avons choisi de décrire et d'utiliser le modèle présenté par Miyake *et al.* . Cette partie est consacrée à la description détaillée de ce modèle et des composantes qui le constituent.

Conceptions générales

L'un des buts du travail présenté par Miyake et ses collaborateurs était de montrer que l'on ne peut pas considérer le système exécutif comme un système unitaire. Ils vont donc chercher à proposer des bases empiriques permettant une meilleure modélisation du fonctionnement exécutif. Partant d'une revue de littérature sur le sujet, ils font le constat que les études en neuropsychologie, tout comme les études en neuroimagerie, vont dans le sens de cette « non-unitarité » du système. Cependant, aucune étude n'avait jusqu'alors tenté de proposer une modélisation du système exécutif en différents modules et, surtout, aucune n'avait explicitement présenté ces modules en détail. Ils décident alors de poser des bases empiriques pour développer une théorie permettant de spécifier comment les fonctions exécutives sont organisées et quel rôle elles jouent dans le fonctionnement cognitif complexe. Ils font également le constat que les fonctions exécutives se manifestent en opérant sur d'autres fonctions cognitives et que donc aucune tâche exécutive ne peut être « pure » : elles impliquent toutes fortement d'autres processus cognitifs qui ne relèvent pas directement du fonctionnement exécutif. Inversement, un grand nombre de tâches cognitives censées évaluer une fonction particulière impliquent des fonctions exécutives, en raison de leur complexité ou du caractère nouveau et non routinier de la tâche.

Par ailleurs, les études portant sur les fonctions exécutives montrent un manque de fiabilité test – retest. Cela pourrait provenir d'un changement de stratégie de la part des sujets au cours d'une même expérience ou encore du fait que le propre des fonctions exécutives étant d'intervenir dans le cadre de la nouveauté, la répétition des tâches peut les rendre routinières. Le fait de diviser le système exécutif en différents modules plus simples et de proposer pour chacun de ces modules différentes tâches, devrait permettre de mieux comprendre comment le système fonctionne et comment il intervient dans l'élaboration des stratégies de résolution de problème.

Miyake *et al.* insistent également sur le fait que les études réalisées sur le fonctionnement exécutif, que ce soit dans des populations d'adultes sains, dans le vieillissement normal ou encore dans la pathologie frontale, utilisent des tâches exécutives pour lesquelles on connaît mal l'implication du système exécutif. C'est le cas par exemple du *Wisconsin Card Sorting Test (WCST)* ou du test de la *Tour de Londres (TdL)*. Ils sont très fréquemment utilisés comme mesures des performances exécutives, mais aucune donnée ne précise de quelle manière le système exécutif intervient dans ce type de tâche. Ainsi, le *WCST* a pu être considéré au fil du temps comme une mesure de shift mental, d'inhibition, ou encore de flexibilité, de résolution de problème, voire comme une mesure de la capacité de catégorisation. Il en est de même pour le *Trail Making Test (TMT)* qui a pu être considéré comme un test de flexibilité mentale pure, d'inhibition ou

encore d'alternance de règle. L'intérêt de l'étude de Miyake *et al.* a donc également été de proposer un découpage simple du système exécutif qui tient compte de la complexité de certaines tâches, tout en proposant des tâches simples pour chacun des modules considérés.

Leur intérêt s'est porté sur trois processus exécutifs spécifiques largement décrits dans la littérature : la **flexibilité mentale**, le contrôle et la **mise à jour** des informations en mémoire de travail et l'**inhibition** des réponses non pertinentes. Plusieurs raisons ont conduit les auteurs à sélectionner ces trois composantes. D'abord, ces trois fonctions sont relativement bien circonscrites, elles se situent à un niveau exécutif relativement bas et sont donc moins complexes que la fonction de planification ou de résolution de problème par exemple. Ensuite, il existe pour chacune de ces fonctions, des épreuves cognitives bien décrites dans la littérature et qui ont été démontrées comme spécifiques à chaque composante. Enfin, ces trois fonctions exécutives sont impliquées dans la plupart des processus exécutifs de plus haut niveau et entrent en jeu pour expliquer la performance à des tests complexes, tels que le *WCST*. Si l'on comprend mieux le fonctionnement des trois composantes de base du système exécutif, il sera donc ensuite plus facile d'expliquer ce que mesurent réellement les tests plus conventionnels et plus complexes, tels que le *WCST*, le *TMT* ou la *TdL*.

L'étude de Miyake *et al.* a ainsi consisté à étudier les liens fonctionnels existant entre ces trois fonctions et à spécifier si elles pouvaient être considérées comme tout à fait indépendantes ou non. La méthode qu'ils ont utilisée pour vérifier leurs hypothèses a été une analyse factorielle confirmatoire. La plupart des études qui s'étaient précédemment intéressées au caractère fractionné du fonctionnement exécutif utilisaient généralement des méthodes statistiques d'analyse factorielle exploratoire. Cependant, selon Miyake *et al.*, l'analyse factorielle exploratoire n'est pas la meilleure méthode pour montrer que les fonctions exécutives sont indépendantes car les faibles corrélations entre fonctions peuvent également refléter que les tâches utilisées impliquent d'autres processus cognitifs non-exécutifs différents qui masquent l'implication de processus exécutifs communs aux différentes tâches. La méthode de Miyake *et al.* est donc tout à fait originale dans le sens où elle utilise une analyse factorielle confirmatoire qui a permis de spécifier l'importance du lien entre les trois composantes sélectionnées. La principale différence entre l'analyse factorielle exploratoire et l'analyse factorielle confirmatoire est que, dans la première, le chercheur choisit le modèle qui explique le mieux les données sans fixer *a priori* le nombre de facteurs, alors que, dans l'analyse factorielle confirmatoire, le nombre de facteurs est imposé et l'interprétation consiste à étudier si le modèle explique correctement les données. Ils ont donc testé trois modèles factoriels, à un, deux puis trois facteurs.

Pour chaque composante, trois tests spécifiques ont été choisis en fonction de leur capacité à mesurer la **flexibilité mentale**, la **mise à jour** ou l'**inhibition**.

La flexibilité mentale a été évaluée par le *Plus-Minus Task (PMT)*, le *Local-Global Task (LGT)* et le *Number-Letter Test (NLT)*. Le *PMT* est un test papier-crayon qui consiste à présenter trois listes de 30 nombres à deux chiffres sur une feuille de format A4. Sur la première liste, le participant doit ajouter « 3 » à chaque nombre et écrire sa réponse sur la feuille. Sur la seconde liste, la tâche consiste à soustraire « 3 » à chaque nombre et écrire

la réponse. Enfin, sur la troisième liste, le participant doit alternativement ajouter « 3 » au premier nombre, soustraire « 3 » au deuxième nombre, puis continuer en alternant. Le participant doit remplir chaque liste le plus rapidement et le plus précisément possible. Les temps de réalisation et les erreurs sont pris en compte pour chaque liste. Le « coût du shift » est calculé par la différence entre le temps de réalisation à la troisième liste et la moyenne des temps de réalisation aux deux premières listes.

Le *LGT* est inspiré des figures de Navon . En effet, une figure « globale » (par exemple un triangle) est en fait composée de petites figures « locales » (par exemple des carrés). Chaque figure est présentée sur un écran d'ordinateur et selon la couleur de la figure, le participant doit donner le nombre de lignes (1 pour un cercle, 2 pour une croix, 3 pour un triangle, 4 pour un carré) qui composent soit la figure globale si elle est en bleu, soit la figure locale si elle est en noir. A chaque item, la couleur change du bleu au noir, les participants doivent donc alterner entre le traitement de la figure locale et le traitement de la figure globale. Les temps de réponse vocaux sont enregistrés pour chaque item.

Enfin, la troisième tâche sélectionnée pour évaluer la flexibilité mentale était le *Number-Letter Test, NLT* . Ce test informatisé consiste à présenter sur un écran divisé en quatre quadrants, une paire lettre-chiffre (par exemple : 7-G). La tâche du participant consiste à dire si la lettre est une voyelle ou une consonne lorsque la paire est présentée dans l'un des deux quadrants du bas de l'écran et de dire si le chiffre est pair ou impair lorsque la paire est présentée dans l'un des deux quadrants du haut de l'écran. A chaque essai, la paire se déplace sur l'écran d'un quadrant à l'autre en effectuant une rotation horaire, ainsi, une fois sur deux le participant doit alterner entre le traitement de la lettre et le traitement du chiffre. Les temps de réponse et les erreurs sont également enregistrés et le coût du shift est calculé comme pour le PMT par la différence entre le temps de réponse aux items avec flexibilité et les items sans flexibilité.

La mise à jour des informations en mémoire de travail a été évaluée avec trois autres tests, le *Keep-Track Test (KTT)*, le *Tone Monitoring Test (TMoT)* et le *Letter Memory Test (LMT)*. Le *KTT* est une tâche informatisée dans laquelle on présente au participant 15 mots en bas de l'écran. Chaque mot représente un exemplaire d'une catégorie, il y a six catégories au total (animaux, couleurs, pays, distances, métaux, liens de parenté). A la fin de l'essai, le participant doit rappeler le dernier mot présenté pour chaque catégorie. Le sujet doit donc constamment mettre à jour les informations perçues afin de mémoriser le nouveau mot de chaque catégorie pour savoir s'il s'agit du dernier à rappeler à la fin.

Le *TMoT* consiste à présenter quatre séries de 25 sons (8 de fréquence basse, 220Hz, 8 de fréquence moyenne, 440 Hz et 8 de fréquence élevée, 880Hz et un son supplémentaire à l'une des trois fréquences) de manière aléatoire. La tâche du participant est de détecter lorsque le quatrième son de chaque fréquence apparaît. La variable mesurée est la proportion de réponses correctes.

La troisième tâche de mise à jour était le *LMT* . Cette tâche informatisée consiste à présenter séquentiellement des lettres sur un écran. Chaque lettre est présentée pendant 2 s et la tâche du participant consiste à rappeler à la fin de chaque séquence les quatre dernières lettres présentées. Seulement, le participant n'est pas averti à l'avance de la longueur de la séquence qui varie de 5 à 11 lettres. La variable mesurée est la proportion de lettres correctement rappelées.

Enfin, la troisième composante exécutive, l'inhibition, était également évaluée à l'aide de trois tests, le *Stroop Test*, le *Stop-Signal Test (SST)* et l'*Antisaccade Test (AST)*.

Le *Stroop* est l'un des tests les plus classiques de mesure de l'inhibition d'une réponse automatique. La version utilisée par l'équipe de Miyake était informatisée. Dans la condition interférente, un nom de couleur (bleu, vert, rouge, orange, jaune ou violet) apparaît à l'écran et est écrit d'une couleur différente (parmi les six possibles) et le sujet doit nommer le plus rapidement possible la couleur de l'encre avec laquelle le mot est présenté. Dans la condition dénomination, une série d'astérisques est présentée et le sujet doit nommer la couleur de présentation des étoiles. Les temps de réponse ainsi que la proportion de réponses correctes servent de variables de mesure.

Le *SST* est également une tâche informatisée. Elle consiste en deux parties distinctes. Dans la première partie, on présente un mot à l'écran parmi une liste de 24 mots et la tâche de sujet consiste à catégoriser le plus rapidement possible ce mot, selon qu'il s'agit ou non d'un animal. Dans la seconde partie, la condition *stop signal*, la tâche est identique, mais on demande au participant de ne pas répondre lorsqu'il entend un son émis par l'ordinateur (pour le quart des mots). Il est demandé aux participants de ne pas tenter de ralentir la réponse pour anticiper l'apparition du signal ; si l'expérimentateur remarque un ralentissement il prévient le sujet et lui demande de répondre aussi rapidement que dans la première partie de l'épreuve.

Enfin, l'*AST*, la troisième tâche d'inhibition, est également un test informatisé dans lequel un point de fixation est présenté à l'écran pendant un temps variable (1500 à 3500 ms, avec des intervalles de 250 ms). Un indice visuel apparaît alors d'un côté de l'écran pendant 250 ms, puis le stimulus cible apparaît de l'autre côté de l'écran pendant 150 ms et est remplacé par un masque. Le stimulus cible représente une flèche et la tâche du sujet est de donner le plus rapidement possible la direction de la flèche. Comme la flèche n'est présente à l'écran que 150 ms, le sujet doit inhiber la saccade oculaire automatique consistant à diriger le regard vers l'indice visuel préalablement présenté. La variable de mesure est la proportion de cibles correctement identifiées.

L'analyse des résultats a porté sur 137 participants jeunes et a consisté à faire entrer les neuf variables manifestes (les neuf tests) dans un modèle explicatif à un facteur, un modèle à deux facteurs et un modèle à trois facteurs. La logique de l'analyse consistait à conclure que (1) si les trois composantes exécutives sont des construits distincts, alors le modèle à trois facteurs concordera le mieux avec les données ou (2) si les trois composantes exécutives sont complètement unitaires, alors ce sera le modèle à un facteur qui s'adaptera le mieux aux données.

Les résultats indiquent que c'est le modèle à trois facteurs qui permet d'expliquer significativement au mieux la variance obtenue. Le modèle à un facteur est le moins bon : il n'explique qu'une part réduite et non significative de la variance totale des variables latentes. Miyake *et al.* ont également testé les trois modèles possibles à deux facteurs, en regroupant la flexibilité et la mise à jour, la flexibilité et l'inhibition, puis la mise à jour et l'inhibition. Aucun de ces trois modèles ne convient statistiquement à l'explication de la variabilité. Les auteurs concluent qu'aucune paire de composantes exécutives ne représente en fait qu'un seul construit cognitif. Ils valident ainsi de façon plus forte la

dépendance des trois facteurs tout en conservant un modèle où ces trois facteurs entretiennent des liens fonctionnels qui expliquent aussi une part importante de la variance totale.

La Figure 3 présente le modèle à trois facteurs. On observe que les trois composantes du modèle sont distinctes, mais aussi qu'elles sont corrélées entre elles (flèches noires à double sens). L'influence respective de chaque composante sur les tests est représentée par les flèches bleues (unidirectionnelles).

Les résultats de l'analyse factorielle confirmatoire permettent donc aux auteurs de valider leur hypothèse : **les trois fonctions exécutives sélectionnées sont clairement différentes, toutefois elles entretiennent des liens fonctionnels** (elles sont corrélées).

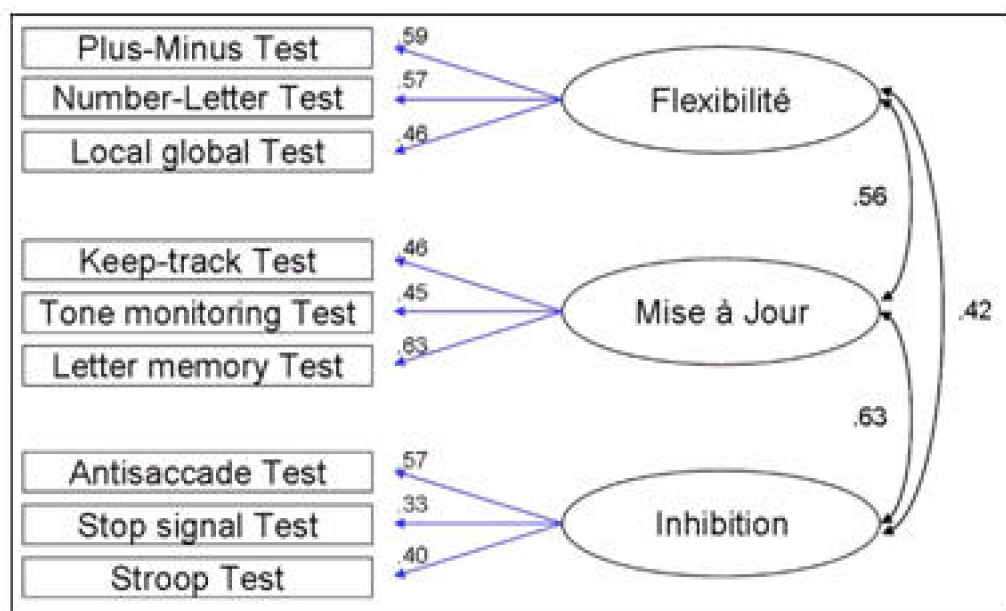


Figure 3. Modélisation du système exécutif en trois facteurs selon Miyake et al. (2000).

Les nombres indiqués près des flèches noires (à double sens) indiquent la corrélation entre chaque facteur ; les nombres indiqués près des flèches unidirectionnelles bleues représentent les poids factoriels de chaque composante sur les tests exécutifs. *Source* : D'après Miyake et al. (2000, p.70).

Dans une étude récente, Rodriguez-Aranda et Sundet suggèrent qu'il existe deux interprétations théoriques permettant de considérer le système exécutif. La première considère que les fonctions exécutives sont des habiletés différentes tout à fait indépendantes. Les arguments avancés pour défendre cette conception sont (1) qu'il existe des patients qui peuvent avoir des déficits à une fonction exécutive et pas à d'autres et (2) qu'il n'y a que de faibles corrélations entre les tests exécutifs. La seconde interprétation théorique avancée suggère que les habiletés désignées sous le nom de fonctions exécutives sont distinguables mais qu'elles partagent toutes des mécanismes qui les sous-tendent (vision de Miyake et al.). Les arguments avancés sont (1) les études en imagerie qui indiquent l'activation de structures non limitées aux lobes frontaux pendant des tâches mesurant les fonctions exécutives, et (2) les résultats des études en

analyse factorielle qui montrent l'existence de facteurs communs entre les composantes exécutives. Partant de ces deux conceptions, les auteurs ont réalisé une analyse en composantes principales incluant le *WCST*, le *TMT*, le test de Stroop, le *COWAT* et le test d'empan de chiffres inversé de la *WAIS-R*, sur 100 sujets. Les résultats confirment la deuxième conception présentée et vont dans le sens des résultats obtenus par Miyake *et al.* Rodriguez-Aranda et Sundet soulignent également en conclusion que le fonctionnement exécutif doit être considéré comme un système unitaire mais fractionnable, que la composante de vitesse de traitement de l'information doit être contrôlée dans les études sur le vieillissement et, enfin, que le test des fluences verbales est un test qui reflète mal le fonctionnement exécutif. Nous reviendrons plus loin sur ces différents résultats.

Collette a réalisé une revue de littérature sur l'exploration des fonctions exécutives par imagerie cérébrale. Elle se base sur l'approche de Miyake *et al.*, et montre que les trois composantes choisies sont sous-tendues par des réseaux corticaux différents, mais qui se superposent et peuvent donc bien ainsi être distinguées mais aussi reliées. Dans une étude TEP récente, Collette *et al.* ont également examiné les aires cérébrales associées aux trois composantes définies ci-dessus, la flexibilité, la mise à jour et l'inhibition. Grâce à une analyse en conjonction (par opposition aux analyses d'imagerie par soustraction), ils montrent que chaque processus est sous-tendu par une région corticale distincte, mais que tous trois partagent des régions cérébrales, telles que le sillon intra-pariétal droit, le gyrus pariétal gauche et le cortex préfrontal, majoritairement du côté gauche. Sylvester *et al.* ont également démontré par une étude en imagerie (IRM fonctionnelle) que la composante de flexibilité mentale était clairement distinguable de la composante d'inhibition, mais que chacune des deux impliquait l'activation de zones cérébrales communes indiquant qu'elles entretiennent donc des liens fonctionnels.

Les trois composantes choisies dans le modèle de Miyake *et al.* sont donc, en résumé, trois fonctions exécutives clairement identifiées et étudiées dans la littérature. Chacune d'elle a fait l'objet d'un nombre relativement important d'études en psychologie et en neuropsychologie. Les parties qui suivent sont consacrées à la description détaillée de chacune des trois composantes, d'une part telle que Miyake *et al.* les ont envisagées, puis d'autre part, à la façon dont d'autres auteurs ont pu les étudier et les définir les unes par rapport aux autres.

Flexibilité mentale

Cette capacité est décrite dans la littérature comme un processus de désengagement volontaire de l'attention depuis une situation ou une stratégie d'action qui n'est plus pertinente et d'un engagement vers une nouvelle stratégie plus adaptée. Elle est également parfois appelée « attention switching » ou « task switching ». Miyake *et al.* (2000) ne font pas la distinction entre « *shift* » mental, « *switch* » et « flexibilité » mentale. Cependant, plusieurs auteurs distinguent ces notions. En effet, il semblerait que le *shift* mental renvoie surtout à la notion de déplacement attentionnel à l'intérieur d'un objet (paradigme de Posner), qui est à distinguer du « *switch* » exécutif qui a une composante de plus haut niveau et qui renvoie à la notion de déplacement vers un autre pattern de réponse (*WCST*) ou vers un autre set mental. Lorsque nous parlerons de flexibilité

mentale dans les parties suivantes, nous nous référerons systématiquement à cette dernière définition qui nous semble mieux prendre en compte la composante exécutive de cette fonction.

Ruthruff *et al.* distinguent au sein même de la composante de flexibilité, des processus *top-down* et des processus *bottom-up*. Les processus *bottom-up* n'interviennent, selon ces auteurs, qu'à un niveau attentionnel de bas niveau et n'incluent pas les processus exécutifs : ils se mettent en place rapidement et permettent d'améliorer les performances lorsque la tâche est répétée. En revanche, les processus *top-down* sont plus lents à se mettre en place mais ce sont eux qui impliquent le système exécutif. Ils servent à préparer les mécanismes mentaux qui seront nécessaires à l'alternance entre différentes actions, ils sont contrôlés et ne peuvent pas être améliorés avec la répétition d'une tâche.

Des travaux récents suggèrent que lorsqu'une nouvelle opération doit être exécutée (ex : soustraire 3) sur un set de stimuli (ex : une liste de nombre à 2 chiffres), il est nécessaire de surmonter l'interférence proactive (amorçage négatif) entraîné par le fait d'avoir dû exécuter une autre opération préalablement (ex : additionner 3), sur le même set de stimuli. La flexibilité n'est donc pas simplement la capacité à engager et désengager des sets, mais elle implique aussi la capacité à exécuter une nouvelle opération devant l'interférence proactive. La flexibilité, selon Monsell, consiste en la capacité à modifier le cours de la pensée ou du comportement pour s'adapter aux besoins changeants de l'environnement. Certains auteurs différencient également deux types de flexibilité, la flexibilité locale qui correspond à la capacité d'alterner des processus mentaux entre des essais successifs et une flexibilité globale qui correspond à la capacité d'alterner des processus mentaux entre des conditions expérimentales ou entre des tâches simultanées.

Dans une recherche récente, Rubinstein, Meyer et Evans ont montré, à partir de quatre situations expérimentales, que la flexibilité mentale dépend principalement de deux processus distincts du système exécutif, le changement de but (*goal shifting*) et l'activation de règle (*rule activation*). Dans leur étude, Rubinstein *et al.* ont également montré que le coût dû à la flexibilité n'était pas simplement explicable par le fait que des processus de la tâche précédente restent activés lors de la nouvelle tâche et qu'ils interfèrent avec ceux qui doivent être activés pour la tâche en cours mais que, en outre, ce coût est dû à la prise en charge de la situation par le système exécutif central qui reconfigure les sets mentaux et programme des mécanismes appropriés pour résoudre la tâche en cours. Ce résultat est en accord avec les propositions théoriques de Miyake *et al.* qui précisent que, bien que les trois composantes exécutives choisies soient indépendantes, elles restent sous le contrôle d'un système superviseur.

Dans le domaine de la neuropsychologie, les tâches les plus fréquemment utilisées pour évaluer la flexibilité cognitive sont le *TMT*, le *PMT* ou encore le *WCST* et plus particulièrement la variable du nombre d'erreurs persévératives réalisées par le participant. Des études en imagerie cérébrale indiquent par ailleurs que le processus de flexibilité dépend à la fois de régions préfrontales, pariétales mais aussi de régions sous-corticales, ainsi que du gyrus frontal inférieur gauche.

Dans les chapitres suivants de cette section théorique, nous verrons d'une part que la

flexibilité mentale est une composante indispensable dans des activités de la vie quotidienne, telles que l'activité de conduite automobile et que, d'autre part, des études ont montré que cette composante était sensible aux effets du vieillissement normal et pathologique.

Mise à jour du contenu de la mémoire de travail

La capacité de contrôle et de mise à jour des informations est étroitement liée à la notion de mémoire de travail . Elle a pour rôle, d'une part, le contrôle et le codage des informations qui arrivent en mémoire de travail et qui sont pertinentes pour la tâche en cours puis elle permet, d'autre part, de réviser le contenu de la mémoire de travail, en remplaçant les items anciens et qui ne sont plus pertinents par de nouveaux items plus appropriés . Miyake *et al.* (2000) ajoutent que cette composante ne consiste pas seulement en un stockage passif de l'information mais plutôt en une manipulation active permanente des items stockés. La mise à jour des informations en mémoire de travail implique l'activation de trois processus successifs . Le premier processus est l'**activation** de la nouvelle information qui entre en mémoire de travail, le second est le **maintien** de cette information activée le temps nécessaire, enfin, le troisième processus est la **suppression** de l'activation d'informations qui ne sont plus pertinentes pour la situation.

Comparée à la flexibilité mentale et à l'inhibition, la capacité de mise à jour a été relativement peu étudiée dans le domaine de la neuropsychologie. Cependant, quelques études rapportent des déficits de mise à jour dans la dépression , dans la schizotypie , dans le vieillissement normal et dans la maladie d'Alzheimer . Cette composante a également été utilisée pour expliquer les différences de compétences en lecture et en mathématiques chez l'enfant et chez l'adulte . Le processus de mise à jour a également fait l'objet de quelques études en imagerie. Bien que les résultats varient légèrement en fonction du type de matériel utilisé il semble que, de façon générale, la mise à jour soit associée à des régions pariétales , préfrontales et surtout frontopolaires .

Ce qui nous paraît également intéressant, c'est que jusqu'à présent cette composante a été assez peu étudiée dans le vieillissement normal ou pathologique et que peu de liens ont été faits entre cette composante et la capacité de conduire. Nous reviendrons sur son rôle dans la section où nous nous intéresserons plus spécifiquement à cette fonction et à son importance dans la conduite automobile.

Inhibition

La troisième et dernière composante étudiée dans le modèle de Miyake *et al.* est la composante d'inhibition. C'est la composante qui a été la plus largement étudiée dans la littérature, que ce soit dans le domaine de la psychologie cognitive, qui a tenté d'expliquer cette capacité ou dans le domaine de la neuropsychologie, qui cherche à décrire les conséquences de ses déficits .

« L'inhibition intervient dans tout contexte ou situation nouvelle qui nécessite de l'attention. Elle est plus lente à se mettre en place que les automatismes et la récupération des connaissances mémorisées. [...] Elle débute avant la sélection des informations pertinentes, mais devient efficace seulement après l'activation de l'ensemble

des éléments qui constitue cette situation. [...] elle peut se généraliser à d'autres objets qui leur ressemblent mais jamais à d'autres attentes ou d'autres situations contextuelles »

Il s'agit donc d'un concept assez largement décrit en psychologie et qui représente des aspects très différents. Elle peut se définir comme notre capacité à contrôler notre comportement afin de réprimer une réponse, c'est-à-dire de ne pas faire quelque chose que nous ferions automatiquement dans une situation donnée. Il existe deux types de processus auxquels s'applique l'inhibition : processus moteurs et processus cognitifs . L'inhibition motrice renvoie à notre capacité à contrôler un comportement moteur automatique en réponse à une situation quelconque. Le paradigme le plus classique est celui du *Stop-signal* où l'on demande au sujet de toucher le plus rapidement possible une cible qui apparaît sur un écran d'ordinateur, mais le sujet ne doit surtout pas aller toucher la cible s'il entend un son. Il doit donc inhiber sa réponse motrice. L'inhibition cognitive renvoie quant à elle au contrôle mental des informations que l'on doit traiter dans notre environnement . Il s'agit d'un mécanisme qui nous permet de ne pas nous laisser envahir par toutes les informations présentes dans l'environnement et d'ignorer celles qui ne sont pas pertinentes pour gérer la situation en cours. Si l'on prend l'exemple de la conduite automobile, lorsqu'un conducteur est en train de chercher son itinéraire et qu'il cherche un panneau de direction, il faudra qu'il soit capable de traiter tous les panneaux pertinents et d'inhiber ceux qui ne le sont pas, notamment les panneaux publicitaires. Par ailleurs, Hasher et Zacks , dont les recherches concernent principalement le vieillissement, définissent l'inhibition comme un ensemble de processus servant à limiter le contenu de la mémoire de travail aux informations orientées vers un but et qui aident à réguler la mémoire de travail en supprimant l'interférence due aux informations non pertinentes.

D'un point de vue neuropsychologique, il existe une grande variété de tests servant à mesurer les capacités ou les déficits d'inhibition, les plus classiques étant le test de Stroop , le test de Hayling et le paradigme du *Stop-signal* (décrit plus haut).

D'un point de vue théorique, de plus en plus d'auteurs commencent à considérer que l'inhibition ne peut pas être envisagée comme une fonction unitaire. Suite à son travail en analyse factorielle sur les trois composantes exécutives, l'équipe de Miyake s'est penchée sur l'inhibition car elle semblait être un système décomposable à elle seule. Avec une procédure semblable à celle utilisée pour le modèle exécutif en trois facteurs , Friedman et Miyake réalisent une nouvelle analyse factorielle confirmatoire à partir de neuf tests rattachés à trois types d'inhibition, (1) l'inhibition des réponses dominantes ou automatiques, (2) la résistance à l'interférence du distracteur (c'est-à-dire la résistance à l'intrusion d'informations externes) et (3) la résistance à l'interférence proactive, c'est-à-dire la résistance à l'interférence d'informations internes, activées en mémoire de travail mais qui ne sont plus pertinentes pour la tâche en cours. Leurs résultats indiquent que la résistance à l'interférence proactive n'est pas significativement reliée aux deux autres composantes d'inhibition. L'inhibition n'est donc pas un concept unitaire mais le découpage en sous-unités fonctionnelles n'est pas évident et il est parfois plus prudent de simplement distinguer l'inhibition des informations de l'inhibition des actions sans vouloir ajouter d'autres découpages rendant ardue la compréhension du concept. Par ailleurs, un autre résultat intéressant de cette étude est que ses auteurs n'ont pas réussi à montrer de lien entre le test d'amorçage négatif et les autres tests d'inhibition. Il s'agit en fait d'une

tâche relativement complexe qui fait intervenir d'autres mécanismes et, bien que des déficits en amorçage négatif aient été démontrés chez des patients avec des troubles de l'inhibition, sa fiabilité n'a pas été démontrée clairement.

Les études en imagerie sont également assez nombreuses dans la littérature. Ces études montrent en général que la composante d'inhibition implique l'activation des régions orbito-frontales, des régions frontales gauches, ainsi que des régions pariétales et temporales. En revanche, contrairement à ce qui a été observé pour la flexibilité et la mise à jour, il ne semble pas y avoir, selon Collette (2004), de substrat cérébral commun pour différentes épreuves d'inhibition. Ce résultat est en accord avec l'hypothèse selon laquelle il existerait plusieurs types d'inhibition distincts.

En résumé, l'inhibition, qui a d'abord été décrite comme un mécanisme attentionnel basique, a été très largement étudiée dans la littérature et le fait que l'inhibition sur un objet à ignorer puisse se généraliser à d'autres objets mais jamais à d'autres attentes ou d'autres situations contextuelles laisse supposer qu'elle est plus proche des mécanismes de contrôle attentionnel de haut niveau tels que ceux de supervision et d'anticipation, c'est-à-dire des fonctions exécutives, que de l'attention.

Synthèse

En définitive, le système exécutif représente le chef d'orchestre des comportements humains. Il intervient à chaque fois que notre comportement doit être adapté à une situation qui n'est pas complètement automatisée.

Ce système a fait l'objet de recherches importantes dans le champ de la psychologie cognitive et de la neuropsychologie et, parmi les différentes tentatives de modélisation disponibles dans la littérature, nous avons focalisé notre approche sur un modèle particulier, celui proposé par Miyake *et al.* (2000). En effet, ce modèle considère que le système exécutif ne peut pas être envisagé comme un système unitaire qui contrôlerait toutes nos activités cognitives de la même façon. Il s'agit pour les auteurs d'un système complexe qui peut être scindé en sous-systèmes unitaires. Ils démontrent, à l'aide d'analyses factorielles confirmatoires, que le système exécutif peut être découpé en au moins trois composantes unitaires : la flexibilité mentale, la mise à jour des informations en mémoire de travail et l'inhibition des réponses automatiques. Les résultats de leur analyse démontrent bien que ces trois composantes sont indépendantes mais aussi qu'elles entretiennent des liens fonctionnels importants. Des études en imagerie confirment ces résultats et indiquent que flexibilité, mise à jour et inhibition impliquent des aires cérébrales distinctes mais aussi des aires communes du cortex préfrontal. De plus, Miyake *et al.* montrent également que des tests complexes, tels que le *WCST* ou la *TdL*, largement utilisés en neuropsychologie pour l'évaluation du fonctionnement exécutif, impliquent plusieurs composantes exécutives à la fois. Leur utilisation doit donc être faite en regard de cette complexité, car il semblerait que les composantes exécutives puissent ne pas être altérées de manière uniforme.

Enfin, toutes les études qui se sont intéressées au système exécutif rappellent que ce système est indispensable au fonctionnement cognitif humain et qu'il intervient dans la majorité de nos activités quotidiennes, comme la conduite automobile. Il nous paraît donc

important de nous intéresser à cette activité cognitive particulière qu'est la conduite et la section suivante a pour objectifs de décrire précisément ce que recouvre exactement l'activité de conduite en termes de processus cognitifs et de montrer qu'il serait intéressant de l'étudier sous un nouvel angle théorique, à la lumière des nouveaux modèles neuropsychologiques et avec l'approche de Miyake *et al.* décrite plus haut.

2. La conduite automobile

Conduire un véhicule semble être une activité tout à fait ordinaire et, pour beaucoup, il s'agit d'une tâche banale et routinière requérant peu de ressources attentionnelles et pouvant être largement automatisée. Meulemans présente, dans le premier chapitre d'un ouvrage consacré à la rééducation des fonctions exécutives, les différentes approches et modèles théoriques du fonctionnement exécutif. Il explique que des déficits des fonctions exécutives peuvent passer inaperçus dans les activités quotidiennes car elles sont automatisées et « réalisées sans y prêter particulièrement attention [comme] faire sa toilette, se préparer une tasse de café, conduire sa voiture ». Nous pensons au contraire que l'activité de conduite n'est pas une activité si simple, qu'elle requiert bien plus de ressources cognitives et exécutives que lors de la préparation d'une tasse de café et que les difficultés des patients à continuer à conduire sont bien souvent sous-estimées. Nous verrons au cours de cette seconde section que la conduite automobile est une activité complexe qui requiert la mise en place d'automatismes cognitifs, mais qui reste la plupart du temps une activité sous forte contrainte attentionnelle. Nous présenterons d'abord les définitions présentes dans la littérature au sujet de la conduite automobile puis nous nous intéresserons aux processus cognitifs et surtout aux processus exécutifs qu'elle implique. Enfin, nous présenterons le cadre théorique proposé par Brouwer qui a modélisé l'activité de conduite par une approche neuropsychologique permettant d'expliquer certains faits observés en conduite automobile dans le vieillissement normal ainsi que dans le vieillissement pathologique.

2.1. Qu'est ce que « Conduire » ?

Conduire, c'est tout d'abord effectuer un déplacement dirigé vers un but, dans un environnement en perpétuelle évolution, ce déplacement étant soumis à des contraintes pratiques, comme le respect du code de la route. La conduite est également soumise à des règles explicites et implicites de gestion des actions et exige de la part du conducteur le contrôle et la maîtrise de son véhicule dans un environnement qui se modifie très rapidement. Cette tâche qui semble *a priori* banale et routinière est en fait une activité très complexe qui implique en permanence des processus perceptivo-cognitifs de bas niveau, comme la vision ou l'audition, des processus de plus haut niveau, tels que l'attention ou la mémoire mais aussi, et surtout, des processus de très haut niveau, tels que les fonctions exécutives, le raisonnement, le jugement ou la prise de décision. De plus, la caractéristique principale de la conduite est que le sujet doit en permanence basculer de processus de bas niveau à des processus de plus haut niveau.

Vouloir définir le concept de conduite automobile nous amène donc rapidement à concevoir cette activité dans le cadre du fonctionnement cognitif et de la neuropsychologie. En effet, on commence depuis quelques années à s'intéresser aux déficits de la vie quotidienne chez les patients et notamment aux problèmes liés à l'autonomie. La possibilité de conduire renvoie donc également à la notion sociale d'indépendance et d'autonomie. La section suivante va s'attacher à présenter les aspects cognitifs de cette activité en partant des processus de bas niveau et en s'attardant plus particulièrement sur les processus les plus importants étudiés dans le cadre de ce travail de recherche, les processus exécutifs.

2.2. Processus cognitifs impliqués

2.2.1. Perception

Pour conduire convenablement, le conducteur d'une voiture doit pouvoir percevoir toutes les informations qui sont disponibles dans son environnement, ces informations étant surtout visuelles, auditives, mais aussi vestibulaires et sensitives. Nous n'entrerons pas dans les détails de la description de tous les traitements perceptifs que doit effectuer le conducteur lors de sa tâche de conduite, mais il nous semble important de préciser quelques éléments concernant ces processus.

Tout d'abord, bien que ce soit une évidence, le conducteur doit **voir** correctement pour conduire. Il doit pouvoir s'orienter dans l'espace convenablement, détecter, identifier les informations visuelles et éventuellement éviter des obstacles. En général, on estime que les conducteurs doivent présenter une bonne acuité visuelle pour conduire, mais ce qui est également important, selon Delarque *et al.* c'est la vision fonctionnelle, c'est-à-dire la façon dont le conducteur explore son environnement routier et comment il réussit à identifier les objets en perpétuel déplacement. En deuxième lieu, **entendre** est aussi une composante importante de la conduite, bien qu'elle ne soit pas complètement indispensable, et que des sujets sourds ou malentendants puissent obtenir le permis et conduire de manière parfaitement sécuritaire. Ces deux aspects perceptifs indispensables à la conduite peuvent être complétés par d'autres processus beaucoup moins étudiés dans la littérature sur la conduite automobile. C'est le cas, par exemple, du système vestibulaire qui, couplé avec la vision et l'audition, joue un rôle déterminant dans l'orientation du corps dans l'espace et la connaissance qu'a le conducteur de cette orientation.

2.2.2. Processus cognitifs de bas niveau

Le terme « bas niveau » employé n'est bien entendu pas à prendre au sens péjoratif, car les processus qui sont décrits ici sont d'une importance déterminante dans la conduite. Simplement nous les différencions des processus exécutifs de haut niveau, auxquels nous consacrerons une description plus importante puisqu'il s'agit de la problématique centrale de notre travail de thèse. Par processus de « bas niveau » nous entendons donc les processus nécessaires au traitement de l'information, tels que l'attention (et les

différentes catégories qu'elle recouvre), la mémoire ou le langage.

Dans le cadre de la conduite, les aspects langagiers interviennent à un niveau secondaire de l'activité. Ils sont utiles lors de l'apprentissage théorique de la conduite (règles du code de la route), lors de la prise d'informations sur les panneaux routiers et également pour interpréter les connaissances des panneaux figuratifs. La mémoire, quant à elle, est impliquée dans l'apprentissage des règles de conduite qui doivent passer dans les connaissances générales à partir de l'apprentissage du code de la route. Elle intervient également dans la mémorisation des itinéraires, nécessaire pour l'orientation spatiale. Nous ne parlerons pas ici du concept de mémoire de travail que nous avons choisi de relier au concept de système exécutif et qui sera donc décrit plus loin.

L'attention fait, quant à elle, référence à la présence d'informations importantes, sur lesquelles il est nécessaire de se focaliser. Dans le cas de la conduite, tous les éléments présents dans l'environnement routier ne pourront pas être traités en raison de leur grand nombre, mais aussi en raison du fait qu'ils sont en perpétuel mouvement. Ils entrent donc en compétition pour être représentés en mémoire de travail. Par simplification, nous présenterons ici trois aspects classiques de l'attention : l'attention sélective, l'attention divisée et l'attention soutenue, bien que ce découpage puisse être discuté. Rogers définit **l'attention sélective** comme un filtrage des informations disponibles dans l'environnement dont la fonction est de nous rendre capables de sélectionner correctement, parmi toutes les informations disponibles dans l'environnement, celles que nous devons traiter en priorité pour une adaptation correcte à la situation. Ensuite, selon Näätänen, la notion **d'attention divisée** fait appel à notre capacité à effectuer simultanément plusieurs tâches. Ces tâches mettent souvent en évidence une limitation des capacités de traitement de notre système cognitif. Plus le conducteur est expérimenté, plus un grand nombre de tâches parallèles vont être automatisées, telles que l'utilisation des pédales de freins, d'accélérateur et d'embrayage, ainsi que l'utilisation des commandes (clignotant, phares...) et donc plus un conducteur est expérimenté, moins son attention divisée est sollicitée pour la tâche de conduite simple. Enfin, **l'attention soutenue**, également appelée vigilance, concerne l'aspect temporel de l'attention. Elle concerne notre capacité à maintenir un niveau d'activité pendant un temps prolongé. L'activité de conduite peut s'apparenter à une tâche d'attention soutenue dans laquelle le conducteur doit rester vigilant pour être capable de percevoir tout événement routier imprévu.

En résumé, cette brève présentation des processus perceptivo-cognitifs impliqués dans la tâche de conduite indique que la conduite n'est pas, comme on a pu le prétendre, une tâche banale et routinière qui s'automatise rapidement avec l'expérience de conduite. En présentant les processus perceptifs simples, comme la vision, nous avons immédiatement fait appel à des processus plus complexes de traitement et d'identification des stimuli pertinents et donc à des processus cognitifs plus complexes tels que l'attention. De même, en présentant les processus cognitifs plus complexes, nous avons rapidement fait émerger les concepts de mémoire de travail, d'inhibition, de division de l'attention. La frontière avec le système exécutif est donc très floue et nous allons à présent nous consacrer à décrire ce que l'on sait aujourd'hui, à partir de la littérature, à propos de l'implication du système exécutif et de ses composantes dans la conduite

automobile.

2.2.3. Implication des fonctions exécutives

Partant de la définition des fonctions exécutives – processus qui se met en place pour faciliter l'adaptation du sujet à des situations nouvelles, notamment lorsque les routines d'actions, c'est-à-dire les habiletés cognitives surappries, ne peuvent suffire – nous constatons immédiatement que la conduite fait sans cesse appel à des situations nouvelles et non routinières et donc aux fonctions exécutives. Cependant, la littérature dans le champ de la psychologie de la conduite ne fait que rarement intervenir les processus exécutifs pour décrire les fonctions cognitives impliquées. En général, on fait surtout état de l'intervention du système attentionnel, sans aller plus loin. Par exemple, Meulemans (2000), dans un chapitre d'ouvrage consacré aux processus cognitifs indispensables pour une conduite sécuritaire, discute de rôle de la perception, de la mémoire, de l'attention mais finalement assez peu des fonctions exécutives.

En revanche, c'est avec les études en neuropsychologie que l'on commence seulement à s'intéresser au risque d'accident et à la compétence de conduite des patients avec des troubles des fonctions exécutives. En effet, on trouve aujourd'hui dans la littérature un certain nombre de recherches concernant la conduite automobile et les déficits exécutifs. Ces études s'intéressent particulièrement aux patients avec lésions frontales, au vieillissement normal ou encore au vieillissement pathologique. Ces études s'accordent toutes sur le fait que des déficits exécutifs peuvent entraîner des difficultés à la reprise de la conduite lorsqu'il s'agit de patients qui ont eu un accident cérébral, ou des difficultés pour continuer à conduire, comme cela peut être le cas dans les pathologies dégénératives, telles que la maladie d'Alzheimer ou la maladie de Parkinson. Cependant, l'évaluation des fonctions exécutives se fait la plupart du temps avec des tests d'évaluation globale du fonctionnement exécutif, comme le *WCST* ou la Tour de Londres, et les fonctions impliquées ne sont pas clairement identifiées. Par exemple, l'équipe de Rizzo et Uc a publié un certain nombre d'études sur la conduite automobile chez des patients avec maladie d'Alzheimer, de Parkinson ou chez des patients avec traumatisme crânien grave, avec dans chaque étude une évaluation détaillée du fonctionnement cognitif. Cependant, pour leurs analyses, ils ne différencient pas les fonctions cognitives mesurées pour les mettre en rapport avec la compétence de conduite mais ils calculent un score cognitif global « cogstat »¹ utilisé pour comparer les patients et les témoins et pour le comparer à la performance en situation de conduite. Le « cogstat » rassemble des tests d'attention sélective, d'attention divisée (paradigme de double tâche), une mesure du champ visuel utile (*UFOV*), le test des codes de la *WAIS (Wechsler Adult Intelligence Scale)* ou encore le *TMT A* et *B*.

En définitive, la conduite automobile telle que nous l'avons définie implique un grand nombre de processus cognitifs simples et complexes. La section suivante présente le cadre conceptuel que nous avons retenu comme modèle de la conduite, celui de Brouwer

¹ A partir des performances individuelles à chaque test, un score standard *T* est calculé (*moyenne* = 50, *écart-type* = 10) puis la moyenne entre les différents scores *T* est calculée et correspond à ce score global « cogstat ».

2.3. Modélisations de la conduite automobile

Dans l'histoire de la psychologie de la conduite, les modélisations de cette activité se sont succédé. Nous présenterons brièvement quelques modèles historiques, puis nous nous attarderons plus particulièrement sur le modèle que nous avons retenu, celui de Brouwer .

2.3.1. Premiers modèles

Trois modèles historiques sont encore souvent présentés dans la littérature sur la conduite automobile, (1) le modèle du risque zéro, (2) le modèle homéostatique du risque et (3) le modèle hiérarchique du risque .

Modèle du risque zéro

Le premier modèle, appelé modèle du risque zéro, comporte trois caractéristiques essentielles, la motivation du conducteur, la vigilance et la perception du risque subjectif par le conducteur. Selon ce modèle, un sentiment de peur en conduite peut induire des modifications de conduite et une diminution de la prise de risque. Ce risque subjectif se définit comme le produit de la probabilité qu'un événement dangereux se produise et de l'importance des conséquences de cet événement sur le conducteur. S'il est appelé modèle du « risque zéro » c'est parce que, selon les auteurs, le conducteur contrôle en permanence le risque pris sur la base des indices perceptibles dans l'environnement routier et évite les situations et les comportements qui entraîneraient selon sa propre perception une peur ou un risque .

Modèle de l'homéostasie du risque

Le second modèle est celui de Wilde, modèle de l'homéostasie du risque . Ce modèle a été défini à partir de la question suivante : pourquoi certains conducteurs sont-ils plus disposés que d'autres à accepter un degré de risque au volant ?

En fait, c'est parce que la connaissance du risque dépend de la possibilité de percevoir le risque : selon Wilde l'homéostasie du risque est une relation qui tend toujours à l'équilibre entre le risque perçu et l'avantage attendu par la décision de conduite prise. Ce modèle a l'avantage sur le modèle du risque zéro de prévoir que le conducteur peut, soit diminuer le niveau du risque, soit l'augmenter, en fonction des situations, pour maintenir un risque perçu constant .

Modèle hiérarchique du risque

Enfin le troisième modèle proposé, le modèle hiérarchique du risque est sans doute celui qui reste le plus souvent décrit dans la littérature actuelle pour son aspect historique de description de l'activité de conduite. Il a été développé par ses auteurs en raison de résultats trop contradictoires avec les théories décrites ci-dessus. Ce modèle s'inspire des travaux de Michon et présente l'activité de conduite comme étant décomposée selon trois niveaux hiérarchiques et dépendants, les niveaux stratégique, tactique et opérationnel. Le niveau stratégique, le plus élevé, consiste en une planification de buts qui comprend la

détermination du but du déplacement, le choix du trajet et diverses autres prises de décision qui impliquent chez le conducteur la mise en œuvre de processus *exécutifs* variés. Les niveaux tactiques et opérationnels, à la différence du niveau stratégique, sont soumis à des pressions temporelles fortes mais sont supportés par des processus beaucoup moins coûteux du point de vue attentionnel. Ils s'approchent du module de gestion des conflits ("*Contention Scheduling*") de Norman et Shallice. Selon ce modèle, la perception de l'environnement est en tout temps influencée par les représentations internes de situations similaires et c'est la probabilité implicite d'accident qui module les comportements du conducteur sur les trois niveaux hiérarchiques.

Ce dernier modèle de l'activité de conduite est le seul qui fasse intervenir les processus cognitifs dans sa description. Cependant, un modèle plus récent qui prend en compte les niveaux hiérarchiques proposés par Van der Molen et Böttcher (1988) se base sur les aspects neuropsychologiques et cognitifs du conducteur : le modèle de Brouwer.

2.3.2. Modèle du comportement du conducteur de Brouwer

Brouwer a proposé une nouvelle façon de modéliser la conduite automobile dans un cadre neuropsychologique précis. Ce cadre théorique lui permet de prendre en compte à la fois les déficits neuropsychologiques des conducteurs et la structuration cognitive complexe de l'activité de conduite.

Son modèle prend en compte les notions d'automatisme et de contrôle attentionnel proposées par Norman et Shallice (1986) et décompose trois niveaux de gestion lors de la conduite (cf. Figure 4). Le premier niveau, le niveau du **savoir-faire** (*driving skills*), correspond aux habiletés acquises, spécifiques à un domaine particulier. C'est le fait que le conducteur a appris à conduire de manière fluide et sûre dans différentes situations et qu'il sait évaluer, sélectionner ou éviter certaines situations de trafic afin de limiter sa prise de risque. On évalue ce savoir-faire par la performance en situation de conduite réelle. Le second niveau, **l'aptitude à la conduite** (*Fitness to drive*), correspond à un concept médico-légal, c'est-à-dire aux capacités physiques et mentales suffisantes pour être capable d'apprendre et d'appliquer les règles de conduite (généralement, cette aptitude est mesurée en dehors de la route par des médecins). Ces capacités minimales sont définies par les autorités compétentes. Enfin, le troisième niveau de traitement est le **comportement au volant** (*driving behaviour*). Il correspond à ce que le conducteur fait réellement aux commandes de sa voiture. Une personne peut passer avec succès l'évaluation médicale, obtenir son permis et être malgré tout un conducteur incompetent car il se met dans des situations qu'il n'arrive pas à gérer de façon efficace et sûre, par exemple, la conduite après absorption d'alcool ou avec utilisation d'un téléphone portable.

Ces trois aspects peuvent sembler très liés à première vue : on peut imaginer que quelqu'un d'inapte à la conduite n'aura pas un bon savoir-faire et, inversement, on peut imaginer que des conducteurs aptes et compétents auront moins tendance à adopter des comportements dangereux. Mais en pratique, la vie réelle contredit ces hypothèses : le jeune conducteur de sexe masculin a un niveau de compétence optimal mais associé à un comportement au volant dangereux et inadapté. Inversement, la qualité de la conduite

est souvent évaluée comme bonne chez des personnes avec déficits visuels ou chez des conducteurs âgés qui ne possèdent plus les aptitudes à la conduite optimales. Les déficits cognitifs observés chez des patients ou des conducteurs âgés ne peuvent donc pas être expliqués si on prend en compte un seul des trois domaines. Ce sont les interactions entre les trois niveaux qui peuvent expliquer que des personnes dont les aptitudes physiques ou cognitives sont diminuées peuvent être des conducteurs compétents grâce à la mise en place de processus de compensation au niveau du savoir-faire ou du comportement. Nous poserons d'ailleurs l'hypothèse que les processus exécutifs mis en jeu dans l'activité de conduite interviennent au niveau de ces interactions entre les niveaux de traitement.

L'expérience de conduite est également un élément dominant dans ce modèle. En effet, selon Brouwer « chez un conducteur novice, la conduite repose plus fortement sur l'application de connaissances déclaratives. Avec l'apprentissage, se mettent en place progressivement des connaissances procédurales permettant une conduite plus autonome ». De plus, Brouwer propose que pour les conducteurs expérimentés, la conduite automobile consiste en une alternance de séquences comportementales stéréotypées, d'épisodes de vérification consciente et de transitions occasionnelles vers un contrôle de l'action basé sur la connaissance. Le conducteur doit donc, dans son activité de conduite, faire appel à des représentations fonctionnelles stockées en mémoire, les confronter avec la situation en cours et les actualiser en fonction des différences entre la représentation stockée et la situation présente. La représentation sera donc adaptée voire modifiée pour une adéquation avec les circonstances vécues. Cette alternance entre séquences stéréotypées et contrôle de l'action est sous-tendue par le système exécutif, ce qui permet au conducteur d'alterner entre des sets cognitifs différents. Ceci nous ramène ici à la notion de flexibilité mentale.

Par ailleurs, la conception de Brouwer est également pertinente dans le sens où il s'agit d'une conception beaucoup plus macroscopique de l'activité de la conduite, dans laquelle il intègre les autres modèles. En effet, la conception de Brouwer a été développée spécifiquement dans le but de conceptualiser les fonctions qui interviennent pendant l'activité de conduite, mais dans une optique d'évaluation et de rééducation. Ainsi, le modèle de Brouwer intègre complètement la distinction réalisée par Van der Molen et Bötticher (1988) entre les niveaux opérationnel, tactique et stratégique. Les choix réalisés à un niveau élevé (stratégique, exemple : décider d'un itinéraire, ou tactique : adapter sa vitesse) vont conditionner les difficultés des tâches à réaliser au niveau plus élémentaire, comme l'évitement des obstacles ou le placement sur la chaussée. Dans une optique de réadaptation, on comprend donc que les tâches stratégiques et tactiques qui ne sont pas sous pression temporelle peuvent être adaptées pour faciliter les tâches du niveau opérationnel qui restent toujours sous une pression temporelle forte. En choisissant un itinéraire moins fréquenté et en conduisant à une vitesse moins élevée, le conducteur augmente ses chances de pouvoir prévenir une collision en cas d'obstacle sur la chaussée.

L'intérêt de l'approche de Brouwer par rapport aux modèles reliés au risque est donc qu'elle met en évidence des interactions entre les trois niveaux et que ces interactions dépendent du niveau d'expérience du conducteur. D'ailleurs, Baddeley avait déjà mis en

évidence cette notion dans son modèle de mémoire de travail en suggérant qu'un conducteur expérimenté est tout à fait capable de bavarder avec un passager tout en conduisant, ce qui est difficile pour le conducteur novice. Ainsi, des personnes dont l'aptitude physique ou cognitive est diminuée peuvent-elles être des conducteurs compétents grâce à la mise en place de processus de compensation pour les niveaux de savoir-faire et/ou de comportement effectif .

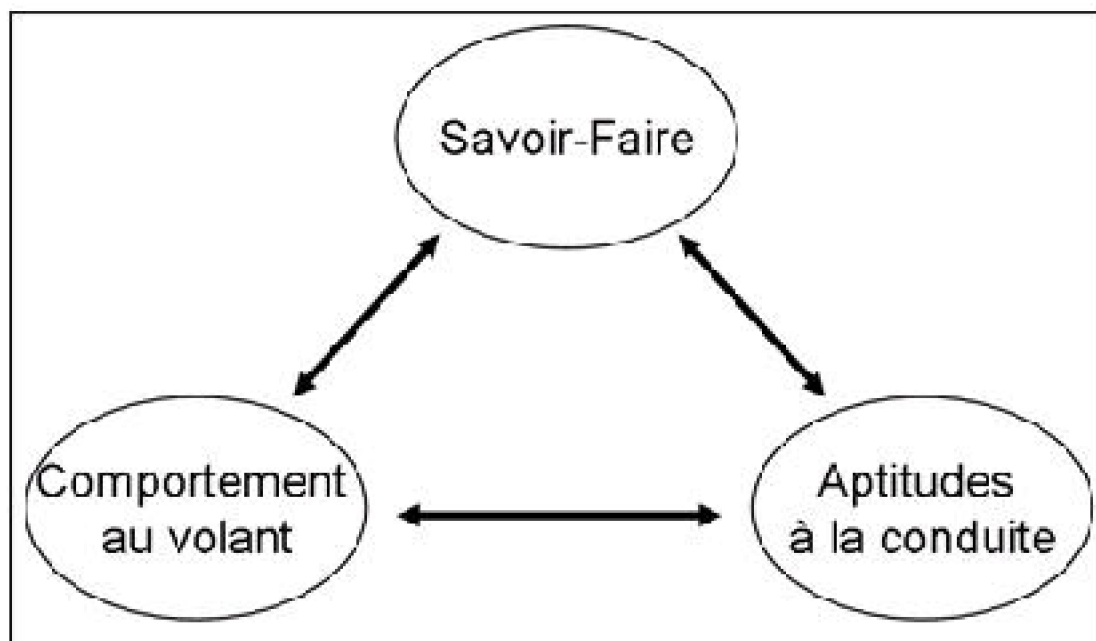


Figure 4. Modèle du comportement du conducteur selon Brouwer (2002)

2.4. Synthèse

En définitive, les différentes définitions que nous venons d'évoquer, ainsi que les tentatives de modélisation, nous permettent de comprendre que la conduite automobile est une activité d'une grande complexité, qui mêle des processus cognitifs de bas et de haut niveau, des processus attentionnels automatiques et d'autres plus contrôlés, des fonctions intégratives, le tout sous le contrôle supérieur et intégré d'un système : le système de contrôle exécutif. Pour notre travail de recherche, nous avons décidé de nous placer dans deux cadres théoriques distincts mais qui nous paraissent parfaitement complémentaires au vu de notre sujet d'étude. Le fonctionnement exécutif a été étudié sous divers angles de modélisation. Nous en avons présenté les plus classiques. Il existe d'autres modèles actuels alternatifs à ceux décrits plus haut . Cependant, le modèle de Miyake *et al.* qui définit le système exécutif comme un système unitaire de contrôle mais décomposé en unités distinctes d'inhibition, de mise à jour et de flexibilité, nous a semblé le plus pertinent, de par son aspect dynamique du traitement de l'information et par ses possibilités d'expliquer les activités cognitives mises en jeu dans l'activité de conduite automobile. En ce qui concerne les modélisations de la conduite automobile, nous avons décidé de nous placer dans le cadre conceptuel du modèle neuropsychologique de Brouwer (2002). Ce cadre prend en compte les caractéristiques individuelles et neuropsychologiques des conducteurs, ce qui est particulièrement pertinent dans le cadre

de notre étude sur des populations de conducteurs spécifiques, les conducteurs âgés et les conducteurs avec troubles neurologiques comme dans la maladie d'Alzheimer.

Les chapitres suivants sont consacrés aux connaissances actuelles concernant d'une part le vieillissement cognitif dit « normal », c'est-à-dire dépourvu de pathologie cognitive et d'autre part le vieillissement pathologique, dans le cas particulier de la maladie d'Alzheimer. Chaque chapitre fera également état des études déjà réalisées en ce qui concerne la conduite automobile.

Chapitre 2. Vieillissement cognitif normal et conduite automobile

1. Qu'est ce que « vieillir » ?

Le vieillissement de la population est un phénomène qui s'observe aujourd'hui dans la plupart des pays du monde et en particulier dans les pays industrialisés comme la France . On estime en effet que d'ici à 2030, une personne sur quatre aura plus de 65 ans, et que d'ici à 2050, la classe d'âge des 75-85 ans aura triplé et celle des plus de 85 ans aura quadruplé . Le vieillissement se définit comme le processus naturel de transformation graduelle que subit tout être vivant du fait de son avancée dans l'âge (*Dictionnaire Hachette Encyclopédique*, 2005). Jusqu'au milieu du vingtième siècle, la notion de vieillissement était considérée comme très négative dans le domaine de la recherche. Charcot, puis Freud pensaient ainsi qu'il n'existait pas de différence de nature entre le vieillissement normal et la démence, mais que c'était seulement une question de degré . Aujourd'hui, grâce aux avancées médicales et à une meilleure vision du vieillissement, la psychologie cognitive s'est intéressée à cette notion et l'a petit à petit détachée de la notion de continuum vers le vieillissement pathologique. Le présent chapitre a pour objectif de présenter les données théoriques issues de la psychologie cognitive et de la neuropsychologie concernant le vieillissement, en particulier en ce qui concerne le vieillissement des fonctions exécutives. Vient ensuite un état de l'art concernant les études qui ont se sont intéressées à la conduite automobile chez les âgés.

1.1. Définitions du concept

Comme nous venons de le souligner en introduction, le vieillissement peut se définir comme un processus graduel de modification que subit tout être vivant. Concernant les processus cognitifs, le vieillissement peut donc se définir en termes de déclin, avec l'âge, des capacités sensorielles, perceptives, motrices ou encore cognitives. Cette définition est réductrice, comme le soulignent Hupet et Van der Linden , car elle ne prend pas en compte le fait qu'avec l'âge les sujets ont plus d'expérience et de maturité, et que l'on ne peut pas réduire le vieillissement aux seules dégradations qu'il engendre. Cependant, ce qui intéresse les chercheurs en neuropsychologie et en psychologie cognitive, c'est

essentiellement d'identifier des déclinis dus à l'avancée en âge, afin de pouvoir trouver une façon d'y remédier ou, tout au moins, de maintenir un niveau de performance le plus longtemps possible .

Le vieillissement est un phénomène qui peut être appréhendé sous au moins trois angles différents . Le premier est le vieillissement biologique, qui se traduit par des modifications physiologiques, comme l'apparition des rides, les difficultés de la marche dues aux raideurs musculaires, ou encore l'augmentation du risque de maladies cardio-vasculaire. Le second domaine concerne le vieillissement social. Selon Fontaine, il s'agit du changement de statut provoqué par le passage à la retraite, qui implique généralement des modifications des liens sociaux engendrés par la vie active. Enfin, on parle de vieillissement psychologique, pour ce qui est des modifications des activités intellectuelles et comportementales. C'est ce troisième domaine qui sera spécifiquement abordé ici. Lorsque nous parlerons de vieillissement « normal » ou « pathologique » il s'agira du vieillissement concernant les aspects cognitifs uniquement, bien que le vieillissement pathologique, comme c'est le cas de la maladie d'Alzheimer, soit du à des modifications biologiques que nous aborderons dans le prochain chapitre.

Il existe deux approches permettant de décrire les aspects importants du vieillissement normal : d'une part l'approche psychométrique, d'autre part l'approche cognitive de la théorie du traitement de l'information.

1.1.1. Approche psychométrique du vieillissement

L'approche psychométrique est née avec Binet, qui est le premier à proposer que les aptitudes intellectuelles peuvent être mesurées indépendamment les unes des autres et qui considère l'intelligence comme une constellation de facultés mentales. A la même époque, Spearman commence l'investigation des aptitudes mentales sur un vaste échantillon de la population anglaise. Il est le premier à présenter le modèle bifactoriel de l'intelligence et avance que les facultés intellectuelles sont régies par un facteur général qui contribue à chaque tâche et un facteur spécifique propre à chaque tâche. Cette approche est abandonnée par la suite au profit de celle de Thurstone, qui pense que la performance à des tâches intellectuelles est gouvernée par un petit nombre de facteurs et non pas par des facteurs spécifiques . Cependant, le modèle bifactoriel réapparaît avec les études de Cattell et Horn dans les années 50. Ces deux psychologues ont en effet développé un modèle hiérarchique et distingué deux types d'intelligence : l'intelligence fluide et l'intelligence cristallisée .

L'intelligence fluide représente la forme d'intelligence capable de résoudre les problèmes nouveaux. Elle se révèle à travers des activités de compréhension des relations entre des données nouvelles de nature spatiale ou verbale et des activités de construction d'inférences et d'implications. Les aptitudes qui y sont rattachées sont le raisonnement inductif, la flexibilité figurale, l'intégration, le raisonnement logique et le raisonnement général. Elle est sensible aux caractéristiques individuelles du sujet ainsi qu'aux effets de l'âge. Ces capacités diminuent dans le vieillissement normal. Elle dépend en effet de la capacité à s'adapter rapidement et efficacement aux situations nouvelles, elle mobilise de fortes ressources attentionnelles, elle est liée au déclin des capacités

perceptives et à la baisse de la vitesse de traitement . L'intelligence cristallisée est quant à elle liée à l'accumulation d'expériences, à la profondeur du savoir et de l'expérience, au jugement, à la compréhension des relations sociales et des conventions, au savoir-faire. Elle se rattache étroitement non seulement au temps vécu, mais aussi aux expériences dont on a pu bénéficier et pour cette raison, à l'inverse de l'intelligence fluide, elle a tendance à augmenter avec l'âge et l'accumulation d'expériences .

En résumé, l'approche psychométrique distingue donc deux courants principaux, d'une part les modèles qui postulent l'existence d'un facteur général d'intelligence (Spearman) et d'autre part ceux qui ne l'admettent pas (Cattell et Horn). Des conceptions plus actuelles intègrent à la fois les modèles à un facteur général et les modèles en aptitudes primaires. C'est le cas du modèle de Carroll . Il est constitué de trois strates hiérarchiques et intègre le découpage en intelligence fluide et intelligence cristallisée de Cattell et Horn. Selon Carroll, il existerait, à un niveau supérieur, un facteur général d'intelligence puis, à une strate inférieure, l'intelligence fluide et l'intelligence cristallisée ainsi que six autres aptitudes primaires, telles que la mémoire, la vitesse de traitement ou encore la rapidité cognitive et enfin, au troisième niveau se situent des facteurs simples correspondant à des aptitudes mesurées par des tests. Cependant, l'approche psychométrique de l'intelligence a rapidement montré des limites théoriques importantes et il semblerait qu'il existe un plus grand nombre de facteurs permettant d'expliquer les capacités intellectuelles. De plus, Fontaine (1999) explique que plusieurs tests fortement saturés à l'intelligence cristallisée, comme le test des codes, sont sensibles aux effets du vieillissement.

L'approche psychométrique est en résumé une approche très globale du fonctionnement cognitif qui est largement répandue dans les études sur le fonctionnement cognitif normal, comme sur le vieillissement, mais qui possède certaines limites. En effet, en scindant les capacités cognitives en seulement quelques facteurs généraux, elle ne permet pas facilement de rendre compte de toutes les différences liées à l'âge et néglige des aspects des comportements cognitifs qui peuvent être sensibles aux évolutions de l'âge.

1.1.2. Approche cognitive du vieillissement

L'approche cognitive ne considère pas qu'il faille rassembler les fonctions cognitives en quelques facteurs généraux. Elle est centrée sur la *nature* des activités mentales, c'est-à-dire qu'on s'intéresse au « comment » plutôt qu'aux performances en elles-mêmes. Dans l'approche cognitive du vieillissement, on aborde les grands domaines cognitifs atteints dans le vieillissement, tels que la mémoire, l'attention, la vitesse de traitement ou encore les fonctions exécutives.

Dans notre travail de recherche, nous nous sommes placés dans le cadre de l'approche cognitive. En effet, l'approche psychométrique est plutôt globale et on explique que les différences liées à l'âge dans des épreuves cognitives sont dues à un facteur général d'intelligence, alors que l'approche cognitive est centrée sur l'identification des processus spécifiques responsables des changements de performance entre jeunes et

âgés. Selon Hupet et Van der Linden le principal défaut de l'approche cognitive est qu'elle est surtout descriptive et que les différences observées entre jeunes et âgés ne sont pas expliquées. Cependant, l'approche psychométrique, qui tente de remédier à ce défaut, cherche à expliquer la réduction des performances par un phénomène de réduction des capacités générales de traitement, mais à nouveau, on n'explique pas à quoi est dû ce phénomène de diminution des ressources générales. De plus, Adam *et al.* suggèrent qu'il est plus judicieux de développer des explorations analytiques des facteurs globaux du vieillissement, qui ne peuvent pas être considérés comme des facteurs unitaires.

Le but de notre travail de recherche n'étant pas d'expliquer les causes du vieillissement cognitif, mais plutôt ses conséquences sur une activité particulière, la conduite automobile, nous passerons outre cette critique et nous nous focaliserons uniquement sur une approche cognitive du vieillissement normal et pathologique et nous tenterons de décrire quelles fonctions cognitives, et plus particulièrement quelles fonctions exécutives sont atteintes dans le vieillissement.

1.2. Ressources générales et vitesse de traitement

La notion de diminution de la vitesse de traitement au cours du vieillissement normal a été largement décrite dans la littérature depuis les travaux princeps de Salthouse . Selon Salthouse, la vitesse de traitement constitue un des mécanismes les plus importants à étudier pour comprendre les altérations du fonctionnement cognitif des adultes âgés. En effet, il semble que les différences observées dans le vieillissement dans un bon nombre de tests cognitifs ne soient pas indépendantes, et que ces tâches partagent plus de 50% de variance liée à l'âge . Ce résultat indique que les différences observées entre adultes jeunes et adultes âgés dans des tâches cognitives ne peuvent pas être exclusivement attribuées aux processus cognitifs eux-mêmes, mais qu'elles sont déterminées par un autre facteur, le facteur de ralentissement de la vitesse de traitement des informations. Verhaeghen et Salthouse ont réalisé une méta-analyse à partir de 91 études préalablement publiées sur le vieillissement cognitif. Ils rapportent que le meilleur modèle qui ressort de cette analyse est un modèle à un facteur, représentant la vitesse de traitement et qu'il s'agit du meilleur facteur expliquant les différences liées à l'âge dans les autres processus cognitifs, tels que la mémoire, le raisonnement ou les capacités spatiales.

Par ailleurs, quelques recherches récentes indiquent également que le ralentissement de la vitesse de traitement prédit la diminution des performances à des tâches mesurant le fonctionnement exécutif, telles que le WCST ou dans les tests de fluence verbale . Vitesse de traitement et fonctions exécutives sont donc très liées. Isingrini suggère deux hypothèses sur le lien entre la vitesse de traitement et les fonctions exécutives : « soit la vitesse de traitement est une limite fondamentale du fonctionnement exécutif, soit vitesse et fonctions exécutives reflètent un même processus cognitif général » . Le débat n'est pas encore résolu à l'heure actuelle et des efforts de recherches devront être effectués dans ce sens. Plusieurs recherches ont pourtant déjà montré que dans différentes tâches cognitives, de mémoire par exemple, les différences de performances entre jeunes et âgés s'expliquaient mieux par un facteur de

fonctionnement exécutif que par un facteur de ralentissement de la vitesse de traitement .

En résumé, la *Théorie de la vitesse de traitement*, proposée par Salthouse, suggère que la vitesse de traitement (définie comme la vitesse à laquelle les opérations cognitives élémentaires sont réalisées pour gérer une situation) est le meilleur facteur permettant d'expliquer les altérations cognitives du vieillissement. En effet, les traitements cognitifs reposent sur deux caractéristiques importantes : d'une part, les informations nécessaires à la réalisation des traitements cognitifs sont disponibles toutes simultanément et d'autre part, elles le sont dans un temps limité. En d'autres termes, lorsque la vitesse de traitement est réduite, le sujet ne dispose plus du temps nécessaire pour réaliser le traitement cognitif de la situation car les informations disponibles en mémoire de travail doivent être traitées rapidement, le temps de traitement étant limité et ces informations risquant de se dégrader, d'être oubliées ou simplement de ne plus être pertinentes pour la situation actuelle.

Cependant, on relève aujourd'hui dans la littérature sur le vieillissement, des données qui nous incitent à suggérer que la vitesse de traitement ne peut pas être considérée comme le seul prédicteur des effets de l'âge sur les performances cognitives. En effet, plusieurs études ayant pour but de mettre en relation une fonction cognitive spécifique, le fonctionnement exécutif et la vitesse de traitement, ont montré que la diminution de la vitesse de traitement pouvait être un bon facteur explicatif, mais pas toujours suffisant. Par exemple, Bugaiska *et al.* ont tenté de trouver les acteurs responsables du déclin des performances de la mémoire dans le vieillissement. Grâce à une analyse de régression, ces chercheurs ont montré que la vitesse de traitement expliquait une part non négligeable de la performance, mais que lorsque l'on mettait en concurrence le fonctionnement exécutif et la vitesse de traitement dans l'analyse de régression, c'était alors le fonctionnement exécutif qui était le meilleur facteur explicatif (et le seul significatif) pour expliquer le déclin des performances de mémoire lié à l'âge. Ces auteurs ajoutent que, pour des recherches futures, il serait intéressant d'étudier la nature spécifique des processus exécutifs impliqués en utilisant des modélisations récentes du contrôle exécutif. En effet, leur étude utilisait comme seule mesure du fonctionnement exécutif, le nombre d'erreurs persévératives réalisées dans le *WCST*. D'autres études utilisant les mêmes méthodes d'analyses ont également montré que, bien que le facteur de vitesse de traitement soit un facteur important à ne pas oublier dans les analyses, le facteur de contrôle exécutif s'avère être un meilleur prédicteur des déclinés liés à l'âge .

Plus récemment, Salthouse a suggéré de distinguer « *processes* » (processus) et « *products* » (produits) cognitifs. Les processus cognitifs renvoient à l'efficacité du traitement de l'information au cours de la situation, alors que les produits renvoient aux connaissances accumulées à partir des expériences passées. Produits et processus ne sont donc pas indépendants puisque les produits cognitifs sont acquis par le biais des processus et que la quantité de produits accumulés influence l'efficacité des processus. Les processus cognitifs, tels que le raisonnement, l'orientation spatiale ou la vitesse de traitement déclinent avec l'âge, alors que les produits se maintiendraient dans le vieillissement .

En définitive, la théorie de la diminution des capacités et de la vitesse de traitement est une théorie qu'il ne faut pas négliger dans les études neuropsychologiques sur le

vieillesse normal mais, dans le cas présent, il nous semble plus pertinent de nous intéresser aux déclins spécifiques des capacités exécutives afin de mieux comprendre en quoi elles sont liées à l'activité de conduite automobile.

1.3. Vieillesse des fonctions exécutives

Dans le premier chapitre de notre travail, nous avons défini les fonctions exécutives comme un ensemble de processus dont le rôle principal est de faciliter l'adaptation du sujet à des situations nouvelles et ce, notamment lorsque les routines d'actions, c'est-à-dire les habiletés cognitives surappries, ne peuvent suffire. Nous avons également vu que le système exécutif pouvait être décomposé en trois composantes distinctes, la mise à jour des informations en mémoire de travail, la flexibilité et l'inhibition des informations non pertinentes. L'hypothèse d'un déficit précoce des fonctions exécutives est aujourd'hui rapportée comme une caractéristique essentielle du vieillissement. Pour appuyer ce point de vue, Isingrini indique que plusieurs données peuvent étayer cette hypothèse, (1) des modifications neurologiques touchent précocement les lobes frontaux, (2) on observe une diminution de l'activité métabolique frontale, (3) on observe chez les âgés des altérations de la performance aux tests exécutifs et (4) on observe également des modifications de la mémoire similaires à celles observées chez les patients frontaux.

Dans une première partie, nous présenterons donc les données de la littérature montrant des déficits généraux du système exécutif, puis nous nous intéresserons séparément à chacune des trois composantes.

1.3.1. Données générales sur le vieillissement exécutif

Selon West, les déficits liés aux fonctions frontales, c'est-à-dire les déficits exécutifs, sont les troubles qui expliquent les altérations cognitives que l'on observe dans le vieillissement normal. Comme nous l'avons présenté plus haut, l'administrateur central de la mémoire de travail est étroitement lié au contrôle exécutif et aux fonctions exécutives. La mémoire de travail a fait l'objet de nombreuses études concernant le vieillissement qui indiquent, pour la plupart, une dégradation modeste mais observable des capacités de mémoire de travail, en particulier en ce qui concerne le système attentionnel superviseur.

Plusieurs études publiées par l'équipe d'Isingrini avaient pour but d'étudier les facteurs qui pouvaient expliquer le déclin avec l'âge de différents processus cognitifs. Ainsi, Souchay et Isingrini ont-ils montré que le processus de contrôle métacognitif (capacité d'un individu à évaluer ses propres capacités cognitives) était sensible au vieillissement, mais que ce déclin s'expliquait pour une grande part, par un déclin des déficits exécutifs, évalués par le WCST.

Par ailleurs, De Frais *et al.* rapportent également que des participants âgés obtiennent des performances significativement moins bonnes que des jeunes aux tests de Stroop, au Color Trail test, au test de Hayling ainsi qu'au test de Brixton. Cependant leur étude avait également pour but de vérifier si l'inhibition (mesurée par le Stroop et le Hayling) et la flexibilité (mesurée par le Brixton et le Color Trail) constituaient deux

composantes distinctes du système exécutif. Les auteurs indiquent que le modèle statistique à deux facteurs n'est pas bon, mais que c'est un modèle à un seul facteur qui explique au mieux les résultats. Cependant, il est regrettable que les auteurs aient choisi des tests de flexibilité aussi complexes, comme le test de Brixton, qui ne mesure pas seulement la composante de flexibilité.

En résumé, un certain nombre d'études ont montré des déficits exécutifs dans le vieillissement cognitif normal. Cependant, dans les études qui viennent d'être présentées, on parle de fonctionnement exécutif au sens général, sans préciser quelle composante est impliquée. Plusieurs études indiquent qu'il n'est cependant pas évident de trouver des différences de performances entre jeunes et âgés dans des tâches exécutives. Wecker *et al.* expliquent cette observation par le fait que les fonctions exécutives sont parfois mal définies et que les chercheurs utilisent souvent des tâches complexes et hétérogènes ce qui rend les interprétations difficiles. Ils proposent donc de bien séparer les fonctions que l'on veut étudier pour pouvoir observer des effets significatifs. Dans la partie suivante, nous allons nous intéresser successivement à chacune des trois composantes exécutives retenues, la flexibilité mentale, la mise à jour des informations en mémoire de travail et l'inhibition des informations non pertinentes.

1.3.2. Effets sur les trois composantes exécutives

Flexibilité mentale

La flexibilité mentale, définie plus haut comme la capacité à changer de stratégie mentale lorsque celle utilisée n'est plus appropriée à la nouvelle situation, a été assez largement étudiée dans le vieillissement normal. Souvent, elle est étudiée sous une forme implicite, c'est-à-dire que le testing utilisé dans les études inclut des tests qui sont spécifiques à la flexibilité, mais la fonction étudiée n'est pas définie comme telle.

Dans la plupart des études sur le vieillissement du fonctionnement exécutif utilisant le *TMT*, soit comme mesure explicite de la composante de flexibilité, soit comme mesure du fonctionnement exécutif en général, les résultats indiquent que les participants âgés sont ralentis par rapport aux participants jeunes dans la partie B du test, indiquant que c'est la demande en flexibilité qui les ralentit dans ce test. Cependant, et nous le verrons dans notre étude, le *TMT* n'est pas une tâche de flexibilité simple et il semblerait qu'il implique d'autres fonctions cognitives et exécutives, comme l'inhibition par exemple.

Les études sur le vieillissement indiquent, pour la plupart, que la flexibilité est altérée. Par exemple, Ridderinkhof *et al.* ont montré à l'aide d'une variante du *WCST* que des participants âgés réalisaient plus d'erreurs de persévérations que des adultes jeunes, indiquant qu'ils étaient moins capables de changer de règles lorsque l'ancienne n'était plus appropriée et ce, même lorsque la consigne de changement de règle était explicite, comme l'avait également montré Nelson chez des patients avec déficits frontaux, en proposant une version modifiée du *WCST*, où le changement de règle était explicite. Par ailleurs, Van Gerven *et al.* ont montré que la composante de flexibilité n'était pas sensible au niveau d'éducation chez les âgés et qu'un niveau d'éducation élevé ne préservait pas de légers déclin de la capacité de flexibilité mentale. Pardo *et al.* ont réalisé une étude en

imagerie (TEP) sur des participants âgés sains, incluant des mesures de fonctions cognitives dont une évaluation de la flexibilité. Les résultats indiquent que les âgés sains présentent des dysfonctionnements du système attentionnel et de la flexibilité et que ces déficits sont corrélés avec une réduction de l'activité au niveau du cortex cingulaire antérieur.

Dans une étude sur le lien entre fonctions exécutives et vitesse de traitement, Keys et White ont montré que les participants âgés présentaient des déficits significatifs à toutes les tâches exécutives proposées, dont la flexibilité mentale. Les auteurs indiquent également que, lorsque la vitesse de traitement était contrôlée, les différences entre jeunes et âgés persistaient, surtout dans la tâche de flexibilité mentale. Cependant, la tâche de flexibilité choisie étant le *TMT B*, il semble que cette tâche ne soit pas forcément pure et qu'elle ne mesure pas seulement la capacité de flexibilité mentale.

Kramer *et al.* se sont également intéressés aux effets du vieillissement sur la flexibilité. Pour cela ils ont réalisé une expérience incluant des tâches à accomplir d'une part de manière isolée, d'autre part en alternant entre les deux tâches. Ils comparent un groupe de participants jeunes à un groupe de participants âgés. Les résultats montrent un effet significatif de l'âge et de la condition, indiquant que la flexibilité est appauvrie dans le vieillissement normal ; ils montrent également que la performance des jeunes et des âgés augmente avec l'entraînement et que lorsque les sujets répètent la même expérience un mois plus tard, les participants âgés sont capables de maintenir leurs performances à un niveau de compétence équivalent à celui des jeunes. Ce bénéfice est gardé pendant deux mois. La flexibilité est donc atteinte dans le vieillissement, mais les sujets âgés sont capables de compenser grâce à l'entraînement. Par ailleurs, lorsque des indices explicites sont donnés aux participants dans une tâche de flexibilité, la différence jeunes-âgés tend à disparaître .

Les études mesurant la flexibilité dans le vieillissement montrent donc un une augmentation des temps de réponse chez les participants âgés par rapport à ceux des jeunes. Les déficits s'expriment surtout en termes de ralentissement par rapport aux participants jeunes, mais peu en termes d'augmentation du nombre d'erreurs. De plus, dans la plupart des études présentées, la variable de vitesse de traitement n'est pas contrôlée et la majorité des tâches développées pour mesurer cette composante exécutive sont sous forte contrainte temporelle. Les difficultés des participants âgés pourraient donc s'expliquer par un ralentissement de la vitesse d'exécution. Il serait intéressant de contrôler cette variable de vitesse de traitement pour voir si les différences jeunes/âgés persistent.

Mise à jour

La mise à jour des informations en mémoire de travail est certainement la fonction exécutive la moins étudiée dans le vieillissement normal, comparée à la flexibilité et à l'inhibition. Cependant, quelques auteurs se sont intéressés à la façon dont cette capacité de mise à jour pouvait se détériorer. Ainsi Hartman *et al.* ont testé l'hypothèse du vieillissement de la composante de mise à jour grâce au paradigme du *delayed match-to-sample*, c'est-à-dire des tâches où le sujet doit maintenir des informations en mémoire et les mettre à jour, pour ensuite les rappeler après un délai variable. Les

résultats indiquent que les participants âgés sont significativement moins performants que les jeunes. Hartman *et al.* indiquent par ailleurs que ce sont les processus d'activation et de suppression qui sont significativement atteints, mais pas le processus de maintien.

La mise à jour est généralement associée aux fonctions exécutives dans leur ensemble. Par exemple, Verhaeghen et Basak proposent de réaliser une étude sur la composante de flexibilité mentale et utilisent une tâche de n-back, qui est la tâche la plus couramment utilisée pour mesurer la composante de mise à jour. Il nous paraît donc intéressant de s'intéresser à cette composante et d'observer les effets que peut avoir le vieillissement sur celle-ci.

Inhibition

La troisième composante à laquelle nous allons maintenant nous intéresser est la composante d'inhibition. C'est certainement celle qui a été le plus largement décrite dans la littérature sur le vieillissement normal et pathologique. Cette littérature sur l'inhibition a commencé avec l'article de référence de Hasher et Zacks. Selon ces auteurs, le vieillissement serait associé à un dysfonctionnement des processus d'inhibition qui contrôlent l'accès et le maintien temporaire des informations non pertinentes pour la tâche en cours. Ce déficit se traduit par la présence en mémoire de travail d'informations distractrices pouvant interférer avec une bonne réalisation de la tâche en cours. Toujours selon Hasher et Zacks, un traitement de l'information réussi autorise les informations pertinentes à pénétrer dans la mémoire de travail tout en repoussant l'information non pertinente en dehors de la mémoire de travail. Elles proposent trois hypothèses pour expliquer les déficits des participants âgés dans des tâches d'inhibition, (1) l'enrichissement des informations en mémoire de travail : les âgés ayant des mécanismes de suppression de l'information non pertinente moins efficaces que les jeunes, ils incluent en mémoire de travail plus d'information, (2) l'activation plus soutenue de ces informations et (3) une interférence plus grande à l'encodage indiquant que les âgés sont plus sensibles à l'interférence d'informations distractrices.

Plusieurs revues de questions sont aujourd'hui disponibles dans la littérature sur les déficits d'inhibition dans le vieillissement normal. Ainsi, Le Bouedec *et al.* rapportent-ils que les changements cognitifs liés à l'âge sont principalement dus à la mémoire de travail et plus particulièrement aux déficits d'inhibition. Persad *et al.* ont également montré que les déficits d'inhibition apparaissent relativement tôt dans le vieillissement, c'est-à-dire à partir de l'âge de 60 ans, mais aussi que ces déficits continuent d'augmenter au cours du vieillissement. Ils ont en effet étudié les performances de participants âgés (65 à 80 ans) et très âgés (plus de 80 ans) à différentes tâches impliquant l'inhibition, et l'avancée en âge s'est avérée le meilleur prédicteur de la réduction des performances. Ces auteurs montrent par ailleurs, grâce à une analyse de régression, que la variabilité en fonction de l'âge sur les performances à des tests d'attention (*California Verbal Learning Test*, *CVLTet Paced Auditory Serial Addition Test*, *PASAT*) n'étant pas spécifiques à la mesure de l'inhibition, était très atténuée lorsque les mesures d'inhibition étaient entrées comme facteur explicatif. En d'autres termes, l'inhibition apparaît comme un médiateur général des détériorations cognitives liées à l'âge, même dans des activités où elle ne semble pas impliquée. Cependant, il faut noter que les participants inclus dans cette étude étaient

âgés de 60 à 85 et devaient avoir un niveau de *MMSE* supérieur à 23 pour pouvoir participer ($M = 27.8$, $SD = 1.72$). Il est donc probable qu'une partie des participants avait des déficits cognitifs légers voire une démence en stade débutant et que les résultats observés peuvent être expliqués par cette détérioration pathologique. Pour terminer, il est intéressant de noter que certains auteurs ont également démontré que l'inhibition n'était pas atteinte de manière aussi franche qu'on peut le penser dans le vieillissement normal. Une étude sur l'amorçage négatif dans le test de Stroop indique en effet que les âgés ne montrent pas de diminution significative de l'amorçage négatif (qui serait un signe de déficits d'inhibition) dans le Stroop. Cette étude confirme à nouveau que l'inhibition ne peut pas être considérée comme un processus unitaire et que les effets de l'âge peuvent varier en fonction du processus impliqué. Il semble important de distinguer les aspects automatiques des aspects contrôlés de l'inhibition. L'inhibition, automatique, qui renvoie à une réaction résiduelle involontaire, apparaît en dehors de la conscience du sujet. Elle est présente dans les tâches d'inhibition de retour ou dans les tâches d'amorçage négatif où l'inhibition du stimulus à l'essai $n-1$ est automatique et donc plus difficile à réactiver lorsqu'il devient stimulus cible à l'essai n . Ce type d'inhibition n'est pas sensible aux effets de l'âge. En revanche, l'inhibition contrôlée, qui se définit comme la capacité à inhiber volontairement des réponses dominantes ou à empêcher l'accès en mémoire de travail d'informations non pertinentes, semble plus sensible aux effets de l'âge.

Synthèse

En définitive, les études sur le vieillissement normal du système exécutif semblent être généralement en accord pour indiquer que les trois composantes du système exécutif sont sensiblement altérées dans le vieillissement normal. Fisk et Sharp ont réalisé une analyse des effets du vieillissement sur les trois composantes, la mise à jour, la flexibilité et l'inhibition. À l'aide d'une analyse factorielle ils réaffirment les résultats de Miyake *et al.* (2000). Ils montrent également que les trois composantes sont sensibles aux effets du vieillissement. Ils ajoutent cependant un quatrième facteur à leur modèle, qu'ils appellent l'accès à la mémoire. Ce quatrième facteur n'apparaît pas sensible aux effets de l'âge.

Nous allons à présent nous intéresser à la manière dont ces déficits peuvent avoir des conséquences sur une activité qui, comme nous l'avons présenté plus haut, implique fortement les processus exécutifs : la conduite automobile, qui fait partie de la vie quotidienne de chaque adulte et en particulier des adultes âgés.

2. Conduire en vieillissant

Nous avons déjà souligné dans une section précédente que la conduite automobile était une activité qui pouvait sembler tout à fait banale et qui est pratiquée par la majorité des adultes. Cependant, c'est une tâche très complexe, qui implique des fonctions cognitives de haut niveau et qui fait intervenir le système exécutif. Nous avons également rappelé que la France, ainsi que tous les autres pays industrialisés allaient subir d'importantes modifications démographiques dans les années à venir, avec une explosion de ses classes d'âge les plus élevés. Ces données nous incitent à présent à nous pencher sur

les aspects du vieillissement qui peuvent avoir une incidence sur la conduite automobile. En effet, la conduite est devenue un mode de déplacement extrêmement répandu chez les âgés, qui ressentent plus de difficultés à utiliser les transports en commun et préfèrent continuer à conduire. La question de la conduite chez les âgés est donc un problème qui intéresse non seulement la communauté scientifique, qui en étudiant les effets du vieillissement peut mieux comprendre les processus qui la sous-tendent, mais aussi la société et les pouvoirs publics, qui tiennent à protéger au mieux les usagers de la route. Par exemple, une association canadienne a récemment recensé pour ses membres âgés les facteurs qui peuvent modifier l'aptitude à la conduite afin de les mettre en garde sur leur sur-risque d'accident et sur les modifications auxquelles il faut faire attention : la dégradation graduelle de la vue, une limitation des mouvements de la tête, du cou et du tronc, le ralentissement dans les capacités de traitement de l'information, les problèmes de santé qui deviennent plus graves, ou encore la prise de médicament. Cependant le conducteur âgé est également un conducteur prudent, et les études sur le risque d'accident dans cette tranche d'âge font encore largement débat aujourd'hui. Dans cette section, nous nous attacherons donc à présenter un bilan des connaissances actuelles concernant les effets du vieillissement sur la conduite automobile.

2.1. Données démographiques et accidentologiques

Nous avons souligné précédemment que le vieillissement de la population dans les pays industrialisés était un fait inéluctable. En effet, en raison d'un allongement de la durée de vie en bonne santé et de l'augmentation du nombre de personnes âgées de plus de 65 ans (suite au baby-boom) on observe aujourd'hui ce que les démographes appellent le phénomène de « vieillissement démographique ». Cependant, le terme de vieillissement est ambigu, il reflète à la fois le processus et son résultat : c'est parce que les personnes constituant une population vieillissent individuellement que la population vieillit dans sa globalité. Cependant, bien que le vieillissement individuel soit inéluctable, le vieillissement de la population ne l'est pas si le poids des naissances est suffisamment important. Mais même si le poids des naissances venait subitement à augmenter en France, le nombre de conducteurs âgés augmenterait tout de même en raison notamment de l'augmentation à venir du nombre de conductrices âgées car les femmes plus jeunes ont aujourd'hui leur permis dans la même proportion que les hommes, ce qui n'était pas le cas il y a quelques dizaines d'années.

On attribue généralement au conducteur âgé des qualités comme l'expérience, la prudence, et des comportements tels que le respect des règles de conduite et une réduction de la prise de risque. Cependant, un certain nombre d'études ont montré que le risque d'accident était plus important chez les âgés que chez les jeunes et en cas d'accident effectif, la gravité des blessures est plus importante chez les âgés. Caird *et al.* indiquent que 50 % des accidents des conducteurs âgés interviennent aux intersections, contre seulement 23 % chez les conducteurs plus jeunes. Fontaine indique également un risque aggravé pour les conducteurs de plus de 65 ans, ainsi qu'une gravité lésionnelle plus importante. Dans cette revue de littérature sur la conduite automobile chez les seniors, elle rapporte également les différentes caractéristiques retrouvées principalement lors des accidents impliquant les conducteurs âgés : homme retraité non

alcoolisé, en trajet de loisirs avec un passager, l'accident intervient généralement de jour et souvent en intersection .

Une étude américaine suggère même des projections alarmantes pour les 20 prochaines années, indiquant qu'avec l'augmentation du nombre de conducteurs âgés et l'augmentation de la densité du trafic, d'ici à 2030, le nombre de conducteurs âgés impliqués dans un accident fatal risque d'augmenter de 155% et les conducteurs de plus de 65 ans représenteront 54% du nombre de tués sur les routes. Ces projections ne tiennent compte que des facteurs actuels et ne prennent pas en considération les améliorations possibles des conditions de circulation et les restrictions à envisager pour les conducteurs à risque .

De plus lorsque l'accident intervient en intersection, le conducteur âgé est la plupart du temps considéré comme responsable de la survenue de l'accident . L'intersection semble être un point important à souligner dans le cadre des études portant sur le vieillissement de la conduite automobile. Zhang *et al.* ont comparé les circonstances de la survenue d'accidents au sein de trois groupes d'âge (jeunes, âge moyen et séniors). Les auteurs notent que les circonstances d'accident diffèrent significativement entre le groupe le plus jeune et le groupe le plus âgé et si le nombre d'accidents ne varie pas entre jeunes et âgés au niveau des intersections protégées, les conducteurs âgés ont plus d'accidents que les jeunes au niveau des intersections non protégées. Nous pensons que cette situation implique des processus cognitifs particuliers, comme les composantes exécutives, sur lesquels nous reviendrons dans le présent travail.

Cependant, les études ayant pour but d'évaluer un potentiel sur-risque d'accident dans le vieillissement font encore débat à l'heure actuelle, aussi bien en Europe qu'aux Etats-Unis. Plusieurs études ont en effet montré que si l'on prend en compte la réduction du nombre de kilomètres parcourus, le risque d'accident n'est en fait pas plus élevé chez les conducteurs âgés que chez des conducteurs plus jeunes . Par ailleurs, il semble que les conducteurs âgés mettent en place des processus de compensation en évitant certaines situations de conduite (pluie, trafic important...) ou en réduisant leur vitesse . Comme l'indiquent également Charlton *et al.* les processus impliqués dans l'autorégulation et la compensation sont des processus complexes. Vance *et al.* ont également montré à l'aide d'une analyse factorielle que les conducteurs âgés conscients de certains de leurs troubles perceptifs ou cognitifs limitaient par eux-mêmes l'utilisation de leur véhicule, même si les troubles réellement observés étaient mineurs . Ils indiquent également que la perception par les conducteurs âgés de leurs déficits cognitifs était un facteur plus prédictif des modifications d'habitudes de conduite que les déclinés de la santé en général, bien que les conducteurs rapportent plus souvent une dégradation de leur santé que de leurs capacités cognitives. Ce résultat montre que les processus de compensation mis en place par les conducteurs interviennent relativement tôt. De plus, les conducteurs âgés sont de plus en plus enclins à accepter des régulations venant de l'extérieur (ministère, médecins...) si ces régulations sont présentées de manière positive . En effet, cette étude indique que sur onze types de régulations proposées allant de « autorisé à conduire avec une vue corrigée » à « autorisé à conduire dans un périmètre de 10 km autour du foyer », les participants en acceptent six. En outre, les conducteurs acceptent d'être évalués régulièrement dans un centre spécifique du permis de conduire. Cependant, les auteurs

indiquent que le terme « *assessment* » a été beaucoup mieux accepté par les participants que le terme « *evaluation* ».

En résumé, l'augmentation du nombre de conducteurs âgés incite de plus en plus les chercheurs à s'intéresser à cette catégorie de population qui pourrait présenter un risque important en termes de sécurité routière. Il serait à présent intéressant de faire le point sur les recherches qui se sont intéressées à la conduite automobile et qui prennent en compte les diminutions des capacités cognitives, et plus particulièrement des capacités exécutives dans le vieillissement normal.

2.2. Vieillesse cognitive et conduite automobile

A côté des études épidémiologiques et de celles qui portent sur le risque d'accident des conducteurs âgés, on commence aujourd'hui à observer dans la littérature un nombre de plus en plus important d'études concernant le lien entre le fonctionnement cognitif, le vieillissement et les compétences de conduite.

2.2.1. Mécanismes visuo-attentionnels

Plusieurs études se sont d'abord intéressées aux déficits visuels, visuo-attentionnels et attentionnels qui pourraient avoir un rôle dans la conduite. Ball et Owsley ont par exemple introduit la notion de champ visuel utile (*Useful Field of View*), qui correspond à l'aire du champ visuel dans laquelle les informations peuvent être perçues et traitées en un seul coup d'œil. La taille de ce champ visuel utile (CVU) varie selon quatre paramètres, (1) le temps de présentation de l'information visuelle, (2) les efforts attentionnels à réaliser par le sujet entre la tâche centrale et la tâche périphérique, (3) la saillance de la cible périphérique et (4) l'excentricité entre la cible périphérique et la vision centrale. Chez les âgés, on observe un rétrécissement du CVU. Ball et Owsley estiment que le rétrécissement du CVU est responsable de la diminution de la prise d'informations pertinentes en conduite et donc de l'augmentation du risque d'accident. De Raedt et Ponjaert-Kristoffersen ont également confirmé ce résultat et indiquent que la réduction du CVU et la performance à un test sur route partageraient 44 % de variance commune.

Une étude récente, indique que les conducteurs âgés avec déficits attentionnels avaient un comportement de conduite plus dangereux lors d'insertions dans un trafic à des intersections. Cette étude incluait 20 conducteurs âgés. Les participants ont été classés en fonction de la présence ou non de troubles de l'attention. Dix d'entre eux présentaient des troubles de l'attention (performances déficitaires sur au moins un des deux tests d'attention visuelle sélective proposés) et dix n'en présentaient pas. L'expérimentation a consisté à faire conduire les participants dans un véhicule instrumenté et à réaliser des insertions dans le trafic. On demandait également au conducteur d'appuyer sur un bouton pour indiquer le moment le plus tardif où il s'insérerait dans le trafic s'il avait à le faire. Les résultats indiquent que les conducteurs avec déficits d'attention visuelle sélective présentaient des comportements au volant plus dangereux que les conducteurs sans déficits d'attention. En effet, les participants avec déficits mettent plus de temps à s'insérer dans le trafic et présentent une prise de décision moins sûre lors des insertions. Les auteurs concluent que ce sont les déficits visuo-attentionnels

présents dans le vieillissement normal qui peuvent augmenter le risque d'accident des conducteurs âgés.

2.2.2. Fonctions exécutives

Une revue de littérature récente indique que parmi les facteurs qui semblent expliquer l'augmentation du risque d'accident chez les conducteurs âgés, la dégradation des fonctions exécutives occupe la place la plus importante. Cette méta-analyse montre également que de faibles corrélations entre le risque d'accident et la vitesse de traitement sont rapportées dans la littérature surtout lorsque les mesures de la vitesse de traitement sont réalisées à partir de temps de réaction simples. Il semblerait que les mesures à partir de temps de réaction de choix donnent de meilleures corrélations, mais les auteurs n'ont pas trouvé une fiabilité importante entre les différentes études.

Daigneault *et al.* ont réalisé une étude sur le lien entre les déficits exécutifs rencontrés dans le vieillissement normal et le risque pour ces conducteurs. Le but de l'étude était double : d'une part, il s'agissait de comparer les performances à des tâches impliquant les fonctions exécutives, de deux groupes de conducteurs âgés, un groupe qui a eu au moins un accident dans les cinq dernières années, avec un groupe qui n'a pas eu d'accident ; d'autre part, les auteurs ont cherché à étudier les relations entre les accidents et les performances à des tests neuropsychologiques de mesure des fonctions exécutives et des comportements à risque. Les résultats indiquent, sur la base de questionnaires, que les conducteurs âgés affirment réduire considérablement leur prise de risque lorsqu'ils sont au volant, en conduisant moins vite, moins longtemps et en évitant certaines situations (pluie, conduite nocturne, trafic dense...). Cependant, parmi les participants qui ont eu au moins un accident dans les cinq dernières années, 26.6% ont affirmé n'avoir eu aucun accident. De plus, la comparaison entre les deux groupes de conducteurs sur les performances aux tests exécutifs indique des différences significatives au test de Stroop ainsi qu'au test de la Tour de Londres, mais pas au *WCST*, ni au *Color Trail Test*, variante du *TMT* utilisant l'alternance entre des couleurs à la place de l'alternance entre des lettres et des chiffres. Les résultats de cette étude indiquent donc que les conducteurs qui ont eu au moins un accident ont plus de déficits exécutifs que les autres. Cependant, les auteurs ne s'interrogent pas sur les différences obtenues entre les tests. Il semblerait donc que certaines capacités exécutives soient spécifiquement atteintes et que ce soient ces atteintes particulières qui tendent à faire augmenter le risque d'accident chez les conducteurs âgés.

Par ailleurs, De Raedt et Ponjaert-Kristoffersen, dans une étude citée plus haut, ont utilisé une large batterie de tests neuropsychologiques afin d'étudier le lien entre des tests cognitifs, le risque d'accident et la performance à un test de conduite sur route chez des conducteurs âgés. Les auteurs indiquent que, après le CVU, c'est la composante de flexibilité mentale qui explique le mieux la performance au test sur route (30 % de variance commune). Cependant cette flexibilité ne partage que 13% de variance avec le risque d'accident. Toutefois, la tâche sélectionnée pour mesurer la flexibilité mentale était une tâche relativement complexe qui mélangeait à la fois des stimuli visuels et auditifs. Il y avait donc un changement de modalité et les deux tâches devaient aussi être réalisées en condition simultanée, c'est-à-dire en ajoutant une composante d'attention divisée. Il ne

s'agit donc pas vraiment d'une tâche de mesure exclusive de la flexibilité. C'est pourtant à notre connaissance, la seule étude qui confrontait explicitement une mesure de la flexibilité mentale à la performance de conduite.

2.2.3. Evaluation de la « performance » de conduite

De plus en plus de médecins expriment une forte demande auprès des chercheurs pour qu'ils leur fournissent des méthodes simples et rapides d'évaluation afin de répondre aux demandes des familles concernant la sécurité de certains conducteurs âgés. Il n'existe aujourd'hui, hélas, aucun test neuropsychologique simple qui permettrait de discriminer un bon conducteur d'un conducteur à risque. Cependant, on sait que si de telles évaluations neuropsychologiques devaient être créées, il faudrait qu'elles incluent une évaluation du fonctionnement exécutif. Freund *et al.* ont proposé qu'un test très rapide à réaliser pouvait être un bon prédicteur du risque au volant : le test du dessin d'horloge, qui a été démontré comme étant une bonne mesure du fonctionnement exécutif général. Leur étude montre que le test du dessin d'horloge présente une bonne sensibilité (64 %) et une très haute spécificité (97.7 %) pour prédire la performance à l'évaluation de conduite. Cependant, les composantes exécutives impliquées dans le test sont assez mal connues. En effet, l'étude de Royall *et al.* indique que ce test est significativement corrélé avec d'autres mesures du fonctionnement exécutif, mais cela ne signifie pas que ce soit spécifiquement un test de mesure du fonctionnement exécutif. D'ailleurs, dans leur étude, ils montrent également que le *MMSE* est également significativement corrélé aux tests exécutifs. Il est clair que prédire la performance de conduite sur la base de simples tests réalisés par un clinicien dans un bureau ne semble pas pertinent, car lorsque le test sera complètement échoué, le clinicien pourra effectivement avoir de sérieux doutes sur la capacité de conduire du patient, mais qu'en sera-t-il lorsque le test sera réussi ?

Plusieurs études sur simulateur de conduite se sont également intéressées aux performances des conducteurs âgés dans diverses situations. En général, ces études indiquent que le simulateur de conduite est un bon moyen de mesurer des performances et permet de confronter les participants à des situations dans lesquelles il ne serait pas possible de les mettre en situation de conduite réelle. Cox *et al.* indiquent par exemple que les performances sur simulateur de conduite sont capables de prédire de manière significative les performances en route réelle chez des conducteurs âgés. Freund *et al.* aboutissent à la même conclusion en comparant des conducteurs âgés sur la base d'une évaluation de la conduite sur route et d'une évaluation sur simulateur. Les auteurs concluent que le simulateur peut représenter une méthode aussi valide et sensible que les évaluations sur route.

Dans une autre recherche, Freund *et al.* ont réalisé une étude en simulation de conduite sur les troubles de confusion de pédales chez les conducteurs âgés sans déficits cognitifs avérés. Leur étude consistait à faire conduire des participants âgés dans le simulateur de conduite et à dénombrer les confusions de pédales. Cette mesure a ensuite été comparée aux performances à trois tests neuropsychologiques, le *MMSE*, le *TMT* parties A et B et le *Clock drawing Test (CDT)*. Les résultats indiquent que les conducteurs les plus âgés (plus de 80 ans) réalisent significativement plus de confusions de pédales

(accélérations inappropriées) que les autres conducteurs âgés. De plus, les auteurs ont réalisé une analyse de régression et le facteur qui prédit le mieux le nombre de confusions de pédales est le *CDT*. Cependant, ces troubles de confusion de pédales sont rapportés ici sur simulateur et il semblerait que les difficultés d'adaptation des conducteurs âgés dans le simulateur de conduite aient pu amplifier le phénomène, car sur les 180 participants inclus, il y en avait tout de même 54 qui ont effectué des confusions de pédales. Cette étude mériterait donc d'être reproduite sur route réelle, afin de vérifier si ces confusions sont aussi fréquentes. Ces troubles de confusion de pédales ont d'ailleurs été reportés en situation réelle de conduite, mais n'ont été observés que chez des conducteurs présentant des déficits neurologiques (Maladie d'Alzheimer).

Pour terminer, plusieurs recherches se sont également intéressées à comparer les études en conduite réelle aux études sur simulateur de conduite. Lee *et al.* rapportent de fortes corrélations positives entre les performances mesurées en situation réelle et les performances mesurées sur le simulateur de conduite. Ils suggèrent que le seul inconvénient du simulateur comparativement aux situations réelles concerne l'acceptabilité du simulateur par les conducteurs et en particulier par les conducteurs âgés, qui peuvent se sentir mal à l'aise à conduire en situation virtuelle, voire qui peuvent souffrir du mal du simulateur .

En résumé, les études sur simulateur de conduite représentent une bonne alternative aux études sur route réelle qui sont beaucoup plus coûteuses, plus complexes à mettre en place et qui ne permettent pas une aussi bonne reproductibilité des situations que le simulateur. De plus, dans la recherche de volontaires pour les études sur la conduite, le critère de jugement et la peur de l'évaluation entraînent un biais expérimental important : seuls les conducteurs qui se sentent sûrs d'eux et qui n'ont pas peur d'être évalués se portent volontaires. Précédemment, nous avons été confrontés à ce problème pour trouver des participants volontaires dans une étude sur route réelle alors que nous n'avons pas rencontré ce type de problème lors d'une étude sur le simulateur de conduite .

La plupart des études que nous venons de présenter avaient comme but l'étude du lien entre la performance de conduite et la performance à des tests neuropsychologiques. Peu d'études se sont intéressées à une meilleure compréhension des mécanismes cognitifs qui sous-tendent l'activité de conduite. Il nous semble cependant un peu prématuré de vouloir prédire la performance de conduite sur la base de tests neuropsychologiques alors que l'activité de conduite n'a pas encore été parfaitement décrite et interprétée en terme de fonctions cognitives et exécutives mises en jeu. Notre travail de recherche devrait apporter des éléments nouveaux importants sur le rôle de ces fonctions et permettre de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu, travail nécessaire avant toute tentative de prédiction des performances de conduite.

2.3 Synthèse

En définitive, le vieillissement « normal » s'accompagne de premières modifications sur le plan psychologique et cognitif. En effet, les adultes âgés présentent une dégradation légère mais significative des fonctions perceptives, comme la vision ou l'audition (composantes indispensables à la réalisation de la conduite automobile), des fonctions

attentionnelles, mais aussi des fonctions exécutives. Seulement, il ne faut pas oublier que l'une des particularités essentielles du vieillissement, c'est son caractère différentiel : il existe de très grandes différences inter- et intra-individuelles au sein du vieillissement cognitif. Il est également important de ne pas imaginer un organisme vieillissant comme un organisme qui fonctionne moins bien, mais plutôt comme un organisme qui fonctionne différemment avec ses accumulations d'expériences.

Le conducteur âgé est aujourd'hui un sujet d'étude particulièrement répandu dans la littérature scientifique, et pas seulement dans la littérature spécialisée dans les domaines de la sécurité des transports. En effet, de nombreuses revues de psychologie et de neuropsychologie publient régulièrement des articles concernant les âgés face à la conduite automobile. Bien que la plupart indique que les conducteurs âgés présentent des risques d'accident plus importants, certains ont montré que les conducteurs âgés étaient capables de mettre en place des stratégies de compensation et d'adaptation. Le modèle de Brouwer (2002) permet également de rendre compte de ces possibilités de compensation et d'adaptation. L'expérience et l'accumulation de connaissances permettent au conducteur âgé d'acquérir un « savoir-faire au volant » pouvant lui permettre de compenser l'apparition de déficits exécutifs intervenant aux niveaux tactiques et opérationnels. Pour mettre en place ces stratégies de compensation, le conducteur doit cependant être conscient des difficultés qu'il peut rencontrer. Si c'est effectivement le cas dans le vieillissement normal, cela semble poser quelques problèmes dans des pathologies dégénératives comme la maladie d'Alzheimer, où le patient ne prend pas immédiatement conscience des déficits qu'il peut rencontrer et en particulier dans les stades précoces de la maladie.

Chapitre 3. Maladie d'Alzheimer et conduite automobile

1. Qu'est ce que « la Maladie d'Alzheimer » ?

Le 8 avril 1906, décédait Auguste Deter, 55 ans, la patiente du neurologue allemand Alois Alzheimer. Alzheimer autopsia son cerveau et y découvrit les plaques brunes et les « écheveaux » responsables de la détérioration cognitive de la malade et de ses pertes de mémoire si connues aujourd'hui sous le nom de la maladie qui porte son nom .

La maladie d'Alzheimer est souvent associée au terme de démence. Etymologiquement « de-mens » signifie « qui est privé de son esprit ». Le sens actuel de démence correspond à « un syndrome important, grave et définitif, mais commun à différentes maladies mentales » . C'est une pathologie du système nerveux central qui se caractérise cliniquement par une démence progressive, définie par l'association d'un syndrome démentiel, une détérioration progressive des fonctions cognitives avec un retentissement significatif sur les activités sociales et professionnelles du malade et

l'existence de lésions cérébrales spécifiques . La maladie d'Alzheimer correspond à la forme de démence la plus fréquente. Elle est conçue aujourd'hui comme un syndrome, constitué de troubles cognitifs et psycho-comportementaux particuliers .

Si, au début du vingtième siècle, on pensait que le vieillissement pathologique, comme la maladie d'Alzheimer, était un processus en continuité avec le vieillissement normal, on a écarté aujourd'hui cette idée. En effet, avec la découverte dans les années 70 de l'altération importante des systèmes de neurotransmetteurs et l'utilisation plus répandue des techniques d'imagerie, on a montré que ce continuum n'était pas envisageable. Eustache *et al.* ont, par exemple, montré grâce à une étude en TEP (tomographie par émissions de positons) que les déficits décelés lors d'un test de mémoire épisodique ont pour origine une diminution du métabolisme dans des régions cérébrales différentes pour la maladie d'Alzheimer et pour le vieillissement normal.

Ce chapitre a pour but de donner une description détaillée de cette maladie, qui touche de plus en plus de personnes âgées, et de ses symptômes. Nous montrerons que si le trouble de mémoire est celui qui mène au diagnostic, ce sont d'autres troubles précoces qui vont particulièrement nous intéresser dans le cadre de la conduite automobile : les troubles attentionnels et exécutifs, puisqu'on s'accorde à dire aujourd'hui que la maladie d'Alzheimer s'accompagne de troubles du fonctionnement exécutif de manière précoce . Après ces descriptions symptomatiques et quelques données anatomiques, nous nous focaliserons sur le déficit exécutif. Enfin, dans la dernière section, nous présenterons les données actuelles de la littérature sur le lien entre conduite automobile et maladie d'Alzheimer. Tout au long de ce chapitre, ainsi que dans les suivants, nous nous focaliserons uniquement sur le stade débutant de la maladie, c'est-à-dire le stade pour lequel le patient est toujours autonome et indépendant, vit à domicile et utilise encore régulièrement son véhicule.

1.1. Définitions, symptômes, anatomie

1.1.1. Définitions : Démence et Maladie d'Alzheimer

Le syndrome démentiel se caractérise par une altération progressive de la mémoire et de l'idéation, suffisamment marquée pour handicaper les activités quotidiennes. Le syndrome doit être apparu depuis au moins six mois et être associé à au moins un trouble des fonctions cognitives, telles que le langage, le jugement, la praxie, la gnose ou encore la personnalité . Cette définition a été proposée par l'*American Psychiatric Association* (APA) pour délimiter la terminologie de ce syndrome et permettre un diagnostic fiable de la démence. Le tableau ci-dessous (Tableau 2) présente les critères détaillés nécessaires à l'établissement du diagnostic de démence. L'intérêt de cette nosographie est d'isoler le syndrome démentiel des autres troubles neurologiques pouvant intervenir avec le vieillissement.

Par ailleurs, deux types de démences peuvent être définis d'un point de vue étiologique : les démences dégénératives et les démences non dégénératives. Les démences non dégénératives correspondent aux démences dites acquises, c'est-à-dire dont l'apparition n'est pas lente et insidieuse, mais plutôt brutale. La plus fréquente est la

démence vasculaire. Il existe cependant bien d'autres types de démence non dégénératives, telles que les démences neurochirurgicales (hématome sous-dural, hydrocéphalie à pression normale) les démences toxiques (syndrome de Korsakoff) ou infectieuses (Maladie de Creutzfeld-Jakob). Les démences dégénératives sont, quant à elles, diagnostiquées après élimination de ces multiples causes de démences non dégénératives. Les démences dégénératives sont les plus fréquentes : elles représentent 60% de l'ensemble des démences et la plus fréquente est la Maladie d'Alzheimer qui représente à elle seule 75% des démences dégénératives .

Tableau 2. Critères diagnostiques de la démence d'après le DSM-IV (APA, 1994)

A. Déficits cognitifs multiples	1. Altération de la mémoire (capacité à apprendre des informations nouvelles ou à se rappeler les informations apprises antérieurement) ; 2. Perturbations cognitives suivantes : aphasie (perturbation du langage), apraxie (altération de la capacité à réaliser une activité motrice malgré des fonctions motrices intactes), agnosie (impossibilité de reconnaître ou d'identifier des objets) ; 3. perturbation des fonctions exécutives
B. Déclin cognitif par rapport fonctionnement antérieur	Déficits cognitifs des critères A1 et A2 à l'origine d'une altération significative du fonctionnement social et représentent un déclin significatif par rapport au niveau du fonctionnement antérieur.
C. Déclin progressif et continu	
D. Pas d'autre atteinte du système nerveux central	1. Pas d'autres affections du système nerveux central qui peuvent entraîner des déficits progressifs de la mémoire et du fonctionnement cognitif (maladie cérébro-vasculaire, maladie de Parkinson, de Huntington, hématome sous-dural, hydrocéphalie à pression normale, tumeur cérébrale) ; 2. pas d'affections générales pouvant entraîner une démence (hypothyroïdie, carence en vitamine B12 ou en folates, hypercalcémie, VIH...) ; 3. pas d'affections induites par une substance médicamenteuse.
E. Pas de confusion mentale	
F. Pas de dépression ou de psychose	La perturbation n'est pas mieux expliquée par un trouble de l'Axe I (par exemple : trouble dépressif majeur, schizophrénie).

Source : D'après Sellal (2002, p.94)

Comme nous l'avons indiqué en introduction, le nom de cette maladie vient du médecin allemand Alzheimer qui a décrit pour la première fois les lésions et les symptômes caractéristiques de cette maladie il y a cent ans. Habib et Poncet (1998) rapportent la description faite par Alzheimer du comportement de sa malade et, bien qu'il n'ait pas utilisé les termes d'amnésie, d'aphasie, d'apraxie ou encore d'agnosie,

caractéristiques du syndrome « alzheimerien », Alzheimer avait déjà, à cette époque, établi le tableau clinique presque complet de cette maladie.

La particularité de la maladie d'Alzheimer est que sa description ne peut pas être présentée sous la forme de critères de diagnostic établis, mais uniquement sous la forme de traits cliniques observés . En d'autres termes, le diagnostic définitif de la maladie d'Alzheimer ne peut pas être effectué du vivant du patient, mais seulement de manière post-mortem après autopsie du cerveau. On diagnostique la maladie d'Alzheimer de manière probable ou possible uniquement par description de traits cliniques. Le *National Institute of Neurological and Communicative Disorders and Stroke and Alzheimer's Disease and Related Disorders Association* distingue trois niveaux de diagnostic de la maladie d'Alzheimer (Tableau 3). Le premier niveau est le diagnostic de maladie d'Alzheimer **probable**. Il inclut une démence établie par un examen clinique documenté, par exemple, par le score de MMSE ou un examen similaire et complété par une évaluation neuropsychologique, des déficits dans au moins deux domaines cognitifs, avec une altération progressive de la mémoire, sans détérioration de la conscience. Il s'agit du stade de maladie d'Alzheimer débutant. Le niveau de diagnostic de maladie d'Alzheimer **possible** correspond à un syndrome démentiel déjà bien établi avec une absence d'étiologie reconnue de démence non dégénérative en l'absence d'autres désordres neurologiques ou psychiatriques. Enfin, les critères de diagnostic de maladie d'Alzheimer **définitif** sont une maladie d'Alzheimer possible et des preuves histologiques, c'est-à-dire par observation de plaques séniles et de dégénérescence neurofibrillaire en quantité anormalement élevée dans le cerveau. Bien que ce tableau clinique ait permis une réelle amélioration du diagnostic de la maladie d'Alzheimer, Touchon *et al.* (1997) rappellent cependant que les critères NINCDS-ADRDA ne permettent pas un diagnostic précoce de la maladie. Il se base sur des symptômes déjà bien établis et bien visibles or on sait aujourd'hui que le diagnostic précoce de la démence est essentiel à une bonne prise en charge . Nous reviendrons sur la notion de stade précoce dans la partie consacrée aux déficits neuropsychologiques et plus particulièrement lorsque nous aborderons la notion de déficits des fonctions exécutives.

Tableau 3. Critères diagnostiques de maladie d'Alzheimer d'après le NINCDS-ADRDA.

1. Critères du diagnostic clinique de maladie d'Alzheimer probable	- Démence établie à l'examen clinique (MMSE par exemple), - Déficiences dans au moins deux fonctions cognitives, - Aggravation progressive de la mémoire et d'autres fonctions cognitives, - pas d'altération de la conscience, - Début entre 40 et 90 ans, le plus souvent après 65 ans, - Absence de cause systémique ou d'autres affections cérébrales pouvant être rendues responsables des troubles.
2. Eléments en faveur du diagnostic de maladie d'Alzheimer probable	- Détérioration progressive de fonctions spécifiques : aphasie, apraxie, agnosie, - Perturbation des activités quotidiennes et du comportement, - Antécédents familiaux, - Normalité des examens paracliniques.
3. Autres aspects cliniques compatibles avec le diagnostic de maladie d'Alzheimer probable	- Plateaux dans la progression de la maladie, - Association de symptômes de dépression, insomnie, incontinence, hallucinations, accès d'agitation verbale ou comportementale ..., - Autres symptômes neurologiques chez certains patients : hypertonie, myotonie, troubles de la marche, - Crises comitiales tardives.
4. Aspects rendant improbable le diagnostic de maladie d'Alzheimer	- Début soudain, - Signes neurologiques focaux : hémiplégie, déficit sensitif, altération du champ visuel, Crises comitiales survenant très tôt dans la maladie.
5. Diagnostic clinique de maladie d'Alzheimer possible	- Syndrome démentiel en l'absence d'autres troubles neurologiques, psychiatriques ou systémiques, suffisant pour causer la maladie, - Présence d'une autre affection systémique ou neurologique suffisante pour causer la démence mais considérée comme n'étant pas la cause de la démence, - Déficit cognitif isolé et sévère qui s'aggrave progressivement et en l'absence de toute autre cause identifiable.
6. Critères diagnostiques de maladie d'Alzheimer certaine	- critères de maladie d'Alzheimer probable et - preuve histopathologique obtenue par biopsie ou autopsie.

Source : D'après Habib et Poncet (1998, p.545)

1.1.2. Données histologiques

La maladie d'Alzheimer se caractérise, sur le plan histologique, par trois grands types de lésions cérébrales : la pathologie neurofibrillaire, les dépôts du peptide amyloïde-béta (A β) et les pertes neuronales et synaptiques. Ce que l'on appelle les « plaques séniles » sont en fait une combinaison de dépôt du peptide A β et de lésions neurofibrillaires extracellulaires sur le pourtour du dépôt. La dégénérescence neurofibrillaire se traduit par des lésions dans le cytoplasme des neurones et correspond à l'accumulation de filaments pathologiques dans le corps cellulaire et dans le prolongement des cellules nerveuses. Au cours de la maladie d'Alzheimer, la plupart des grands neurones de la substance grise corticale sont affectés par la dégénérescence neurofibrillaire. Les protéines tau

s'accumulent aussi bien dans les corps cellulaires des neurones que dans leurs prolongements. Le second type de lésions observée dans la maladie d'Alzheimer concerne le dépôt de peptide A β . Ce dépôt intervient au niveau extracellulaire. La plaque sénile constitue l'interface entre la dégénérescence neurofibrillaire et le dépôt A β . Ces lésions ne se répartissent pas de manière aléatoire dans le cerveau et le processus graduel de propagation suit un déroulement et une topographie particulières. En effet, les lésions débutent généralement par les régions limbiques et par-lymbiques. Duyckaerts *et al.* (1999) rapportent que dans les cas les moins évolués de la maladie, on observe généralement plus de plaques séniles que de dégénérescence neurofibrillaire, mais que dans les stades évolués, la quantité de dégénérescence neurofibrillaire est plus importante. Habib et Poncet (1998) proposent donc un scénario concernant la genèse de la maladie d'Alzheimer : une accumulation de peptide amyloïde provoque la formation de plaques séniles, qui implique une réaction neuronale : les éléments nerveux sont attirés vers la plaque, une augmentation de la toxicité provoque une dégénérescence neurofibrillaire à l'intérieur du neurone et le neurone en meurt.

En résumé, la maladie d'Alzheimer est une pathologie du système nerveux central, qui peut être classée comme une démence dégénérative. Elle est caractérisée par son aspect progressif et insidieux. Le diagnostic intervient généralement lorsque le patient ou sa famille observent des troubles cognitifs déjà bien installés, en particulier, des troubles de la mémoire. Nous allons à présent nous intéresser plus particulièrement à ces déficits neuropsychologiques et, après avoir présenté un tableau général de l'ensemble des troubles cognitifs évoqués dans la littérature, nous nous focaliserons sur les déficits du fonctionnement exécutif qui peuvent intervenir dans les stades précoces de la maladie d'Alzheimer.

Le stade précoce de démence peut être défini selon plusieurs critères. Le plus connu est le *CDR*, *Clinical Dementia Rating* qui divise les stades de démence sur un score allant de 0 (pas de déficits cognitifs) à 3 (démence sévère). Un score de 0.5 à 1 indique une démence en stade précoce et correspond à un score de *MMSE* de 24 à 30. Les limites entre le stade précoce de démence et le *Mild Cognitive Impairment (MCI)* sont relativement floues. Cependant, selon Laurent et Thomas-Anterion le concept de *MCI* peut se définir comme un syndrome comportant une plainte de mémoire de préférence confirmée par l'accompagnant, avec déficit neuropsychologique sur un test de mémoire dépassant 1.5 écart-type par rapport à une population de même âge et de même niveau d'éducation et avec une conservation des autres fonctions intellectuelles ($MMSE \geq 26$), et de l'autonomie dans la vie quotidienne. Ce stade correspond selon les auteurs à un niveau de *CDR* de 0.5. De plus, il semblerait que 70 à 80% des patients présentant un *MCI* évoluent vers une Maladie d'Alzheimer. Le *MCI* est donc un stade de début de maladie d'Alzheimer bien au delà du vieillissement normal, qui peut comporter les mêmes lésions mais à un moindre degré. Ce positionnement théorique concernant le stade prédéméntiel est important pour mieux comprendre comment se définit le stade de maladie d'Alzheimer débutante. Dans notre travail de thèse, nous nous focaliserons uniquement sur la maladie d'Alzheimer en stade débutant et nous n'inclurons pas de patients *MCI* ou à risque de développer une démence.

1.2. Neuropsychologie de la maladie d'Alzheimer

La maladie d'Alzheimer, nous l'avons vu plus haut, se caractérise d'un point de vue clinique par un tableau hétérogène .

Touchon *et al.* (1997) décrivent trois stades cliniques. La phase de **début**, qui est marquée par les troubles de mémoire, se caractérise par des difficultés à se souvenir des faits récents et par la difficulté à retenir de nouvelles informations. Ces troubles ne touchent pas la mémoire procédurale qui est conservée intacte jusque dans les stades avancés de la maladie . On observe également dans cette phase de début des troubles du langage caractérisés par un manque du mot, mais le plus souvent le langage écrit est atteint avant le langage oral. La seconde phase décrite par Touchon *et al.* concerne la phase d'**état**, phase où le syndrome démentiel est assez clairement établi. L'atteinte cognitive est aggravée, et touche d'autres fonctions cognitives. Le patient commence à perdre son autonomie, les troubles mnésiques sont aggravés et le patient présente des troubles importants de l'orientation spatiale. Il en est de même avec les troubles du langage : ils sont aggravés, le discours est devenu peu informatif, voire incohérent. Cette phase d'état va évoluer progressivement et parfois rapidement vers la phase **terminale** où le patient a perdu tous ses repères mnésiques et toute autonomie. Le comportement est très perturbé, la communication impossible. Le décès survient en général une quinzaine d'années après les premiers symptômes.

Ce tableau clinique peut cependant être complété par des descriptions des altérations des fonctions cognitives, non pas en décomposant les stades, mais plutôt en décomposant les fonctions atteintes. Les paragraphes suivants décrivent d'une part les troubles cognitifs classiques décrits dans le tableau neuropsychologique de la maladie d'Alzheimer et, d'autre part, le déficit spécifique des fonctions exécutives.

1.2.1. Déficits cognitifs

Depuis une dizaine d'années, de nombreuses recherches en psychologie et en neuropsychologie ont eu pour objet d'étude la réalisation d'un profil cognitif de la maladie d'Alzheimer . En général les troubles cognitifs sont décomposés en troubles de la mémoire à long terme, à court terme ou de la mémoire de travail , que nous préférons relier aux déficits du contrôle exécutif et en troubles de l'efficacité intellectuelle, des capacités visuo-spatiales, des fonctions instrumentales, c'est-à-dire du langage, des gnosies et des praxies.

Déficits de mémoire

Dans une revue de littérature récente, Sellal (2002) indique que les troubles de la mémoire sont, de loin, les plus fréquents et les mieux décrits dans la littérature. Quelle que soit la manière dont débutent et évoluent les symptômes de la maladie d'Alzheimer, le trouble de mémoire intervient à un moment ou à un autre.

D'un point de vue neuropsychologique, il existe aujourd'hui un grand nombre d'épreuves permettant de mesurer les performances de mémoire des patients. Les tests

psychométriques de mesure de mémoire, comme l'échelle clinique d'évaluation de la mémoire de Wechsler ont longtemps été utilisés en raison des normes disponibles. Cependant, plusieurs recherches indiquent que ce type d'échelle ne fournit en réalité qu'un niveau d'efficacité mnésique général, mais ne donne pas d'indication quant aux formes cliniques et aux mécanismes mnésiques spécifiquement altérés. C'est la raison pour laquelle d'autres tests d'évaluation plus fins ont été mis au point, comme le test de Grober et Buschke, le RI-48 ou encore le DMS 48 .

Tous les systèmes de mémoire peuvent être dégradés dans la maladie d'Alzheimer, mais c'est en général la mémoire épisodique récente qui se dégrade en premier . En effet, les lésions hippocampiques observées dans la maladie d'Alzheimer entraînent généralement des troubles mnésiques dits « authentiques », c'est-à-dire que les performances sont mauvaises à la fois en rappel libre et en rappel indicé, indiquant un déficit lors de l'encodage des informations . La mémoire implicite, nécessitant un rappel non conscient des informations, est en général préservée dans les premiers stades de la maladie d'Alzheimer. Eustache et Desgranges, dans une synthèse sur les troubles mnésiques observés dans la maladie d'Alzheimer, indiquent que la mémoire épisodique est la plus constamment affectée, à la fois en rappel libre, en rappel indicé mais aussi en reconnaissance . En ce qui concerne la mémoire à court terme, évaluée au moyen d'empans de chiffres, de lettres, ou encore de mots, on observe en général des déficits modérés et si on utilise comme mesure l'indice d'effet de récence, on n'observe que très peu de déficits de la mémoire à court terme dans la maladie d'Alzheimer. Enfin, Eustache et Desgranges indiquent que la mémoire procédurale et l'acquisition d'habiletés perceptivo-motrices est préservée jusque dans les stades avancés de la maladie.

Déficits de langage

La plupart des auteurs qui ont étudié les altérations du langage dans la maladie d'Alzheimer s'accordent à dire que ce déficit est présent dès le stade débutant de la maladie. Bayles *et al.* indiquent notamment que la prévalence de l'aphasie augmente avec la sévérité de la démence. Ils indiquent également que plus la démence intervient tôt, plus le langage se dégrade rapidement. En effet, ils ont réalisé une étude longitudinale sur trois ans et ont évalué régulièrement les capacités langagières de 94 patients avec maladie d'Alzheimer et 53 témoins appariés. Les résultats révèlent que le déclin des capacités cognitives et plus particulièrement des capacités langagières est inexorable dans la maladie d'Alzheimer et que la détérioration du langage est fortement associée aux pertes cognitives et à la sévérité de la démence. Ils mettent également à l'épreuve trois modèles de progression de la maladie d'Alzheimer (modèle linéaire, modèle à proportion fixe et modèle exponentiel avec accélération du déclin), mais aucun de ces trois modèles ne ressort clairement pour expliquer les déficits observés sur trois ans. Une étude plus récente s'est également intéressée aux effets du manque du mot chez des patients avec maladie d'Alzheimer débutante . Les résultats indiquent que les patients présentent des déficits de manque du mot fréquents dès les stades précoces de la maladie. Cependant ils relient ce déficit à des troubles de la mémoire sémantique et plus particulièrement, à des troubles post-sémantiques. En effet, les patients ont présenté au cours de l'étude de fréquents phénomènes de « mot-sur-le-bout-de-la-langue » indiquant que les informations

sont présentes en mémoire, mais qu'il y a une difficulté d'accès au lexique mental.

Ces deux études indiquent que les troubles du langage, généralement présents dans le tableau clinique de la maladie d'Alzheimer, sont souvent reliés à d'autres troubles cognitifs, comme les troubles mnésiques, ce qui pourrait par ailleurs expliquer les difficultés des patients, ou les troubles d'accès à la mémoire qui peut se révéler en réalité relié au fonctionnement cognitif de plus haut niveau et être en lien avec les stratégies de recherches en mémoire, plus communément reliées aux fonctions frontales.

Déficits visuo-spatiaux

Dans les formes typiques de la maladie d'Alzheimer, on observe un large éventail de troubles visuo-spatiaux, ainsi qu'une hétérogénéité des déficits tels de simples troubles de perception visuelle et spatiale, des troubles visuo-constructifs et des troubles du raisonnement visuo-spatial. Des auteurs rapportent également que la sensation de désorientation spatiale est fréquente dans la maladie d'Alzheimer.

Une équipe canadienne (Rainville et collaborateurs) a réalisé un certain nombre d'études sur les capacités d'orientation spatiale de patients présentant la maladie d'Alzheimer. Parmi celles-ci, certaines ont été réalisées en situation réelle de déplacement avec demande de recherche d'informations spatiales. Les résultats indiquent que les patients ont des difficultés à réaliser la tâche et à atteindre le point d'arrivée (aucun patient n'y parvient sans aide extérieure). Par ailleurs, le retour au point de départ est considéré comme un nouveau trajet par les patients qui éprouvent les mêmes difficultés qu'à l'aller, indiquant qu'ils n'ont pas enregistré et traité correctement les informations spatiales. D'autres études ont été réalisées en situation de laboratoire, à l'aide d'un labyrinthe à taille humaine. Par exemple, Passini *et al.* ont réalisé une étude de cas multiples sur les déficits d'orientation spatiale de patients en stade débutant de maladie d'Alzheimer. Ils montrent que les patients ont une incapacité plus ou moins marquée à s'orienter dans l'espace, en particulier dans les milieux inconnus. Leur étude a consisté à faire réaliser différentes tâches d'orientation spatiale aux participants, dans un labyrinthe à taille humaine. Les résultats indiquent que la plupart des patients présentent un profil de performance nettement distinct de celui des témoins. Cependant les patients conservent des capacités résiduelles d'orientation spatiale qui peuvent être liées à une préservation de la mémoire procédurale. De plus, ils présentent des difficultés de construction de représentations de l'espace, indiquant des déficits de « la carte cognitive ». Cependant, les auteurs ajoutent que leurs résultats sont à interpréter en tenant compte des éventuels troubles des fonctions exécutives qui pourraient interférer avec les performances observées. D'ailleurs, dans une étude récente, Fisk et Sharp ont démontré l'implication des fonctions exécutives dans les tests évaluant les performances en orientation spatiale. Rainville et Passini indiquent également que les fonctions exécutives interviennent à différents niveaux de l'orientation spatiale, particulièrement dans les décisions sur les trajets. Pour un trajet familier, le rôle de la résolution de problème est minime, puisque les décisions à prendre sont relativement bien automatisées, ce qui explique d'ailleurs la préservation de l'orientation spatiale sur trajets familiers des patients présentant la maladie d'Alzheimer, alors qu'en trajet non familier, le processus de prise de décision joue un rôle beaucoup plus important.

En résumé, les troubles de l'orientation visuo-spatiale sont des troubles très fréquents dans le tableau neuropsychologique de la maladie d'Alzheimer mais ils doivent être pris en compte dans le cadre d'une dégradation générale du fonctionnement cognitif et notamment du fonctionnement exécutif. Il est tout de même important de prendre en compte ces difficultés d'orientation spatiale éprouvées par les patients car elles jouent un rôle important dans l'activité de conduite, tout du moins au niveau hiérarchique et tactique lors des choix de trajets par les conducteurs.

Conscience des déficits

L'anosognosie est également un déficit qu'il est important de présenter dans le cadre de la maladie d'Alzheimer car il représente le fait que les patients, dès le stade précoce de la maladie, sont incapables de reconnaître qu'ils présentent des troubles cognitifs. La meilleure façon d'observer le déficit d'anosognosie dans la maladie d'Alzheimer est de mesurer les corrélations entre les performances effectives des patients à diverses tâches cognitives et les performances rapportées par les patients eux-mêmes ou par leur entourage. Les résultats de l'étude de Kotler-Cope et Camp indiquent que les patients en stade débutant de maladie d'Alzheimer présentent une anosognosie importante en ce qui concerne leurs troubles cognitifs mais qu'ils sont relativement bien conscients de leurs troubles émotionnels (dépression, agitation) ou comportementaux (besoin de routine, désorientation). Des résultats semblables ont été obtenus concernant le déficit de mémoire chez des patients avec maladie d'Alzheimer et des patients *MCI*, indiquant que ces deux groupes de patients présentent des déficits de conscience de leurs déficits. Les auteurs expliquent ce résultat par le fait que la dégradation des processus cognitifs est lente et graduelle et que les patients s'y habituent progressivement.

Il nous semblait important de faire un point sur l'anosognosie dans la maladie d'Alzheimer car ce déficit peut avoir des conséquences importantes dans le cadre de la conduite automobile. En effet, les patients qui présentent un début de maladie d'Alzheimer et qui ne sont pas conscients de leurs déficits, ne vont pas changer leurs habitudes de conduite comme le feraient des conducteurs âgés sans troubles neurologiques mais sentant une baisse de leurs capacités générales. Cependant, les patients avec maladie d'Alzheimer sont des conducteurs âgés avant tout. Ils ont donc peut-être déjà réalisé des processus de compensation et d'adaptation comme la plupart des conducteurs âgés. Ce qui change avec la maladie d'Alzheimer, c'est que les patients n'ont pas conscience de leurs déficits et qu'ils ne se rendent pas compte qu'ils ne sont pas capables de passer d'un mode de fonctionnement automatique à un mode contrôlé de conduite. Nous reviendrons sur ce point dans la section sur la conduite automobile dans la maladie d'Alzheimer.

En définitive, les troubles cognitifs observés dans la maladie d'Alzheimer sont variés et touchent essentiellement des fonctions cognitives de haut niveau, comme la mémoire, l'orientation spatiale, ou encore l'attention. La plupart des recherches publiées sur l'évaluation précise de ces déficits cognitifs concluent généralement en précisant que des fonctions de contrôle pourraient également expliquer une part des déficits observés. Nous allons maintenant nous focaliser sur ces fonctions de contrôle exécutif et présenter les recherches les plus marquantes publiées dans le cadre de la maladie d'Alzheimer.

1.2.2. Déficits exécutifs

Nous avons défini, dans le premier chapitre de cette partie, le système exécutif comme le système de gestion et de contrôle des activités cognitives. Nous avons également vu, dans le second chapitre, que ce système présente des altérations modérées dans le vieillissement normal, bien que ceci fasse encore débat dans la littérature. Dans les atteintes cérébrales, il a été montré à de nombreuses reprises que les fonctions exécutives étaient très souvent atteintes .

Lorsque l'on présente le tableau clinique de la maladie d'Alzheimer, l'accent est fréquemment mis sur les troubles de la mémoire qui, bien souvent, ont mené au diagnostic et sur les troubles de la pensée et du raisonnement, mais les autres déficits cognitifs, tels que les déficits exécutifs, sont souvent considérés comme des troubles secondaires . Par exemple, selon les critères du DSM-IV , les patients atteints de maladie d'Alzheimer ne présentent pas d'atteinte des fonctions attentionnelles et exécutives. Cependant, comme nous venons de le préciser en conclusion de la partie précédente, les déficits exécutifs sont à prendre en considération car ils peuvent permettre d'expliquer les dégradations d'autres troubles cognitifs , tels que les déficits de langage ou les troubles visuo-spatiaux .

Perry et Hodges ont réalisé une revue de littérature sur les déficits exécutifs et attentionnels que l'on peut observer dans la maladie d'Alzheimer. Ils relèvent ainsi que des études montrent des déficits attentionnels précoces dans la maladie d'Alzheimer et qu'à l'aide d'une batterie de tests neuropsychologiques, d'une batterie informatisée et d'imagerie fonctionnelle (IRMf et TEP), il a été montré que des sujets sans plainte mnésique mais présentant des déficits dans l'exécution de tâches de la vie quotidienne, étaient en réalité atteints de démence de type Alzheimer et l'ignoraient. Il existe cependant aujourd'hui un débat concernant la chronologie de l'apparition des déficits exécutifs par rapport aux autres déficits cognitifs. Broks *et al.* indiquent que l'atteinte du fonctionnement exécutif n'intervient que si les activités utilisées pour les mesurer font intervenir les capacités de perception visuelle et le langage. Ils considèrent que la maladie d'Alzheimer entraîne des lésions précoces au niveau des connexions entre l'hippocampe et le lobe frontal et que c'est ce qui explique les déficits aux tâches exécutives qui comprennent un matériel verbal ou une consigne à mémoriser. Cependant, d'autres études plus récentes font état d'atteintes précoces du fonctionnement exécutif général et ces atteintes exécutives ne peuvent pas être reliées aux autres atteintes mnésiques ou attentionnelles .

Le débat sur l'existence de déficits exécutifs du stade précoce de maladie d'Alzheimer a été expliqué par certains auteurs comme résultant du fait qu'il existait une variante exécutive de la maladie d'Alzheimer et que des patients avec maladie d'Alzheimer typique pouvaient très bien avoir des fonctions exécutives préservées jusque dans des stades avancés, alors que d'autres patients peuvent présenter des déficits du fonctionnement exécutif dès les premiers stades de développement de la maladie d'Alzheimer. C'est par exemple ce qu'ont montré Binetti *et al.* (1993 ; 1996). Back-Madruga *et al.* ont réalisé une étude où ils différencient les patients avec maladie d'Alzheimer sur la base de leurs performances exécutives (étaient considérés comme

« patients dysexécutifs » les patients qui obtenaient une performance éloignée de 1.5 écart-type de la norme à au moins trois tests exécutifs sur les quatre proposés (*TMT*, Fluence verbale, test de *Stroop*, test des similarités de la *WAIS-R*). Ils comparent les deux groupes de patients sur d'autres épreuves cognitives. Ils montrent que les patients avec déficits exécutifs ne se différencient pas significativement des patients sans déficits exécutifs sur les tests non-exécutifs, tels que le *Boston Naming test*, les parties A du *TMT* et du test de *Stroop*, plusieurs sous-tests de la *WAIS-R* (empan de chiffres, codes, vocabulaire). Les déficits exécutifs sont donc une composante indépendante du tableau clinique de la maladie d'Alzheimer et selon ces auteurs, ils ne peuvent pas être reliés aux autres déficits cognitifs .

Evaluations du dysfonctionnement exécutif

Comme le soulignent Thomas-Antérion et Laurent dans une revue de littérature sur les marqueurs neuropsychologiques d'aide au diagnostic de la maladie d'Alzheimer, les troubles exécutifs sont hétérogènes et il n'existe pas, à l'heure actuelle, de recommandations quant au choix des épreuves à réaliser.

Des efforts ont cependant été réalisés pour développer des outils cliniques standardisables permettant d'évaluer les troubles dysexécutifs dans la maladie d'Alzheimer. Le Groupe de Réflexion sur l'Évaluation des Fonctions Exécutives (Grefex) a développé une batterie qui combine une évaluation cognitive des troubles exécutifs et une évaluation comportementale. Les objectifs du Grefex sont de proposer une évaluation standardisée des syndromes dysexécutifs, d'examiner la pertinence des différentes perturbations pour le diagnostic de syndrome dysexécutif et de documenter les profils d'associations de déficits-perturbations prédisant le handicap cognitif .

L'évaluation cognitive se décompose en sept tests dont certains sont très classiquement utilisés dans les évaluations cognitives. Ils sont, en principe, toujours administrés dans le même ordre : test de Stroop , test modifié des six éléments , *Trail-Making Test* , test de Brixton , double tâche de Baddeley , test des fluences verbales et le *Modified Card Sorting Test* . Parallèlement à cette évaluation cognitive des déficits exécutifs, plusieurs questionnaires sont également proposés pour permettre une évaluation des troubles dysexécutifs du domaine comportemental. Ces questionnaires sont : le *Patient Competency Rating Scale* , qui est un questionnaire évaluant le handicap d'origine cognitive et l'anosognosie et il se décline en deux versions, l'une à remplir par le patient, et l'autre par le proche ; le *Reintegration to Normal Living Index* qui est une échelle de handicap et de qualité de vie ; l'Inventaire du Syndrome Dysexécutif Comportemental , qui est un questionnaire développé spécifiquement par le Grefex pour évaluer les troubles comportementaux et l'échelle de Rankin modifiée, qui mesure le degré d'autonomie du patient . Cette batterie est en cours d'étude et un protocole multicentrique a été mis en place afin de proposer des normes et des standards et d'homogénéiser les tests utilisés dans la pratique clinique. Dans le cadre de notre travail de recherche, nous avons choisi d'utiliser cette batterie d'évaluation des fonctions exécutives ² afin d'évaluer le dysfonctionnement exécutif global des patients (ainsi que des témoins âgés). Nous

² Avec l'aimable autorisation du Pr Godefroy.

l'avons complétée avec des tests spécifiques qui tiennent compte du choix théorique du modèle de Miyake *et al.* (2000).

Par ailleurs, Baudic *et al.* insistent sur le fait que les déficits exécutifs étant très hétérogènes dans la maladie d'Alzheimer, il est important de bien spécifier quelle fonction exécutive on cherche à évaluer et qu'il faut éviter les tâches trop complexes et trop globales (*TdL*, *WCST*...) qui donnent des résultats bien souvent hétérogènes. Dans la suite de cet exposé, nous allons donc nous attacher à présenter les données issues de la littérature indiquant des troubles spécifiques de l'une des trois composantes exécutives de flexibilité, de mise à jour et d'inhibition.

Flexibilité mentale

Comme cela a été précisé pour les études sur le vieillissement normal, la flexibilité mentale n'est que rarement étudiée explicitement et exclusivement. En général, les études qui s'intéressent au fonctionnement exécutif proposent une mesure de la flexibilité (*TMT*, Erreurs persévératives au *WCST*, *PMT*, *LGT*...). La plupart des études sur le fonctionnement exécutif qui utilisent comme évaluation le *WCST* rapportent des erreurs persévératives plus importantes chez les patients avec maladie d'Alzheimer par rapport à des participants âgés contrôles. Siri *et al.* (2001) ont ainsi comparés 14 patients avec maladie d'Alzheimer à 14 patients avec démence frontotemporale sur une batterie de tests neuropsychologiques, incluant des mesures des fonctions exécutives (*WCST*, matrices de Raven fluences). Les résultats indiquent que les patients avec maladie d'Alzheimer avaient des déficits presque aussi prononcés dans les tâches incluant le fonctionnement frontal que les patients avec démence frontotemporale, et en particulier sur le nombre d'erreurs persévératives aux *WCST* indiquant un déficit de flexibilité. Cependant, les patients inclus dans cette étude présentent un niveau moyen de *MMSE* égal à 17.8, suggérant que ces patients ne sont plus vraiment en stade de démence débutante. Souchay *et al.* (2002) ont comparé les performances de patients en stade précoce de démence (*MMSE* = 24.6) à celles de participants âgés sains sur des tests de mémoire épisodique, de méta-mémoire (*Feeling of knowing*, *FOK*) ainsi que sur des tests exécutifs (*WCST*, *Stroop*, Fluences verbales). Leurs résultats indiquent que les déficits des patients avec maladie d'Alzheimer dans l'épreuve de *FOK* pouvaient s'expliquer par leurs déficits au niveau du fonctionnement exécutif et en particulier dans la capacité à changer de règle dans le test du *WCST*, indiquant des déficits de flexibilité mentale. Par ailleurs, Rasmusson *et al.* ont réalisé une étude sur plus de 750 participants âgés dont une cinquantaine de patients avec maladie d'Alzheimer, en stade débutant. Les résultats indiquent que les performances des patients étaient significativement dégradées pour les parties A et B du *TMT*. De plus, ils ont observé sur un suivi longitudinal que les patients avaient un ralentissement à la partie B au cours du temps (2 ans) mais pas à la partie A ainsi qu'une augmentation du nombre d'erreurs à la partie B.

Par ailleurs, dans une revue de littérature sur les déficits exécutifs dans la maladie d'Alzheimer, Bherer *et al.* ont observé que très peu d'études avaient pour objectif l'évaluation directe de la flexibilité mentale. Ils rapportent cependant que les déficits de flexibilité sont fréquents dans la maladie d'Alzheimer dès les stades précoces. Belleville *et al.* ont ainsi montré que des patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer et des

patients *MCI* présentaient des déficits importants dans la capacité à alterner entre deux tâches cognitives informatisées simples. L'utilisation de stimuli hiérarchisés permet également une évaluation (bien qu'elle ne soit pas pure) des processus de flexibilité mentale. Dans ce type de tâche, les patients avec maladie d'Alzheimer présentent des temps de réaction plus longs que des témoins appariés en âge et réalisent significativement plus d'erreurs lorsque la condition d'alternance entre le traitement local et global est demandée .

En résumé, les déficits de flexibilité mentale semblent faire partie intégrante du tableau clinique de la maladie d'Alzheimer, même à partir des stades débutants. Cependant, une évaluation précise de ces déficits spécifiques serait nécessaire car les tâches généralement utilisées sont des tâches complexes impliquant d'autres processus cognitifs, eux-mêmes altérés dans la maladie d'Alzheimer. Nous proposons par exemple que le test du plus-minus peut être une évaluation rapide et n'impliquant pas de processus cognitifs complexes .

Mise à jour des informations en mémoire de travail

L'étude des déficits spécifiques de mise à jour des informations en mémoire de travail dans la maladie d'Alzheimer est encore moins documentée que celle concernant la flexibilité mentale. En effet, à notre connaissance, seules quelques études récentes ont réalisé une évaluation neuropsychologique précise de cette composante dans la maladie d'Alzheimer. L'une d'entre elles a comparé les performances de patients avec maladie d'Alzheimer à celles de patients avec lésions frontales et de contrôles appariés sur une tâche de mise à jour, combinée à une tâche d'inhibition d'informations non pertinentes . Les résultats indiquent que les patients frontaux présentent surtout des déficits dans l'inhibition de l'information interférente alors que les patients avec maladie d'Alzheimer présentaient en majorité des déficits de maintien et de mise à jour des informations en mémoire de travail. Cependant, dans cette étude, la tâche de mise à jour choisie comportait une forte composante d'inhibition qui a pu interférer avec les performances des patients.

Sebastian *et al.* ont également montré des déficits de la mise à jour des informations, mais à l'aide d'un test de double tâche et d'une tâche de type *Brown-Peterson*. Une fois encore, les tâches neuropsychologiques choisies peuvent être contestables pour l'évaluation de mise à jour ou en tout cas, elles font intervenir d'autres mécanismes qui ont déjà été montrés comme spécifiquement atteints dans la maladie d'Alzheimer, comme l'attention divisée.

Kensinger *et al.* ont étudié l'efficacité de la mémoire de travail ³ chez des patients avec maladie d'Alzheimer en stade débutant et des patients avec maladie de Parkinson (sans démence). L'une des tâches utilisées étaient le test de n-back qui permet une bonne évaluation de la mise à jour . Leurs résultats indiquent que les patients avec maladie de Parkinson ont des performances significativement dégradées par rapport aux contrôles mais que ce n'est pas le cas des patients avec maladie d'Alzheimer. Cependant,

³ Le but de l'étude de Kensinger *et al.* (2003) n'était pas d'évaluer la composante de mise à jour. Ils utilisent la n-back comme mesure de la capacité de mémoire de travail.

dans cette étude la variable mesurée était uniquement le pourcentage de bonnes réponses, les temps de réponse n'étant pas enregistrés. Cette étude indique qu'il est également important de bien choisir les variables de mesure qui mettent en évidence des déficits modérés dans les composantes, telles celles qui mesurent un ralentissement ou une augmentation du nombre d'intrusions (fausses alarmes).

Inhibition

Contrairement à la flexibilité et à la mise à jour, la composante d'inhibition a fait l'objet d'un nombre plus important de recherches dans la maladie d'Alzheimer. Comme nous l'avons indiqué plus haut, l'inhibition a longtemps été considérée comme une composante fondamentale de l'attention sélective mais aujourd'hui elle est plutôt reliée aux concepts de fonctionnement et de contrôle exécutifs . Différents paradigmes sont très souvent utilisés pour mettre en avant les déficits d'inhibition : le paradigme d'amorçage négatif, les tâches de type Go/No Go ou encore le paradigme de type Stroop.

Sullivan *et al.* ont ainsi montré que l'effet d'amorçage négatif était significativement différent entre des patients avec maladie d'Alzheimer et des contrôles âgés indiquant des déficits spécifiques de l'inhibition dans la maladie d'Alzheimer. Concernant le test de Stroop, de nombreuses études rapportent des difficultés chez les patients avec maladie d'Alzheimer pour inhiber le comportement automatique de lecture du mot en situation interférente et ce, dès les stades très légers de démence. Ainsi, Amieva *et al.* ont-ils utilisé une version du test de Stroop adaptée, qui comportait quatre conditions : une condition de **lecture**, où des noms de couleur étaient présentés en noir sur un carton, une condition de **dénomination de couleur**, où le carton comportait des rectangles de couleurs à dénommer, une **condition interférente** classique, où des noms de couleurs étaient imprimés dans une couleur différente, dans laquelle le participant devait dénommer la couleur d'impression sans lire le mot et enfin une **condition de Stroop inversé**, où il y avait également des noms de couleurs imprimés dans une couleur différente, mais cette fois le participant devait lire le mot sans donner la couleur d'impression. Les résultats indiquent que la condition interférente classique est altérée chez les patients avec maladie d'Alzheimer comparativement aux participants âgés témoins. Selon les auteurs, les patients présentent de grandes difficultés à utiliser des stratégies d'inhibition qui leur permettraient de contrôler la production de réponses automatiques. D'autre part, les auteurs ont comparé les performances de deux sous-groupes de patients, certains ayant commencé par la condition interférente classique, d'autres ayant commencé par la condition de Stroop inversé. Les résultats montrent que les patients qui ont réalisé la condition de Stroop classique après le Stroop inversé ont des performances moins bonnes que les patients ayant commencé par le Stroop classique. Ces résultats suggèrent que dans la maladie d'Alzheimer, l'inhibition de règles préalablement pertinentes est également altérée car on ne retrouve pas ce pattern de résultats dans les deux sous-groupes de contrôles âgés.

Par ailleurs, dans une revue de littérature, Amieva *et al.* suggèrent que les recherches sur les effets de la maladie d'Alzheimer sur l'inhibition montrent qu'un nombre important de mécanismes sous tendent les processus d'inhibition. L'inhibition ne peut pas être considérée comme une fonction unitaire homogène. En effet, la maladie d'Alzheimer

affecte les processus inhibiteurs intervenant dans des modalités particulières : verbales, visuelle, traitement moteur..., et le type d'inhibition engagée peut également être différemment affecté : automatique ou contrôlée. Amieva *et al.* suggèrent que la maladie d'Alzheimer semble avoir un effet important sur les tâches qui requièrent des processus d'inhibition contrôlée, mais peu d'effets sur les tâches d'inhibition automatique. En outre, la même équipe de recherche a réalisé une étude dans le but d'évaluer si tous les processus inhibiteurs, c'est-à-dire les processus d'inhibition contrôlée et les processus d'inhibition automatique, étaient altérés de la même façon dans la maladie d'Alzheimer. Pour cela ils comparent les performances de 28 patients en stade débutant de maladie d'Alzheimer à celles de 28 contrôles âgés, appariés en âge, sexe et niveau d'étude, aux tests de *Stroop*, de *Go/No-Go*, de *Stop-Signal* et avec une tâche d'amorçage négatif, tous ces tests ayant été implémentés dans une batterie informatisée. Les résultats indiquent que les patients avec maladie d'Alzheimer ne sont pas atteints de manière uniforme sur les différentes tâches d'inhibition réalisées. Ils montrent tout d'abord une absence d'effet d'amorçage négatif, indiquant qu'ils n'ont pas inhibé correctement l'information non pertinente au cours des essais *Prime*. Ils ont donc des performances globalement moins bonnes que les témoins âgés mais pas spécifiquement en terme d'amorçage négatif. De plus, lors de la deuxième session d'items (le test d'amorçage négatif était divisé en deux parties), les contrôles âgés ont montré un effet encore plus fort d'amorçage négatif. Les auteurs interprètent ce résultat comme une forme d'apprentissage de la nécessité d'inhiber les informations pour être plus efficaces dans la sélection à l'item suivant. Les patients ont également des performances significativement dégradées au test de *Stroop* informatisé (temps de réponse plus longs et plus grand nombre d'erreurs), indiquant que les patients présentent des déficits d'inhibition contrôlée d'une action. Inversement, dans cette étude, les patients n'ont pas obtenu de performances particulièrement dégradées au *Stop-Signal* et au *Go/No-Go*, indiquant que l'inhibition motrice n'est pas altérée dans les stades précoces de la maladie d'Alzheimer.

En résumé, la composante d'inhibition ne peut pas être considérée comme une composante simple et unitaire, comme nous l'avons déjà évoqué en ce qui concerne le vieillissement cognitif normal. Comme la majorité des études vont dans le sens d'une atteinte précoce de l'inhibition contrôlée, mais moins de l'inhibition automatique, nous focaliserons notre travail sur cette notion d'inhibition contrôlée car, dans le cadre de la conduite automobile, il semblerait que ce soit surtout des processus d'inhibition contrôlée qui sont mis en jeu, notamment dans l'inhibition volontaire du traitement d'informations non pertinentes dans l'environnement routier.

Synthèse

En définitive, la maladie d'Alzheimer est une démence dégénérative qui a fait l'objet de nombreuses recherches dans les domaines de la psychologie et de la neuropsychologie. En étudiant cette démence, les chercheurs tentent de mieux comprendre les mécanismes de détérioration cognitive dus à la pathologie et les mécanismes sous-jacents au fonctionnement cognitif normal. On sait aujourd'hui que cette pathologie ne peut pas être considérée comme un continuum du vieillissement normal et que ce n'est pas une accélération des effets de ce vieillissement.

Les déficits cognitifs (outre les atteintes de la mémoire épisodique) sont multiples et précoces et ils ont été reliés aux atteintes du fonctionnement exécutif par de nombreux auteurs. Dans le cadre de l'approche de Miyake *et al.*, nous avons pu observer que les trois composantes, de flexibilité, de mise à jour et d'inhibition, étaient atteintes dès le début de la maladie. Cependant peu d'études se sont jusqu'à présent intéressées spécifiquement à ces trois composantes. De plus les tâches généralement proposées sont complexes et font intervenir des processus cognitifs trop variés. Il est donc intéressant de s'intéresser spécifiquement aux altérations de ces trois composantes.

Par ailleurs, la maladie d'Alzheimer intervient généralement autour de 65 à 70 ans, c'est-à-dire à un âge où le patient a encore conservé de bonnes dispositions physiques et une santé bien préservée. C'est, en général, à l'âge de la retraite que peuvent survenir les premiers signes. Ceci indique que la maladie touche des personnes qui sont encore en forte demande d'autonomie dans la vie sociale et en particulier en ce qui concerne les déplacements. La conduite automobile représente à ce titre une activité qu'il est nécessaire de mieux comprendre. Bien que les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer soient déjà des conducteurs âgés et qui ont donc peut-être déjà mis en place des mécanismes d'adaptation, nous allons voir dans la dernière partie de ce chapitre que cette activité peut leur poser des problèmes.

Enfin, l'étude des effets de la maladie d'Alzheimer sur la conduite automobile nous permettra également de mieux comprendre quels sont les mécanismes cognitifs et, en particulier les mécanismes du fonctionnement exécutif, qui interviennent dans cette activité.

2. Conduire avec la Maladie d'Alzheimer

La conduite automobile, nous l'avons évoqué à plusieurs reprises, est une activité complexe, mais qui s'avère un élément social indispensable à la plupart des personnes, même vieillissantes. Dans le cas de la maladie d'Alzheimer, c'est le premier degré d'autonomie des patients et à partir du moment où le patient ne se sent plus capable de conduire c'est que la maladie est déjà à un stade relativement avancé. Dans les stades précoces, les patients ne ressentent généralement aucune difficulté à se mettre au volant, ils en éprouvent même du plaisir. Cependant, même si la conduite automobile permet de maintenir l'indépendance et l'autonomie des patients et même si elle relève principalement de la mémoire procédurale, moins atteinte dans la maladie d'Alzheimer, l'intervention de processus contrôlés de haut niveau est indispensable pour une conduite sécuritaire. Nous allons voir au cours de ce chapitre que la conduite peut devenir rapidement dangereuse chez les patients, du fait justement de cette incapacité à faire intervenir les processus de contrôle.

Une étude datant d'une dizaine d'années a considérablement marqué la communauté scientifique s'intéressant au problème de la conduite automobile dans le vieillissement normal et pathologique et a engendré par la suite de plus en plus d'études sur les capacités de conduite des patients avec pathologies neurologiques dégénératives. En effet, Johansson *et al.* ont recherché la présence de l'allèle $\epsilon 4$ de l'apolipoprotéine E ⁴

chez des conducteurs âgés décédés dans un accident de voiture. Ils ont examiné par autopsie le cerveau de 98 conducteurs âgés de 65 ans et plus, décédés dans un accident de la circulation en Suède. Parmi ces conducteurs, les auteurs affirment que le diagnostic de maladie d'Alzheimer était possible pour 20% d'entre eux et certain pour 33%. Ils concluent que 47 à 53% des conducteurs âgés décédés dans des accidents de la circulation étaient en réalité en stade débutant de la maladie d'Alzheimer et l'ignoraient pour la plupart. Ce type de données n'est pas disponible pour la population française, mais une équipe australienne a récemment répliqué ces résultats et indique que parmi un échantillon de 55 conducteurs décédés dans un accident de la route, 52% présentaient des plaques séniles, signe d'une dégradation des capacités cognitives et d'un début de maladie d'Alzheimer.

La section présente a pour objectifs de présenter un état de l'art sur les études menées dans le but d'évaluer les effets de la maladie d'Alzheimer sur l'activité de conduite et de présenter les éventuelles lacunes de ces études dans le cadre de l'approche théorique retenue, c'est-à-dire en tenant compte de l'importance du fonctionnement exécutif pour la conduite automobile et, en particulier, de l'importance des composantes de flexibilité, de mise à jour et d'inhibition.

2.1. Données démographiques et accidentologiques

Dans la présentation de la maladie d'Alzheimer faite dans la section précédente, les données de prévalence et d'incidence n'ont pas été présentées. La prévalence constitue la proportion de personnes atteintes de la maladie dans une population donnée. Selon Dartigues *et al.*, la prévalence des démences (toutes causes confondues, dont la maladie d'Alzheimer) est de 6,4 % en France. Celle de la maladie d'Alzheimer atteint 4,4 %. Cette valeur de prévalence a été standardisée en fonction de l'âge. Si l'on tient compte de l'âge, la prévalence de la maladie d'Alzheimer augmente de 0,6 % après 65 ans et de 22,2 % à partir de 90 ans. Ces données épidémiologiques relativement alarmantes doivent cependant être remises dans notre contexte. En effet, la prévalence s'appuie sur le nombre total de cas présents, c'est à dire ceux déjà présents, plus ceux incidents et dans ceux déjà présents, il y a bien évidemment les stades avancés de démence, pour lesquels les préoccupations d'indépendance et de conduite automobile sont lointaines. Si l'on s'intéresse maintenant à l'incidence de la maladie d'Alzheimer, c'est-à-dire à la proportion de nouveaux cas chaque année, on observe qu'elle passe de 1.2/1000 à 65 ans à 53.5/1000 à 90 ans. A partir de ces calculs d'incidence, Dartigues *et al.* ont estimé que le nombre annuel de nouveaux cas en France atteint 100 000 malades d'Alzheimer. Les auteurs concluent que si aucun progrès n'est réalisé en termes de prévention et de traitement, en 2010 le nombre total de patients atteints de maladie d'Alzheimer pourrait atteindre 550 000 cas. Ces données nous permettent d'appréhender l'ampleur de ce phénomène dans un cadre de santé publique et de protection des usagers de la route. En effet, l'étude de Johannson *et al.* (1997) présentée en introduction a été le précurseur de nombreuses études sur le phénomène d'accidentologie dans la démence et en particulier dans la maladie d'Alzheimer. La même année, Carr publiait une première revue de

⁴ La présence de l'allèle $\epsilon 4$ au niveau du cerveau représente en effet un marqueur de la maladie d'Alzheimer.

littérature sur le sujet et indiquait en conclusion que les études sur le risque d'accident dans la maladie d'Alzheimer sont limitées en termes de conclusions en raison du petit nombre de participants, de l'utilisation de questionnaires d'auto-évaluation des accidents, ainsi que par le manque de sujets contrôles appropriés. Cependant toutes les études recensées par Carr indiquaient une augmentation du nombre d'accidents chez les conducteurs déments, chaque année.

Suite à cette revue de littérature qui pointait les problèmes méthodologiques des études publiées sur la conduite dans la maladie d'Alzheimer, Carr *et al.* ont alors réalisé une étude dont le but était de proposer une mesure standardisée du risque d'accident chez des conducteurs avec maladie d'Alzheimer. Il s'agissait d'une étude longitudinale sur cinq années, avec un enregistrement des données d'accidents et la tenue d'un cahier de bord journalier par les participants. L'échantillon était constitué de 121 personnes, dont 63 patients avec maladie d'Alzheimer, 34 en stade précoce et 29 en stade modéré de démence. Les autres participants étaient des témoins. Les données d'accidents étaient enregistrées à l'aide d'un système de base de données remplie par les assurances où tous les accidents causant des dommages qui s'élèvent à 500 dollars ou plus sont enregistrés. Les résultats indiquent des différences significatives entre patients et contrôles sur le test d'acuité visuelle mais pas de différences sur le nombre d'accidents. De plus, ces résultats restent identiques même lorsqu'on tient compte du kilométrage annuel du conducteur. Pourtant, le test sur route a montré une diminution des capacités de conduite avec une augmentation de la sévérité de la démence. Les auteurs concluent que les études basées sur les données des conducteurs ne suffisent pas à prédire le risque d'accident dans la démence et seule une évaluation sur route pourra permettre de dépister les conducteurs à risque.

D'autres études ont suivi celle-ci, dans lesquelles on a cherché notamment à proposer des grilles d'analyse des erreurs des conducteurs en situation de conduite, ou des évaluations à partir de batteries de tests neuropsychologiques qu'on a cherché à corréler avec les épreuves sur route ou sur simulateur. Cependant les études sur l'augmentation du risque d'accident avec la démence font encore largement débat. Il semblerait que l'utilisation des questionnaires sur les accidents et les auto-questionnaires sur les habitudes de conduite ne soient pas nécessairement fiables pour mesurer le risque d'accident des patients. Ceci serait dû, d'une part, à l'anosognosie des patients et, d'autre part, au biais induit par le fait que les participants acceptant de répondre aux questionnaires sont certainement ceux qui éprouvent le moins de difficultés. Man-Son-Hing *et al.* ont rapporté le même type de résultats à partir d'une revue récente de littérature. Les résultats indiquent que, à partir des 23 études recensées, une seule a été en mesure de montrer que les conducteurs avec maladie d'Alzheimer étaient impliqués plus fréquemment que les conducteurs âgés sains dans des accidents de la circulation. Cependant, les 23 études montraient que les conducteurs avec démence avaient des performances de conduite dégradées sur les mesures réalisées, que ce soit sur simulateur ou sur route réelle.

Withaar *et al.* ont réalisé une revue de littérature sur l'évaluation des capacités à conduire dans le vieillissement pathologique. Ils relèvent qu'il existe quatre points méthodologiques qui posent problème dans la plupart de ces études et que les futures

recherches devront prendre en compte ces problèmes pour permettre une meilleure évaluation des capacités de conduite. Le premier problème concerne le fait de calculer des corrélations rétrospectives entre des performances cognitives **actuelles** et un historique d'accidents **antécédent**. En effet, il est vraisemblable, selon les auteurs, que la performance cognitive **actuelle** ne puisse pas expliquer la performance de conduite **passée** des patients, ce qui explique le faible niveau de corrélation rapportées par la majorité de ces études. Le second problème méthodologique abordé concerne l'utilisation de données subjectives pour l'évaluation des performances de conduite. En effet, la plupart des études utilisent comme critère de performance de conduite les données de l'entourage ou les données d'accident. Cela pose des problèmes dans l'interprétation puisque ces données peuvent être sous-estimées. De plus les accidents ne sont pas toujours enregistrés dans les bases de données. Il faut donc développer de meilleurs outils objectifs d'évaluation de la performance de conduite, comme des tests sur route où les données peuvent être quantifiées et reproduites. Le troisième point méthodologique concerne l'ajustement sur le kilométrage annuel. En effet, parmi les études qui comparent les performances de conduite de patients avec maladie d'Alzheimer à celles de conducteurs sains, peu d'entre elles prennent en compte le kilométrage annuel des conducteurs. Or, il y a une baisse sensible du kilométrage annuel chez les conducteurs présentant des troubles cognitifs. Il faut donc tenir compte de ce changement de comportement qui peut altérer l'interprétation des données sur les relations entre performances cognitives et risque d'accident. Enfin, le dernier problème méthodologique souligné par Withaar *et al.* concerne les tests cognitifs généralement utilisés pour évaluer la sévérité de la démence et la mettre en lien avec les capacités de conduite. Selon les auteurs, le faible niveau de corrélation relevé entre sévérité de la démence et performance de conduite peu en effet s'expliquer par le fait que les tests utilisés, tels que le *MMSE*, sont trop généraux et ne donnent qu'un aperçu très général des perturbations cognitives des patients. Il faut utiliser des mesures plus précises et plus sensibles du fonctionnement cognitif pour pouvoir établir des corrélations entre performances cognitives et performance de conduite.

Ces différentes études et revues de littérature sur le risque d'accident dans la maladie d'Alzheimer nous informent déjà sur l'importance considérable d'un point de vue social, politique mais aussi d'un point de vue psychologique, d'une meilleure compréhension des déficits cognitifs qui peuvent rendre l'activité de conduite déficitaires. La partie suivante est consacrée à la description des études qui ont tenté de prendre en compte les capacités et les déficits cognitifs présents dans la maladie d'Alzheimer, dans les évaluations de la conduite. Bien que notre travail de recherche n'ait pas pour but de proposer une nouvelle méthodologie d'évaluation des compétences de conduite dans le vieillissement normal et pathologique, il nous semble important de présenter les études qui se sont intéressées à cette évaluation de la compétence de conduite. En effet, il existe, à notre connaissance, peu d'études qui se focalisent sur la compréhension des mécanismes cognitifs impliqués dans l'activité de conduite par le biais de l'investigation des déficits induits par leur altération. Le but de notre étude sera, de proposer une méthodologie permettant de mieux comprendre quels fonctions cognitives et exécutives sont particulièrement importantes dans l'activité de conduite.

2.2. Déficits cognitifs et conduite dans la maladie d'Alzheimer

Dans une étude récente, Uc *et al.* ont analysé le lien qui pouvait exister entre les déficits cognitifs de patients avec maladie d'Alzheimer et le nombre de comportements dangereux et de collisions par l'arrière en situation de conduite sur simulateur. Les résultats montrent que 89% des patients (contre 65% des âgés contrôles) ont un comportement dangereux lorsqu'ils arrivent en intersection avec un véhicule devant eux qui s'arrête soudainement. Ce comportement dangereux se traduisait soit par un ralentissement très marqué, disproportionné (avec risque d'être percuté par un troisième véhicule derrière le conducteur-sujet), soit par une déviation de la trajectoire sans vérifications sécuritaires ou une collision avec le véhicule à l'arrêt. De plus, les auteurs ont montré que les performances aux tests de perception visuo-spatiale, d'attention, de mémoire verbale et visuelle, de vitesse de traitement et de fonctionnement exécutif étaient significativement corrélées avec le nombre de comportements dangereux en conduite. Cette étude montre donc que les déficits cognitifs de la maladie d'Alzheimer qui peuvent avoir des conséquences sur la conduite sont variés. Nous présenterons d'abord brièvement le rôle des fonctions visuo-attentionnelles et attentionnelles, puis nous nous focaliserons plus longuement sur le rôle du fonctionnement exécutif. La majorité des études présentées dans cette partie ont pour but de proposer des évaluations de plus en plus précises de la conduite, soit à partir d'évaluations sur route, en simulateur, soit à partir de batteries de tests psychologiques. Peu d'études se sont focalisées sur une meilleure compréhension des déficits pour améliorer les évaluations. Nous reviendrons sur ce problème méthodologique dans la présentation de notre problématique.

2.2.1. Fonctions visuo-attentionnelles et conduite

Le lien entre la conduite automobile et les déficits attentionnels dans la maladie d'Alzheimer ont été étudiés depuis longtemps. Parasuraman et Nestor ont réalisé une revue de littérature sur le sujet en 1991, indiquant que le risque d'accident de la circulation chez les conducteurs avec maladie d'Alzheimer était fortement lié aux performances attentionnelles des conducteurs et ce, dans tous les domaines de l'attention, avec cependant un poids plus important pour l'attention sélective et la flexibilité attentionnelle que pour l'attention divisée et la vigilance. Dans une étude précédente, nous avons également montré que, dans une situation de conduite réelle, les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer effectuaient une exploration de la scène routière significativement réduite par rapport à des conducteurs âgés sains. Duchek *et al.* ont montré que la majorité des accidents qui survenaient chez des patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer étaient dus à un problème d'attention sélective et qu'ils se produisaient dans des situations bien spécifiques, où la demande cognitive et la pression temporelle sont fortes, ce qui est le cas des situations d'intersections et, en particulier, des intersections en tourne-à-gauche.

Selon Rizzo *et al.*, plusieurs études rapportent qu'il existerait dès les stades précoces de la maladie d'Alzheimer, des troubles visuels voire une variante visuelle de maladie d'Alzheimer. Dans cette étude, Rizzo *et al.* ont montré que des patients en stade débutant de maladie d'Alzheimer présentaient des déficits dans certains tests visuels,

sans pour autant présenter de plainte visuelle. En fait, ce sont surtout les tests d'acuité dynamique et de champ visuel utile (CVU) qui sont particulièrement atteints dans la maladie d'Alzheimer, comparativement à des contrôles âgés (qui eux-mêmes présentent parfois les premiers signes de troubles du CVU et de l'attention visuelle, cf. chapitre précédent). Ces déficits visuo-attentionnels peuvent avoir des répercussions non seulement sur les performances cognitives des patients, mais aussi sur les capacités de conduite automobile. En effet, McGwin *et al.* ont montré à l'aide d'un questionnaire de conduite (*Driving Habits Questionnaire*, DHQ) que les déficits visuels étaient fortement liés aux difficultés en conduite éprouvées par les participants. Dans leur étude, 384 conducteurs ont reçu le DHQ, une évaluation de leurs capacités visuelles (acuité simple, acuité dynamique, sensibilité aux contrastes et CVU) et une évaluation cognitive globale (MMSE et échelle de Mattis). Les résultats indiquent que les conducteurs avec déficits visuels ressentent plus de difficultés de conduite que les conducteurs sans déficits et plus particulièrement chez les conducteurs présentant des déficits cognitifs. L'acuité visuelle semble être le point le plus important rapporté par les participants mais c'est le CVU qui était le plus pertinent pour différencier les participants avec ou sans difficultés à conduire.

Par ailleurs, Uc *et al.* ont réalisé une étude sur route réelle dans laquelle les participants devaient détecter dans la scène routière des panneaux de signalisation ainsi que des points de repère spécifiques. Les résultats montrent que les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer ont détecté significativement moins de panneaux et de points de repère que les conducteurs âgés témoins. Les patients ont également effectué plus d'erreurs de conduite pendant la recherche visuelle. Ces faibles performances sur la route étaient significativement corrélées avec les résultats obtenus par les participants à la batterie de tests visuo-attentionnels (dont le CVU) utilisée.

En résumé, la réduction importante du CVU dans la maladie d'Alzheimer est un signe important de réduction des capacités de conduite automobile chez les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer. Cependant Rizzo *et al.*, dans les différentes études citées plus hauts, insistent toujours sur le fait que, bien que les mesures de champ visuel utile et de vision dynamique soient presque toujours corrélées avec les performances en conduite mesurées en situation réelle, sur simulateur ou encore à l'aide de questionnaires, ces performances sont aussi très souvent expliquées par une réduction significative des performances aux tests cognitifs et en particulier aux tests du contrôle attentionnel. Reger *et al.* dans une méta-analyse, rapportent que parmi toutes les études qu'ils recensent, la majorité implique des évaluations de l'attention, et en particulier de l'attention visuelle sélective. Cependant, Reger *et al.* indiquent que ces études sont loin d'être consensuelles et que seule une petite partie montre des déficits attentionnels précis. De plus, ces études utilisent des évaluations relativement complexes de l'attention qui, selon Reger *et al.*, se rapportent plutôt à une évaluation du fonctionnement exécutif et de la mémoire de travail. Ils insistent sur le fait que les études qui veulent montrer des liens significatifs entre performances de conduite et démence doivent utiliser ce type d'évaluations cognitives plus complexes et plus précises.

2.2.2. Fonctions exécutives et conduite

Nous l'avons vu dans la partie précédente, les altérations du fonctionnement exécutif sont

précoces dans la maladie d'Alzheimer . Nous avons également vu dans le premier chapitre de ce travail que les fonctions exécutives jouent un rôle important, voire essentiel dans la conduite automobile. Il semble donc maintenant important de nous tourner vers le lien qui a pu être établi entre les déficits exécutifs et la dégradation des performances de conduite dans la maladie d'Alzheimer.

Globalement, toutes les études qui ont tenté de comparer les performances de conduite aux déficits cognitifs avec des tests neuropsychologiques, comprenaient une évaluation de certaines composantes exécutives, telles que la flexibilité (mesurée avec le *TMT*, le *WCST*) la prise de décision, l'orientation visuo-spatiale , ou encore l'inhibition .

L'équipe de Whelihan et Ott a également réalisé plusieurs études montrant que les déficits exécutifs, notamment mesurés avec un test de labyrinthe (*Maze Navigation Test*), étaient significativement reliés aux performances de conduite. Par exemple, Ott *et al.* (2000) ont réalisé une étude en imagerie (TEP) par laquelle ils montrent que les performances de conduite sont significativement reliées à la sévérité de la démence et au fonctionnement exécutif. De plus, les résultats de l'imagerie indiquent que l'augmentation des difficultés en conduite est corrélée avec des changements d'activation de régions cérébrales. En effet, les changements dans les régions temporo-pariétales sont associés aux déficits de conduite légers alors que les changements dans les régions frontales sont associés aux déficits de conduite plus sévères. Les auteurs ajoutent que ces données d'imagerie permettent d'expliquer les résultats d'études antérieures concernant le faible lien entre *MMSE* et conduite : le *MMSE* ne rend pas correctement compte des déficits de conduite des patients en stade débutant de maladie d'Alzheimer car il implique le fonctionnement cognitif plutôt supporté par l'hémisphère cérébral gauche, alors que l'étude TEP réalisée montre que c'est l'hémisphère droit qui est plus particulièrement atteint au début de la maladie d'Alzheimer, bien que les auteurs préconisent de dupliquer ces résultats. Cependant, il est regrettable que cette étude ait uniquement pris en compte la compétence de conduite sous la forme d'un rapport réalisé par l'entourage. En effet, les auteurs font référence à la « capacité de conduite » alors que celle-ci a seulement été évaluée au moyen d'un questionnaire proposé à l'entourage. Il semble important de pouvoir proposer une mesure de la conduite qui soit directement en lien avec les fonctions exécutives évaluées en laboratoire.

Whelihan *et al.* ont réalisé une étude incluant 46 participants dont 23 patients en stade débutant de démence (*CDR* = 0.5). Les participants ont reçu une batterie de tests neuropsychologiques évaluant l'attention (*UFOV*), le langage (dénomination d'images), la mémoire et les fonctions exécutives (*WCST*, *Fluences*, *TMT A* et *B* et *Maze navigation test*), puis un test sur route réelle. Les résultats indiquent que ce sont les tests exécutifs qui prédisent le mieux les performances de conduite des participants. Les auteurs ajoutent que les batteries neuropsychologiques devraient systématiquement être incluses dans les évaluations de la conduite car elles permettent de compléter les évaluations sur route. Mais ces batteries ne doivent pas simplement prendre en compte une évaluation cognitive globale. Selon les auteurs, c'est l'évaluation du fonctionnement exécutif qui permettrait le mieux de prédire les performances de conduite. Nous pensons qu'effectivement les épreuves exécutives devraient être plus systématiquement utilisées. Cependant, il serait nécessaire au préalable de mieux connaître quels types de fonctions

exécutives sont impliquées dans l'activité de conduite afin de déterminer quels pourraient être les tests les plus sensibles.

Rizzo *et al.* ont proposé une mesure de la prise de décision (avec un paradigme de type *Go/No-Go*) sur simulateur de conduite et ils ont testé cette situation sur des patients avec troubles neurologiques variés dont des patients présentant la maladie d'Alzheimer en stade débutant. La situation de conduite consistait à traverser des barrières précédées par un message « Stop » ou « Go » indiquant si la barrière serait fermée ou ouverte. Dans 20 % des cas cependant, le signal ne correspondait pas à la position de la barrière qui pouvait soudainement se fermer alors que le signal « Go » était présenté ou au contraire rester ouverte en présence d'un signal « Stop ». Les résultats indiquent que les patients avec déficits exécutifs, comme les patients avec maladie d'Alzheimer, ont des performances globalement moins bonnes que les témoins, mettent plus de temps à réaliser la tâche, et présentent plus de collisions avec les barrières que les témoins. D'autres patients obéissent aveuglément aux signaux et s'arrêtent même lorsqu'il est possible de passer, sachant que la consigne était de faire attention à ne pas s'arrêter à une barrière ouverte. Par ailleurs, les sujets avec déficits exécutifs à la batterie de tests ont mis plus longtemps à compléter le test, mais présentent un bon contrôle du véhicule et ne dépassent pas les limites latérales de la route. Il est cependant regrettable que les auteurs ne précisent pas quels tests neuropsychologiques ont été utilisés pour mettre en évidence les déficits exécutifs. Comme nous le verrons, dans la partie expérimentale de notre travail de recherche, nous avons repris ce paradigme expérimental et nous l'avons adapté sur notre simulateur de conduite afin d'évaluer la composante d'inhibition en conduite.

Par ailleurs, Uc *et al.* ont réalisé une autre étude mettant à l'épreuve des patients en stade débutant de maladie d'Alzheimer, à l'aide d'une batterie de tests cognitifs, en particulier de tests exécutifs, et d'une épreuve sur route réelle. Le conducteur recevait des directions à prendre et parfois à mémoriser, et on mesurait les erreurs de conduite (virages incorrects, erreurs de direction, conduite dangereuse). Les résultats montrent que les patients avec maladie d'Alzheimer commettent significativement plus d'erreurs que les témoins âgés et réalisent plus d'erreurs de type « conduite dangereuse ». Par ailleurs, les erreurs commises en conduite étaient significativement corrélées aux déficits cognitifs. Cependant, il est à noter, que dans cette étude, Uc *et al.* comparent des patients avec maladie d'Alzheimer ayant une moyenne d'âge de 75.9 ans ($SD = 6.2$) à des contrôles âgés en moyenne de 64 ans ($SD = 11.1$). Les contrôles sont donc nettement plus jeunes que les patients, ce qui pourrait expliquer une part des différences de performances, outre les troubles neurologiques. De plus, la mesure des déficits cognitifs a été réalisée sur la base du score « cogstat » calculé à partir de la moyenne des scores standardisés aux huit tests neuropsychologiques administrés, c'est-à-dire à partir d'un mélange de performances visuelles, attentionnelles, verbales et exécutives. Il aurait été intéressant de relier les différents types de déficits, en fonction de leur origine, aux troubles observés dans la conduite afin, par exemple, d'évaluer la part des déficits d'inhibition des informations non pertinentes ou de la flexibilité dans les résultats observés. Dans une autre étude, Rizzo *et al.* ont comparé les performances de 48 patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer à 101 conducteurs âgés sains dans une épreuve sur simulateur de conduite, complétée d'une évaluation neuropsychologique, en utilisant le même critère

de performance cognitive, le *Cogstat*. Leurs résultats indiquent que plus les patients présentaient un score cognitif bas, plus leur comportement au volant présentait des caractéristiques inappropriées, voire dangereuses, telles que des arrêts au milieu de la chaussée. Les auteurs concluent que le simulateur de conduite peut être réellement efficace pour mettre au point des situations évaluant une capacité cognitive particulière impliquée dans la conduite. Dans une revue de littérature, Adler *et al.* précisent également que seules les études qui différencient les tests neuropsychologiques selon les fonctions évaluées, étaient en mesure de montrer un lien significatif entre les performances aux tests et les performances en conduite. En effet, une évaluation globale ne permettait pas d'obtenir des corrélations, mais en prenant spécifiquement les mesures de l'attention, de la mémoire de travail et des fonctions exécutives, les corrélations entre tests et conduite étaient nettement améliorées.

En définitive, l'étude de la littérature concernant les troubles exécutifs et la conduite automobile dans la maladie d'Alzheimer est finalement peu abondante par rapport à celle disponible sur les autres troubles cognitifs (attention, orientation spatiale...) ou encore sur le vieillissement cognitif normal. Pourtant les fonctions exécutives sont bien déficitaires dans la maladie d'Alzheimer, et ce même dans les stades précoces où le patient n'a pas conscience de ses troubles. La difficulté à montrer des liens entre évaluation neuropsychologique et évaluation en situation de conduite vient donc peut-être du fait qu'à l'heure actuelle, les fonctions exécutives ne sont pas suffisamment prises en compte. De plus, le manque de compréhension de l'implication et du rôle des fonctions exécutives dans la conduite automobile est également un facteur qui peut expliquer cette lacune.

Par ailleurs, les études présentées plus haut n'ont pas toutes étudié le même type de population. Or l'état d'avancement de la démence est un critère important à prendre en compte dans les études sur la maladie d'Alzheimer car, si dans les stades avancés de démence, l'arrêt de la conduite se fait de manière naturelle, le stade précoce pose des problèmes. Le lien entre performances de conduite et avancement de la maladie n'a pas fait l'objet d'un grand nombre d'études. Duchek *et al.* ont réalisé une étude longitudinale sur deux ans, avec une évaluation des performances cognitives et une évaluation des capacités de conduite sur route tous les six mois, sur 58 conducteurs âgés sains ($CDR = 0$), 21 patients en stade de démence légère ($CDR = 0.5$) et 29 patients en stade de démence modérée ($CDR = 1$). A la première évaluation de conduite, 41 % des patients avec $CDR = 1$, 14 % des patients avec $CDR = 0.5$ et 3 % des contrôles ont reçu une évaluation négative de conduite ; ils ont donc reçu la recommandation de cesser la conduite et ne sont donc pas revenus à la seconde évaluation. Ce premier résultat indique que presque la moitié des patients avec démence modérée conduisait jusqu'à cette évaluation, alors qu'ils ont été considérés comme dangereux lors de l'étude et que c'est le cas pour 15 % des patients en stade léger. Au cours du suivi longitudinal, les auteurs ont observé une détérioration de la performance dans les trois groupes, mais cette altération était plus importante au sein des deux groupes de patients et significativement plus importante dans le groupe des patients en stade léger ($CDR = 0.5$). Il est donc important de se focaliser sur cette tranche de patients qui ne présentent pas de déclin cognitifs très marqués, mais dont les capacités de conduite peuvent rapidement se détériorer. Dubinsky *et al.* ont également montré que si, à un niveau de démence modéré ($CDR = 1$), le risque d'accident est relativement bien établi, il en est tout

autrement pour les stades précoces ($CDR = 0.5$), pour lesquels les résultats sont à étudier au cas par cas, et que les généralisations ne sont pas possibles.

2.3 Synthèse

En définitive, la maladie d'Alzheimer est une pathologie dégénérative très fréquente, mais qui s'installe insidieusement et, dans les premières années de la démence, le patient conserve une autonomie et une indépendance dans ses activités quotidiennes. Cette indépendance passe inévitablement par sa possibilité de se déplacer librement et donc de pouvoir conduire son véhicule aussi longtemps que possible. Cependant, de nombreuses études ont montré que, même dans les stades précoces de la maladie, les déficits cognitifs peuvent entraîner des déficits dans la capacité à conduire. Tant que l'on ne connaîtra pas mieux les mécanismes cognitifs de haut niveau qui sont impliqués dans la conduite et qui sont susceptibles d'être altérés dans des pathologies telles que la maladie d'Alzheimer, il sera très difficile de proposer des évaluations rapides et fiables des capacités de conduire. Par ailleurs, plusieurs études montrent que des patients avec maladie d'Alzheimer débutante présentaient des performances de conduite sécuritaires, tout du moins, aussi sécuritaires que celles de conducteurs âgés sans pathologie. Ceci montre que le simple critère de diagnostic de la maladie d'Alzheimer ne suffit pas à prédire le caractère dangereux ou non du conducteur. La question qui se pose alors est de savoir ce qui peut différencier des conducteurs avec maladie d'Alzheimer précoces qui sont aptes à conduire de ceux qui ne le sont pas. L'évolution de la maladie peut être l'un de ces critères, ou encore la possibilité d'entraînements permettant de maintenir les « savoir-faire », qui selon la problématique de Brouwer permettraient de compenser des difficultés au niveau des aptitudes. Enfin, pour pouvoir proposer de meilleurs critères d'évaluation puis des possibilités d'entraînement ou d'adaptation, il faudra d'abord améliorer nos connaissances sur les mécanismes sous-jacents aux modifications de performance de conduite. Notre travail de thèse devrait apporter des éléments de connaissance concernant certains de ces mécanismes, les fonctions exécutives, qui interviennent à différents niveaux de la conduite automobile et qui se modifient sensiblement avec l'âge et avec l'apparition de pathologies comme la maladie d'Alzheimer.

Problématique et Hypothèses

La conduite automobile est une activité pratiquée par des millions de personnes de manière banale et routinière. Il s'agit cependant de l'une des activités de la vie quotidienne les plus complexes. Elle requiert une alternance continue entre des processus automatiques, ou du moins automatisés et des processus qui doivent rester sous contrôle attentionnel et exécutif. En outre, nous avons évoqué au cours du premier chapitre que le contrôle exécutif représentait un ensemble organisé de fonctions cognitives, dont le rôle principal est de permettre une adaptation du sujet aux situations complexes ou nouvelles et qui interviennent lorsque des routines d'action ne peuvent suffire à gérer la situation en cours. Cette définition correspond tout à fait à ce qui intervient en situation de conduite automobile. Nous nous sommes également penchés sur les évolutions démographiques annoncées pour les décennies à venir. L'inéluctable vieillissement de la population et l'amélioration générale de l'état de santé des seniors, ainsi que l'augmentation générale de la densité du trafic routier, entraînent un accroissement important de l'intérêt porté aux recherches sur les conducteurs vieillissants.

Deux autres points essentiels ont été abordés au cours de cette présentation théorique. Nous avons évoqué les effets du vieillissement normal et du vieillissement pathologique sur le système cognitif, en s'intéressant à une démence dégénérative particulière, la maladie d'Alzheimer. Le fonctionnement exécutif a été relativement bien exploré dans le vieillissement normal et pathologique et, bien qu'il subsiste encore des débats sur la nature des dysfonctionnements observés, les recherches s'accordent globalement pour dire que le vieillissement normal s'accompagne d'altérations légères

mais observables du fonctionnement exécutif, s'exprimant principalement par des ralentissements et que la Maladie d'Alzheimer entraîne des altérations importantes des fonctions exécutives, même à des stades très précoces de démence. Ces troubles sont clairement distinguables de ceux observés dans le vieillissement normal et ne peuvent pas être considérés comme un continuum du vieillissement normal.

Différents modèles du contrôle attentionnel d'abord, puis du fonctionnement exécutif ont pu être proposés au cours du développement des recherches en psychologie cognitive. Nous avons choisi de nous attacher à un modèle particulier, celui de Miyake *et al.* qui considèrent que le système exécutif est un système global à la fois unitaire, mais qui se décompose en différentes fonctions, dites « exécutives », la flexibilité mentale, la mise à jour des informations en mémoire de travail et l'inhibition des réponses automatiques ou des informations non pertinentes. Ce modèle n'a, à notre connaissance, jamais été mis en relation avec l'activité de conduite pour expliquer comment le contrôle exécutif prend en charge cette activité. Cependant, il nous semble intéressant de supposer que ces trois fonctions indépendantes mais reliées sont indispensables à une gestion correcte et sécuritaire de la conduite automobile. En effet, la conduite automobile consiste, pour les conducteurs expérimentés, en une alternance de "séquences comportementales stéréotypées" (processus automatiques), d'"épisodes de vérification consciente" (processus contrôlés) et de "transitions occasionnelles vers un contrôle de l'action basé sur la connaissance (déclarative)". Ce sont les fonctions exécutives qui permettent ces transitions entre les différentes séquences de comportement. Chez le conducteur expérimenté, des apprentissages procéduraux (implicites) se sont mis en place et la conduite s'automatise, sauf dans des cas particuliers (conduite de nuit, par mauvais temps...) où il y a un retour à un contrôle attentionnel, avec des vérifications conscientes des actions. Pour la majorité des conducteurs, cette gestion entre les processus automatiques et contrôlés, gérée par le système exécutif, se fait de manière correcte et habituelle. Cependant, les conducteurs âgés ou présentant certains troubles neurologiques sont-ils tout aussi capables d'effectuer cette gestion exécutive de la situation ?

Par ailleurs, le lien entre troubles exécutifs et conduite automobile n'a été finalement que peu exploré dans les recherches actuelles. L'accent est souvent placé sur la mise au point d'outils permettant une évaluation fiable et rapide de la performance de conduite. Jusqu'à présent la plupart des recherches insistent sur le fait qu'il n'existe aucun moyen de prédire la performance et la capacité effective d'un conducteur à conduire de manière sécuritaire à partir d'un test neuropsychologique ou même à partir d'une batterie de tests. La seule mesure efficace reste aujourd'hui la mise en situation de conduite. Cependant, avant de pouvoir offrir ces outils fiables et rapides d'évaluation de la conduite, la communauté scientifique doit encore faire des efforts pour mieux comprendre les mécanismes impliqués dans le vieillissement normal et pathologique qui peuvent rendre la conduite non sécuritaire. Notre travail de thèse s'inscrit dans le cadre de ces recherches qui devraient permettre de mieux comprendre en quoi consiste précisément les mécanismes cognitifs impliqués dans l'activité de conduite et comment ils se détériorent dans le vieillissement normal et pathologique.

La neuropsychologie a bien souvent cherché à comprendre des mécanismes

fondamentaux, tels que la mémoire, le langage, ou le fonctionnement frontal ou exécutif, à partir de l'étude des conséquences de l'altération de ces mécanismes, cette altération pouvant par exemple être provoquée chez l'animal ou observée chez l'homme dans le cas de pathologies acquises ou dégénératives, comme la maladie d'Alzheimer. Afin de mieux comprendre comment les fonctions exécutives interviennent dans la conduite automobile et quel est leur rôle spécifique dans cette tâche, nous avons décidé de nous placer dans la méthodologie neuropsychologique afin de mettre en évidence comment, dans le cas de troubles légers (vieillessement normal) et modérés (vieillessement pathologique) du fonctionnement exécutif, des situations mettant en jeu les fonctions exécutives pouvaient être gérées par les conducteurs.

Notre hypothèse générale est que, en raison de modifications du système exécutif induites par le vieillissement normal et pathologique, des conducteurs âgés auront des difficultés à réaliser des tâches en situation de conduite impliquant les fonctions exécutives mais qu'ils pourront compenser ces difficultés par la mise en œuvre de stratégies variables, ce qui ne sera pas le cas pour des conducteurs en stade précoce de maladie d'Alzheimer.

Le cadre théorique proposé par Miyake *et al.* (2000) a été retenu pour mettre au point ces situations de conduite. En effet, nous avons élaboré quatre scénarii de conduite mettant en jeu spécifiquement l'une des trois composantes exécutives, de flexibilité, de mise à jour et d'inhibition, ainsi qu'une quatrième situation plus globale de conduite qui intègre les trois composantes. C'est dans le cadre de la simulation de conduite que cette mise en situation a été réalisée. En effet, le simulateur de conduite est un outil innovant qui nous a permis de proposer des situations complexes ne pouvant pas être reproduites en réalité, dans un contexte de reproductibilité fiable et de contrôle de la situation. Chaque situation de conduite devait ainsi être réalisée à l'aide du simulateur de conduite de l'INRETS, dont les caractéristiques seront détaillées dans la partie expérimentale qui suit.

Nous formulons donc **six** hypothèses à partir de notre hypothèse générale et du cadre méthodologique choisi :

Hypothèses sur l'évaluation neuropsychologique des fonctions exécutives :

Hypothèses sur l'évaluation des fonctions exécutives en situation de conduite :

Hypothèses sur la situation de conduite de tourne-à-gauche sur simulateur :

Afin de mettre à l'épreuve ces hypothèses, un protocole expérimental combinant une évaluation précise des fonctions exécutives et une mise en situation en conduite automobile a été mis au point. Ce protocole a impliqué trois groupes expérimentaux, constitués de participants jeunes, âgés et de patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer. Les évaluations neuropsychologiques du fonctionnement exécutif ont été réalisées à partir d'une batterie de tests élaborée par le *Groupe de réflexion sur l'évaluation des Fonctions Exécutives*, complétée par plusieurs tests d'évaluation de chacune des trois composantes, la flexibilité mentale, la mise à jour des informations en mémoire de travail et l'inhibition.

Les situations de conduite impliquant chacune des trois composantes, ainsi que la situation globale de tourne-à-gauche ont été mises au point sur le simulateur de l'INRETS,

dont les caractéristiques sont présentées dans la partie suivante.

Partie 2 – Données expérimentales

Introduction

Dans les développements théoriques proposés dans la partie précédente, nous avons présenté les fonctions exécutives comme un ensemble des processus variés, de haut niveau cognitif et qui opèrent dans les situations non routinières, inhabituelles, conflictuelles ou complexes . Miyake *et al.* en ont proposé une modélisation particulière en définissant le système exécutif comme un système qui gère entièrement le contrôle des actions, système global qui se décompose en trois processus cognitifs distincts, d'**inhibition**, de **mise à jour** des représentations mentales et de **flexibilité mentale**. D'autre part, la conduite automobile a été présentée comme une activité semblant *a priori* banale, mais qui est en fait très complexe d'un point de vue cognitif et impliquant en permanence des processus cognitifs de *bas* niveau, comme la vision ou l'audition, de *haut* niveau, comme l'attention ou la mémoire, mais aussi des processus de *très haut* niveau, les processus exécutifs.

Cependant, les études recensées concernant les fonctions exécutives, leur altération dans le vieillissement ou dans les pathologies neurologiques, et leur implication dans l'activité de conduite, sont souvent présentées de manière séparée. On sait que les fonctions exécutives interviennent dans la conduite automobile, on sait également qu'elles

se dégradent dans la maladie d'Alzheimer, mais la recherche exposée ici présente l'intérêt de proposer un protocole expérimental où les fonctions exécutives ne sont pas seulement évaluées dans des situations classiques de laboratoire, mais aussi dans des situations écologiques de conduite simulée.

Notre travail de recherche a donc comme objectifs, d'une part d'étudier le rôle précis de ces fonctions exécutives dans l'activité de conduite, et d'autre part, d'étudier quelles sont les conséquences de leurs déficits dans un syndrome particulier, la Maladie d'Alzheimer, ceci à l'aide d'un outil particulier, le simulateur de conduite. Cet outil possède l'avantage de permettre des situations identiques à chaque passation, et qui seront reproductibles et contrôlées. De plus, plusieurs études réalisées récemment, ainsi que notre précédent protocole, ont permis de vérifier que les expériences de conduite sur simulateur étaient possibles à la fois chez les conducteurs âgés et chez les patients présentant des troubles neurologiques. Korteling et Kaptein suggèrent par ailleurs que des expériences en simulation de conduite nécessitent d'être développées en raison de la trop grande variabilité des études en situation réelle de conduite.

Afin de mettre à l'épreuve nos différentes hypothèses générales, un protocole expérimental particulier a été mis au point. D'une part, l'altération des fonctions exécutives a été évaluée à l'aide d'une batterie de tests exécutifs, certains choisis pour être particulièrement sensibles à chaque composante, d'autres étant des tests plus écologiques ou plus complexes et évaluant le système exécutif dans son ensemble. Nous avons choisi comme base d'évaluation la batterie du *Groupe de Réflexion sur l'Évaluation des Fonctions Exécutives*. Leurs travaux ont proposé une approche appliquée à la clinique des fonctions exécutives, une méthode d'étude et une batterie. En effet, leur étude multicentrique impliquant 23 centres et ayant actuellement inclus plus de 1200 patients, a pour objectif d'étudier l'organisation fonctionnelle des fonctions exécutives à travers l'étude des troubles engendrés par différentes pathologies cérébrales. D'autre part, notre méthodologie a consisté à mettre au point une évaluation précise de l'implication des fonctions exécutives dans l'activité de conduite. Pour ce faire, quatre protocoles expérimentaux sur simulateur de conduite ont été élaborés et testés sur nos échantillons de participants. Trois de ces protocoles avaient pour objectif d'isoler une composante exécutive particulière, le dernier était une situation globale et réaliste de conduite où l'ensemble des fonctions exécutives interviennent.

Cette étude a été soumise à l'accord préalable du *Comité Consultatif des Personnes dans la Recherche Biomédicale* (CCPPRB Lyon A, aujourd'hui appelé CPP Lyon Sud Est). Il a reçu un avis favorable de la *Direction Générale de la Santé* le 9 Août 2005 (N° d'enregistrement DGS : 2005/0330). Les expérimentations se sont déroulées du 1^{er} Novembre 2005 au 15 Février 2007. Chaque volontaire a donc été soumis à une visite médicale préalable, a reçu un formulaire d'informations présentant les buts et le déroulement de l'étude, et a signé un formulaire de consentement libre et éclairé, validé au préalable par le CCPPRB (Annexe 1). Les participants ont également tous reçu une indemnisation qui était calculée au prorata-temporis de leur présence au laboratoire (jusqu'à 100€). Toutes les séances de conduite ont fait l'objet d'un enregistrement vidéo (son et image) et les participants ont donné leur accord pour l'exploitation de ces enregistrements à des fins scientifiques et de façon anonyme.

Chapitre 1. Méthodologie

1. Les participants

1.1. Critères d'Exclusion et Visite Médicale

Tous les participants devaient être des assurés sociaux, titulaires d'un permis de conduire de véhicules légers en cours de validité, n'ayant pas fait l'objet d'une mesure de suspension récente.

Chaque volontaire a été soumis à une visite médicale préalable qui s'est déroulée au sein de l'INRETS et qui a été réalisée par un médecin généraliste externe. L'entretien médical (Annexe 2) s'appuyait sur un questionnaire composé de 3 parties distinctes, une partie concernant les antécédents médicaux, et l'état de santé actuel, une seconde partie concernait la prise de médicaments des participants. Enfin, le médecin effectuait un examen médical approfondi (vue, audition, tension, électrocardiogramme) et donnait un avis sur la possibilité d'inclusion ou non du participant. Tous les participants susceptibles de ressentir le mal du simulateur ou répondant à l'un des critères d'exclusion suivants n'ont pas été retenus : Insuffisance respiratoire ou cardiaque, chirurgie cardiaque récente, prédisposition au mal des transports, problèmes d'oreille interne, déficiences visuelle ou auditive non corrigée, Maladie de Parkinson ou autre trouble neurologique (autre que la maladie d'Alzheimer), antécédents psychiatriques majeurs, antécédents d'éthylisme, traitement par psychotropes non stabilisés. Par ailleurs, comme pour toute étude réalisée sur un simulateur de conduite, les personnes souffrant d'épilepsie n'ont pas pu participer.

Dès qu'une raison médicale aboutissait à l'exclusion d'un volontaire, la procédure de recrutement était interrompue et le participant pouvait regagner son domicile (les patients étaient raccompagnés à leur domicile par l'expérimentateur). Les participants vus en visite médicale n'ont donc pas tous participé à l'étude dans son intégralité.

1.2. Le groupe des patients

Le groupe de patients était constitué de 10 personnes (3 femmes, 7 hommes) atteintes de la Maladie d'Alzheimer en stade précoce selon les critères de la NINCDS-ADRDA . Un score minimum de 24 au MMSE était requis pour pouvoir entrer dans l'étude. Au total 22 patients s'étaient portés volontaires pour cette étude, mais 10 seulement ont pu participer. Les 12 autres ont soit été exclus à la visite médicale (huit personnes), soit se sont sentis mal à l'essai préalable du simulateur (trois personnes), soit enfin, ils ont abandonné l'étude avant sa fin (une personne).

Les patients ont été recrutés par le biais des services de neurologie du Grand Lyon, à l'Hôpital Neurologique (auprès du Dr B. Croisile), à l'Hôpital Saint Jean de Dieu (auprès du Dr I. Gallice), à l'hôpital Sud (auprès du Dr C. Gédéon), ainsi que dans un cabinet

libéral de neurologie (auprès du Dr P. Neuschwander).

Au moment de l'expérience les patients étaient âgés de 65 à 81 ans ($M = 74.86$ ans ; $SD = 5.36$). Le niveau d'étude a été évalué par le nombre moyen d'années d'étude à partir de la première inscription en cycle primaire ($M = 10.90$ ans ; $SD = 4.36$). Tous sont droitiers. Enfin, ils sont tous conducteurs actifs d'un véhicule léger et effectuent un kilométrage annuel supérieur à 3000 km.

1.3. Les groupes de témoins

Deux groupes de témoins ont été inclus dans cette expérience. D'une part un groupe de jeunes conducteurs, âgés de 18 à 35 ans, d'autre part, un groupe de conducteurs âgés sains, de plus de 65 ans. Ces deux groupes-contrôles nous ont permis d'effectuer un continuum de mesure du fonctionnement exécutif et devraient nous permettre d'observer des premières différences entre jeunes et âgés, puis des différences plus marquées entre les âgés sains et les âgés atteints de démence.

1.3.1. Les témoins jeunes

Trente jeunes conducteurs (17 femmes, 13 hommes) ont été recrutés par le biais des réseaux des *Maisons de la Jeunesse et de la Culture* (MJC) du Rhône. Ces jeunes témoins étaient âgés de 18 à 35 ans au moment de l'expérience ($M = 24.48$ ans ; $SD = 4.80$). Leur niveau d'étude était égal en moyenne à 13.37 années ($SD = 2.16$). Tous les participants étaient des droitiers. Tous sont des conducteurs actifs d'un véhicule léger et parcourent au moins 4000 km par an.

1.3.2. Les témoins âgés

Enfin, vingt-neuf conducteurs âgés sains (12 femmes, 17 hommes) de plus de 65 ans ont également été recrutés par le biais de diverses associations de retraités de la région lyonnaise. Les participants étaient âgés de 62 à 78 ans au moment de l'expérience ($M = 70.83$ ans ; $SD = 2.95$). Les témoins âgés ont effectué en moyenne 11.76 années d'étude ($SD = 2.89$). Ils sont également tous conducteurs actifs de leur véhicule et parcourent plus de 4000 km par an.

2. Matériel et Méthode

2.1. Evaluation des fonctions exécutives

Afin d'évaluer les évolutions des performances exécutives au cours du vieillissement normal et pathologique, différents tests classiques en neuropsychologie ont été sélectionnés pour évaluer nos différentes composantes exécutives. D'une part, nous avons choisi la batterie du Grefex, à laquelle nous avons ajouté quelques tests complémentaires pour l'évaluation propre des composantes exécutives sélectionnées. Le paragraphe suivant a pour but de décrire ces différents tests, ainsi que les variables qui leur sont associées.

2.1.1. Batterie du Grefex

Le Grefex a sélectionné ces tests d'évaluation des fonctions exécutives à partir de différentes recherches sur *Medline* et de sondages réalisés auprès d'équipes universitaires francophones. Leur étude a abouti à la sélection de sept tests d'évaluation du fonctionnement exécutif. Les tests sont toujours administrés dans le même ordre, qui est celui correspondant à la description suivante.

Test des Couleurs de Stroop

C'est l'épreuve la plus utilisée en neuropsychologie pour évaluer les capacités d'inhibition. La procédure utilisée comportait 3 conditions : une condition de dénomination couleur, où le participant devait dénommer le plus rapidement possible la couleur de rectangles (rouge, bleu, vert) ; une condition de lecture où le participant devait lire des noms de couleur (bleu, rouge, vert) écrits en noir ; et une condition d'interférence où le participant devait donner la couleur d'impression de noms de couleur différents de celle avec laquelle ils étaient imprimés sur la feuille (exemple : « **Bleu** » écrit en vert). Cette condition nécessitait que le sujet **inhibe** le processus automatique de lecture au profit de la dénomination de couleur qui n'est pas une tâche courante. La version utilisée ici était une version **papier** où chaque condition a déterminé un score de vitesse de réalisation (TR). Le nombre d'erreurs spontanément corrigées (EC) et le nombre d'erreurs non corrigées (ENC) ont également été pris en compte.

Test modifié des Six Eléments

Le Test modifié des Six Eléments évalue les capacités de planification et d'organisation du comportement. La version présentée ici était une version modifiée proposée par la BADS à partir de la version originale présentée par Shallice et Burgess . Six sous-tâches devaient être réalisées avec un respect de règles particulières. En effet, le temps était limité pour réaliser ces différentes sous-tâches, et il était impossible de réaliser l'ensemble des tâches dans le temps imparti (10 minutes). Les six sous-tâches consistaient en (1) une tâche de dénomination écrite d'images, (2) une tâche de calcul mental et (3) une tâche de dictée, ces trois différentes tâches devant être exécutées deux fois, mais jamais de manière successive. Les contraintes de cette tâche nécessitaient pour le participant d'élaborer une stratégie qui impliquait d'interrompre chaque tâche à un moment précis. Les variables mesurées sont le score de rang qui correspond au nombre de sous-tâches réalisées auquel on soustrait le nombre de sous-tâches où les règles ne sont pas respectées (succession de deux sous-tâches identiques ou temps trop long sur une même sous-tâche).

Trail Making Test (TMT)

Il est constitué, dans la forme pour adultes choisie par le Grefex de deux parties, la partie A, dans laquelle le participant devait relier en ordre croissant à l'aide d'un crayon une série de nombres dispersés sur une feuille au format A4 (de 1 à 25) ; la partie B, dans laquelle le participant devait alterner entre les nombres et les lettres (exemple : 1 – A – 2

– B – 3 ...). La consigne était de tracer les traits qui relie les chiffres le plus rapidement possible, sans lever le crayon et avec le moins d'erreurs possible. L'expérimentateur chronométrait la passation de chaque partie et les variables mesurées étaient le temps de réalisation de chacune des parties (TR), le nombre d'erreurs réalisées, ainsi que le nombre d'erreurs persévératives pour la partie B. Une erreur était considérée comme persévérative lorsqu'il n'y avait pas d'alternance entre nombre et lettre dans la partie B du test.

Test de Brixton

Il s'agit d'un test de déduction de règles. La tâche nécessite d'observer des pages où une pastille noire se trouve parmi neuf pastilles blanches (deux lignes de cinq pastilles). La pastille noire se déplace de page en page selon une règle définie à découvrir. Différentes règles se succèdent dans neuf séries sans que le participant en soit prévenu à l'avance (« avance d'une pastille », « recule d'une pastille », « alterne entre deux pastilles » et « reste à la même position »). La consigne était de prédire la position à venir de la pastille noire. Les variables mesurées sont le nombre d'erreurs et le nombre d'abandons prématurés du critère. Ce test a été sélectionné pour sa sensibilité aux déficits exécutifs de déduction de règles.

Double Tâche de Baddeley

Cette épreuve a pour but d'évaluer les capacités de l'administrateur central au sens où l'entend Baddeley . La version utilisée pour notre travail de recherche était une version *papier-crayon*. Ce test évalue donc les capacités d'attention divisée. Il était constitué d'une épreuve d'empan chiffrée, où la tâche consistait à répéter des séries de chiffres dont la longueur était déterminée au préalable par une mesure de l'empan numérique à court terme ; et d'une épreuve visuo-motrice de barrage de cases (croix). Dans la tâche d'empan, la série de chiffres est énoncée par l'expérimentateur au rythme d'un chiffre par seconde et le participant doit rappeler la série aussitôt après qu'elle a été énoncée. Les deux épreuves étaient réalisées d'abord en condition de tâche unique, puis simultanément, à chaque fois dans un temps imparti de 2 minutes. Le nombre de cases cochées et le nombre de séquences correctes rappelées constituent les variables mesurées.

Tâche des fluences verbales

Cette épreuve est constituée de deux parties distinctes administrées successivement. La première partie, l'évocation lexicale *formelle* consistait à donner le plus de mots possibles commençant par une lettre précise (exemple : « P ») dans une limite de temps de 2 minutes. La deuxième condition, l'évocation lexicale *sémantique*, consistait à donner le plus de mots possible appartenant une catégorie sémantique particulière (exemple : « animaux ») également en 2 minutes. Les scores dans chaque condition ainsi que le nombre d'erreurs constituaient les variables mesurées. Dans cette épreuve, les intrusions de mots n'appartenant pas à la catégorie donnée, ainsi qu'un retour à la fluence formelle dans la deuxième condition sont caractéristiques de déficits des mécanismes inhibiteurs.

Wisconsin Card Sorting Test

Cette épreuve évalue les capacités d'élaboration, de maintien et de changement de règles. Le principe était le suivant : l'expérimentateur présentait les 4 cartes-stimuli (cartes variant en forme, couleur et nombre : un triangle rouge, deux étoiles vertes, trois croix jaunes et quatre cercles bleus) au participant et lui demandait d'associer une première carte-réponse à une carte-stimulus selon la règle qu'il croyait pertinente. Un point important à considérer est que la catégorie de tri que le participant choisissait au premier essai était considérée comme correcte et déterminait la règle selon laquelle les réponses suivantes étaient cotées. Après six réponses correctes consécutives, l'expérimentateur mentionnait au participant que la règle de tri avait changé, sans lui donner la nouvelle règle. Lorsque le participant a complété les trois premières catégories (ordre déterminé par le participant), il devait les répéter dans le même ordre. Le test se terminait lorsque le participant avait complété les six catégories de tri ou lorsque les 48 cartes étaient épuisées. Sont pris en compte comme variables de mesure, le nombre total de catégories réalisées (max = 6) ainsi que les erreurs effectuées par le participant. Une erreur est considérée comme persévérative lorsque la réponse erronée correspond à la catégorie utilisée par le participant pour sa réponse précédente (c'est-à-dire lorsque le participant persiste dans une catégorie malgré le fait que l'examineur lui ait signalé que sa réponse était incorrecte ou que la règle a changé). Un abandon prématuré du critère correspond au fait que le participant donne deux (ou plus) réponses consécutives correctes dans une catégorie, et qu'ensuite il change de règle sans que l'expérimentateur ne lui ait demandé de le faire.

2.1.2. Tests complémentaires

Afin de compléter cette évaluation neuropsychologique, deux tests ont été ajoutés à la batterie proposée par le Grefex. En début d'évaluation, l'ensemble des participants a reçu l'évaluation du **MMSE**, qui consiste en une série de trente questions simples évaluant différents domaines cognitifs généraux (orientation spatiale et temporelle, apprentissage, attention, calcul mental, mémoire, langage et praxies constructives). La passation du MMSE avait pour but de vérifier que les participants classés dans le groupe « témoins » avaient bien un niveau de MMSE suffisant et qu'il ne s'agissait pas de patients qui s'ignoraient.

Ensuite, un test de mémoire, le **Test des 5 mots** a été administré aux participants, et en particulier aux patients afin de vérifier que leur mémoire était suffisamment préservée pour qu'ils puissent mémoriser les consignes durant les différentes épreuves sur le simulateur. On présentait au participant une liste de 5 mots sur une feuille A4. On lui demandait de lire ces 5 mots à haute voix et de les retenir. Ces 5 mots appartiennent chacun à une catégorie différente (Fleur, Animal, vêtement, fruit, instrument de musique), mais la catégorie n'était pas indiquée. Une fois que le participant avait lu la liste on lui demandait (en laissant la liste sous ses yeux) de dire quel était le nom de chaque mot par catégorie (exemple : *Quel est le nom de fruit ?*). Puis, immédiatement après, on masquait la liste et on lui demandait de rappeler les 5 mots, d'abord sans fournir la catégorie (rappel libre) puis en fournissant la catégorie (rappel indicé). Après quelques minutes, au cours

desquelles un autre test était proposé au participant, on demandait à nouveau au sujet de rappeler les 5 mots, en rappel libre, puis en rappel indicé. Les variables mesurées sont donc le score en rappel libre et indicé pour la condition immédiate et différée.

2.1.3. Tests spécifiques associés aux trois composantes

Ce paragraphe présente les différents tests que nous avons retenus afin d'évaluer spécifiquement les trois composantes exécutives liées à notre modèle théorique, la flexibilité mentale, la mise à jour et l'inhibition.

Flexibilité

Afin d'évaluer la composante de flexibilité mentale, nous avons choisi le *Plus Minus Test*. Ce test a été choisi car il faisait partie des tests utilisés par Miyake *et al.* (2000) dans leur étude, qui ont utilisé le *PMT*, Le *NLT* et le *LGT*. Il nous a paru pertinent de compléter notre batterie avec l'un des tests utilisés dans cette étude, puisque la batterie du Grefex ne comportait pas de mesure spécifique de la flexibilité. En effet, le *TMT*, qui est couramment utilisé comme mesure de flexibilité, fait encore l'objet de débats dans la littérature et est parfois placé dans la catégorie de la flexibilité et parfois dans celle de l'inhibition. Nous préférons donc le conserver en tant que test exécutif global. L'épreuve de *PMT* consistait à présenter trois listes de 30 nombres à deux chiffres sur une feuille A4. Sur la première liste, le participant devait ajouter « 3 » à chaque nombre et écrire sa réponse. Sur la seconde liste, la tâche consistait à soustraire « 3 » à chaque nombre et écrire la réponse. Enfin, sur la troisième liste, le participant devait alternativement ajouter « 3 » au premier nombre, soustraire « 3 » au deuxième nombre, puis continuer l'alternance. Le participant devait remplir chaque liste le plus rapidement et le plus précisément possible. Les temps de réalisation ainsi que les erreurs ont été comptés pour chaque liste. La variable de mesure de la flexibilité était le coût du shift a été calculé par la différence entre le temps de réalisation à la troisième liste et la moyenne des temps de réalisation aux deux premières listes.

Mise à jour

La batterie proposée par le Grefex ne comprenait pas d'évaluation spécifique de la fonction de mise à jour des informations en mémoire de travail. Nous avons donc mis au point une épreuve permettant de l'évaluer. Le paradigme de *n-back* semblait le plus adapté pour évaluer cette composante. En effet, les tâches généralement utilisées dans l'évaluation de la mise à jour peuvent s'avérer trop complexes, surtout chez les âgés, utilisent du matériel auditif et il est toujours plus difficile de contrôler les troubles auditifs que les troubles visuels. Nous avons donc opté pour la tâche de *n-back* qui peut être comprise par tous les participants, même les patients en stade précoce de démence, et dont le matériel de passation est très simple (des nombres à deux chiffres).

Cette épreuve a été élaborée grâce au logiciel Superlab™, et implémenté sur un ordinateur portable avec un écran de 17 pouces. Elle était constituée de trois parties (consécutivement : 0-back, 1-back, 2-back). Dans chacune des trois parties, dix cibles sont présentées, parmi un total de 100 stimuli. La première (*0-back*) consistait à répondre

(en appuyant sur un bouton) le plus rapidement possible à l'apparition d'un stimulus (le nombre « 50 ») parmi un ensemble de distracteurs (autres nombres à deux chiffres). Dans les deux autres parties, le participant était amené à comparer un stimulus donné (nombre à deux chiffres) à un stimulus présenté antérieurement, soit, respectivement à l'item précédent (*1-back*) soit à l'item antépénultième (*2-back*). Les variables mesurées étaient le temps de réponse à chaque item valide (en ms) et le nombre d'erreurs. Il s'agit d'une adaptation du test de mise à jour de la batterie informatisée TEA .

Inhibition

La tâche d'inhibition sélectionnée est le test de Stroop proposée dans la batterie de Grefex. En effet, c'est l'une des épreuves d'inhibition contrôlée la plus couramment utilisée en neuropsychologie.

2.1.4. Variables de mesures retenues

Les tableaux suivants (Tableau 4 et Tableau 5) présentent pour chaque composante exécutive ainsi que pour les tests plus complexes ou plus écologiques inclus dans la batterie du Grefex, les différentes variables de mesure retenues. Les unités sont précisées entre parenthèses.

Tableau 4. Récapitulatif des variables dépendantes retenues pour chaque composante exécutive.

Composante	Variable Dépendante
<i>Flexibilité</i>	PMT : Coût du shift (CS) = $TR-Alt - [(TR-Add + TR-Sou)/2]$
<i>Mise à Jour</i>	N-back : $(TR-n=2) - (TR-n=0)$
<i>Inhibition</i>	Stroop Test : $(TR-Inter) - (TR-Déno)$

Tableau 5. Récapitulatif des variables dépendantes retenues pour les autres épreuves.

Test	Variables Dépendantes
Trail Making Test	
Partie A	Temps de réalisation (<i>TR-A</i> en s)
	Nombre d'erreurs non corrigées (<i>ENC-A</i>)
Partie B	Temps de réalisation (<i>TR-B</i> en s)
	Nombre d'erreurs non corrigées (<i>ENC-B</i>)
	Nombre d'erreurs persévératives (<i>EP-B</i>)
Test des Six Elements	Score de Rang (<i>R</i>)
Test de Brixton	Nombre d'erreurs non corrigées (<i>ENC</i>)
	Nombre d'abandons prématurés du critère (<i>AC</i>)
Double tâche de Baddeley	
Empan numérique	Score d'empan numérique (<i>Em-Num</i>)
Empan simple	Nombre de séquences correctement rappelées (<i>Em-sim</i>)
Moteur simple	Nombre de cases correctement cochées (<i>M-Sim</i>)
Empan double	Nombre de séquences correctement rappelées (<i>Em-Dou</i>)
Moteur double	Nombre de cases correctement cochées (<i>M-Dou</i>)
Test des Fluences verbales	
Fluence Formelle	Nombres de mots corrects en 2 minutes (<i>F-Form</i>)
	Nombre d'erreurs (<i>E-For</i>)
Fluence Sémantique	Nombres de mots corrects en 2 minutes (<i>F-Sém</i>)
	Nombre d'erreurs (<i>E-Sém</i>)
	Nombre d'erreurs de retour à la fluence formelle (<i>E-SFor</i>)
WCST modifié	Nombres de catégories réalisées (<i>WCST-Cat</i>)
	Nombre d'erreurs total (<i>WCST-ET</i>)
	Nombre d'erreurs persévératives (<i>WCST-EP</i>)
	Abandon prématuré de la règle (<i>WCST-A</i>)
Test des 5 Mots	
Rappel Immédiat	Score en rappel libre (<i>RI-SL</i> sur 5)
	Score en rappel Indicé (<i>RI-SI</i> sur 5)
Rappel Différé	Score en rappel libre (<i>RD-SL</i> sur 5)
	Score en rappel Indicé (<i>RD-SI</i> sur 5)
MMSE	Score sur 30

2.2. Le dispositif sur simulateur de conduite

2.2.1. Le simulateur de conduite

Choix du simulateur

Deux simulateurs relativement différents par leurs caractéristiques techniques et par leur

en vertu de la loi du droit d'auteur.

utilisation sont à la disposition des laboratoires de recherche de l'INRETS.

L'un, appelé « petit simulateur » (voir photo en annexe 3) est composé d'un poste de conduite avec un seul siège pour le conducteur (pas de passager), avec tous les organes de commandes sensiblement identiques à une voiture réelle. L'image est projetée sur un ou plusieurs écrans à l'avant et la rétrovision est incrustée dans l'image avant. Ce simulateur présente l'avantage de pouvoir être disposé dans n'importe quelle pièce, du fait de sa petite taille et de sa maniabilité et la prise en main du véhicule semble *a priori* plus facile. Le second simulateur appelé « grand simulateur » (voir photos en annexe 3) est un simulateur développé sur la base d'une vraie cabine de voiture (*Renault Espace*). Cette fois, l'équipement intérieur est identique à celui d'un vrai véhicule et tous les organes des commandes sont les mêmes. Ce simulateur est fixé dans une salle et peut difficilement être déplacé. Il présente néanmoins l'avantage de rendre la simulation plus réaliste puisque le conducteur est immergé dans un contexte de conduite plus réel du fait de cet environnement proche de celui d'une voiture. Ces deux simulateurs sont des simulateurs à base fixe, c'est-à-dire qu'aucun mouvement d'inertie n'est reproduit lors des accélérations, freinages ou virages. La principale différence entre les deux simulateurs au moment de notre choix se situait surtout dans la distance du conducteur à l'écran. Dans le petit simulateur, l'écran était placé à moins de 1 m de la tête du conducteur, alors que dans le grand simulateur, le conducteur se situait à plus de 2 m, avec une projection plus grande pour respecter le même degré d'angle visuel.

Afin de choisir le simulateur qui nous permettrait d'éviter au maximum les effets du mal du simulateur et d'évaluer de manière qualitative la préférence des conducteurs pour l'un ou l'autre, une pré-expérimentation sur dix volontaires âgés sains a été réalisée. Ils ont eu pour tâche de conduire dans deux situations différentes (situation rurale sur route nationale et situation urbaine) de dix minutes chacune, dans chaque simulateur. Ce sont les mêmes logiciels qui ont été utilisés pour créer les scènes visuelles et les scénarii. La moitié des participants a commencé par le petit simulateur et l'autre moitié par le grand. Tous les participants conduisaient d'abord dans la situation rurale ce qui leur permettait de prendre en main le simulateur. Puis un questionnaire a été proposé à chaque participant afin d'évaluer de manière qualitative son ressenti et sa préférence.

Sur les dix participants, trois ont ressenti des nausées qui les ont empêché de terminer l'essai. Les sept autres ont pu réaliser l'essai dans sa totalité. Quatre conducteurs ont clairement préféré conduire le grand simulateur du fait de sa meilleure reproduction du réel. Deux participants ont clairement préféré conduire le petit simulateur, du fait d'une meilleure « maniabilité » et un conducteur n'a pas eu de préférence pour l'un ou l'autre. D'après les différents commentaires reçus à l'issue des essais, nous avons décidé de réaliser l'expérimentation dans le grand simulateur en apportant quelques améliorations techniques :

La section suivante présente les caractéristiques techniques détaillées du simulateur retenu pour les expérimentations.

Caractéristiques du simulateur

L'expérimentation s'est donc déroulée sur le « grand » simulateur de conduite du

laboratoire MSIS (Modélisation, Simulation et Simulateurs de conduite) de l'INRETS situé à Bron qui est un simulateur à base fixe, dont les caractéristiques techniques sont décrites ci-après.

Aucun appareillage n'était porté par les participants. Ceux-ci n'avaient aucune autre tâche que conduire le simulateur et répondre aux requêtes de l'expérimentateur.

2.2.2. Les situations de conduite

Dans les quatre expériences que nous allons présenter dans cette section, le but méthodologique était de mettre au point des tâches écologiques qui permettaient chacune d'isoler une composante exécutive sélectionnée dans notre cadre théorique. Les situations de conduites choisies sont donc des situations simplifiées par rapport à un environnement réel de conduite, mais elles restent réalistes. Toutes les expérimentations de conduite ont été réalisées de telle sorte que tous les participants ont été placés dans les mêmes conditions (même trafic, même conditions de visibilité, mêmes scénarii). C'est en effet l'un des avantages majeurs des expérimentations sur simulateur, qui permettent des situations entièrement reproductibles et contrôlées.

Expérience 1 : Flexibilité

Dans cette expérience, le participant devait conduire sur une route nationale avec un trafic léger (présent uniquement pour donner un effet de réalisme). A intervalles déterminés, un panneau de signalisation apparaissait, soit du côté droit, soit du côté gauche de la route. La tâche consistait à dénommer la **forme** du panneau si celui-ci était à droite et dénommer sa **couleur dominante** s'il était du côté gauche de la route. Le participant était équipé d'un micro relié au PC gérant les données simulateur. Ceci permettait d'enregistrer les temps de réponses vocaux entre le moment d'apparition du panneau (enregistré dans le fichier de données du simulateur) et la réponse vocale. Le panneau restait apparent jusqu'à la réponse du sujet. Quatre formes de panneaux ont été utilisées : carré, rectangle, rond et triangle ; et quatre couleurs : rouge, vert, bleu et marron. Tous les panneaux étaient des panneaux réels du Code de la Route (cf. annexe 5 pour la liste des panneaux utilisés). Nous avons vérifié au préalable que tous les participants distinguaient bien les quatre formes et les quatre couleurs proposées. Un nouveau panneau n'apparaissait jamais avant que le panneau précédent n'ait disparu du champ de vision du conducteur, et chaque panneau apparaissait à un point précis situé à 200 m du conducteur. La résolution utilisée pour la projection nous a conduit à présenter des panneaux agrandis par rapport à leur taille réelle, car ils n'étaient pas suffisamment visibles. La taille des panneaux a donc été multipliée par 1,5. La Figure 5 représente une capture d'écran du simulateur au moment de l'apparition d'un panneau à droite.



Figure 5. Ecran du simulateur lors de la situation de flexibilité : apparition d'un panneau à droite

L'expérience a été séparée en deux parties. Dans la première partie (Figure 6), les panneaux étaient toujours placés du même côté de la route. Chaque forme et chaque couleur était représentée par quatre panneaux différents, et il y avait également trois panneaux d'essais, ce qui représentait donc 19 panneaux placés du côté droit (3 essais + 16 panneaux cibles) suivis de 19 panneaux placés du côté gauche (3 essais + 16 panneaux cibles). Les panneaux étaient espacés de 200 à 500 m (8 panneaux à 200 m, 8 à 300 m, 8 à 400 m et 8 panneaux à 500 m, placés de manière aléatoire), ce qui fait une distance totale de 13.8 km.

Dans la seconde partie (Figure 6), constituée de 36 panneaux (4 essais et 32 panneaux cibles), il y avait alternativement un panneau à droite et un panneau à gauche. De même, les panneaux pouvaient être espacés de 200 à 500 m (circuit de 10.9 km). C'est dans cette partie qu'il y a une demande systématique en flexibilité attentionnelle. Le coût du shift mental a été évalué en calculant la différence entre la performance au troisième bloc et la moyenne des performances aux deux premiers blocs. Les participants devaient respecter la limitation de vitesse imposée par le code de la route (90 km/h) et cette règle leur était rappelée avant le départ. Nous avons enregistré la vitesse du véhicule (un enregistrement par seconde) afin d'évaluer la vitesse moyenne sur l'ensemble du parcours.

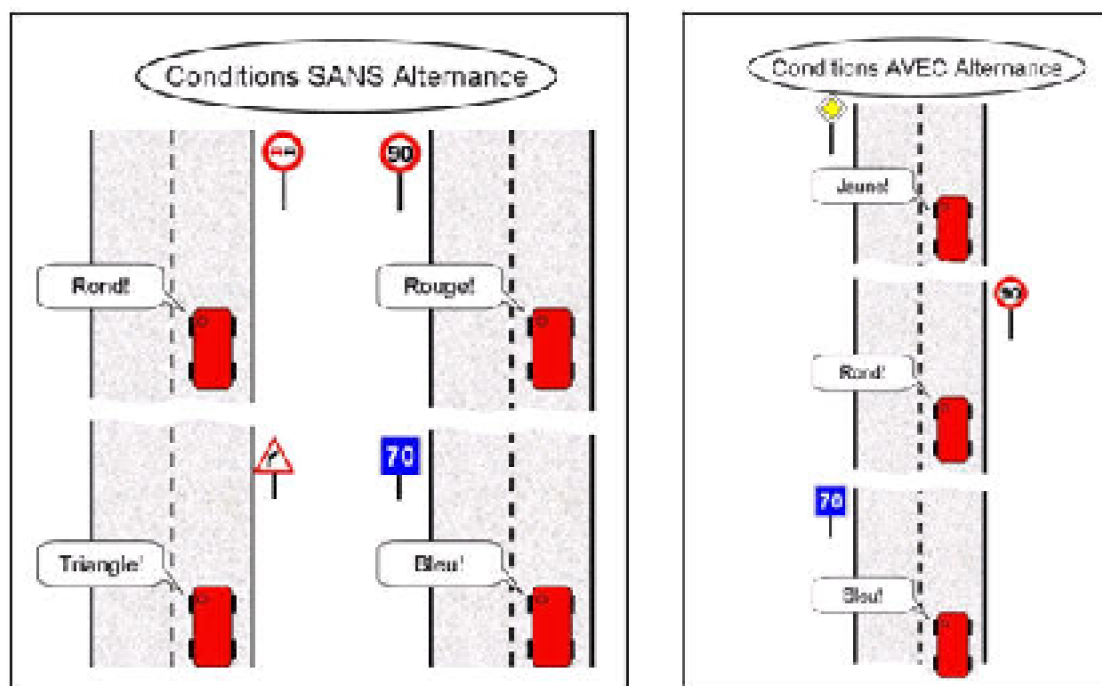


Figure 6. Illustration des situations de conduite avec et sans flexibilité.

Expérience 2 : Mise à jour

Dans cette seconde situation de conduite, le participant était au volant du simulateur, et devait conduire sur une route nationale avec un trafic léger (présent uniquement pour donner un effet de réalisme). Des panneaux de signalisation routière (indication, interdiction...) étaient placés sur le côté droit de la route. A la fin de chaque série de panneaux, on demandait au participant de rappeler à voix haute les trois derniers panneaux vus (rappel libre) et de dire quelles sont les conditions de circulation (rappel indicé, l'expérimentateur pose des questions concernant les conditions de circulation, exemple : *A-t-on le droit de doubler ?*). Neuf séries de panneaux étaient présentées successivement. Le rappel était effectué en temps réel entre deux séries, et le participant continuait à conduire pendant cette phase de rappel libre et indicé. Les séries étaient de tailles différentes afin que le participant ne puisse pas prévoir à l'avance quels étaient les trois derniers panneaux et qu'il doive mettre en œuvre une stratégie de mise à jour du stock de panneaux préservés en mémoire de travail. Il y avait donc trois séries de quatre panneaux, trois séries de six panneaux et trois séries de huit panneaux, disposées aléatoirement. Le trajet avait une longueur totale de 24 km, séparée en neuf « tronçons », trois de 2.8 km (huit panneaux), trois de 2.1 km (six panneaux) et trois de 1.8 km (quatre panneaux). L'expérience était précédée de deux séries d'essais afin de vérifier que le participant avait bien compris la consigne. On recommençait l'essai tant que le participant effectuait des erreurs. Nous avons également vérifié que chaque participant connaissait l'ensemble des panneaux que nous leur présentions par la suite. Les participants devaient respecter les limitations de vitesse imposées par le code de la route (90 km/h) et cette règle leur était rappelée avant le départ. Nous avons enregistré la vitesse du véhicule (un enregistrement par seconde) afin d'évaluer la vitesse moyenne sur l'ensemble du

parcours.

Expérience 3 : Inhibition

Cette situation expérimentale est inspirée d'une étude présentée par Rizzo *et al.* . Dans cette expérience, le participant avait pour tâche de conduire dans le simulateur sur une route nationale avec un trafic faible et des conditions de circulation simples. La route était cependant ponctuée d'intersections avec un passage à niveaux (Figure 8), munis d'une barrière qui, soit restait ouverte, soit se fermait au dernier moment. Chaque intersection était précédée d'un signal indiquant si le passage était possible (« Go » écrit en vert en bas de l'écran), ou impossible (« Stop » écrit en rouge en bas de l'écran). Ce signal apparaissait lorsque le conducteur se trouvait précisément à 100 m de la barrière. Puis à 50m, la barrière initiait son mouvement en fonction du signal apparu. Dans 80% des essais, le signal était en accord avec la position de la barrière, et dans 20% des essais, le signal était en contradiction avec la position de la barrière (« Go » pour une barrière qui se ferme, et « Stop » pour une barrière qui reste ouverte). Le participant devait dans ce cas inhiber l'information donnée par le signal et ne tenir compte que de l'information donnée par la barrière. On demande en effet au participant de conduire le plus rapidement possible, sans renverser les barrières fermées et sans s'arrêter inutilement à une barrière ouverte, ce qui donnait des pénalités. Chaque participant traversait 54 barrières. Les 4 premières barrières étaient des essais et montraient les 4 situations possibles au participant :

Après ces 4 essais, si le sujet avait compris la consigne, il était invité à passer à la phase expérimentale proprement dite, qui comportait 50 barrières : 25 sont restées ouvertes, parmi lesquelles 20 ont été précédées d'un signal **GO** et 5 ont été précédées d'un signal **S top** ; 25 barrières se sont fermées, parmi lesquelles 20 ont été précédées d'un signal **S top** et 5 ont été précédées d'un signal **GO**. Par ailleurs, une distance d'au moins 300 m entre la barrière et le signal suivant était respectée afin d'éviter de rapprocher trop les barrières et de faire intervenir une composante de mise à jour qui pourrait interférer notamment chez les patients. La figure suivante présente les différentes possibilités à l'arrivée aux barrières (Figure 7).

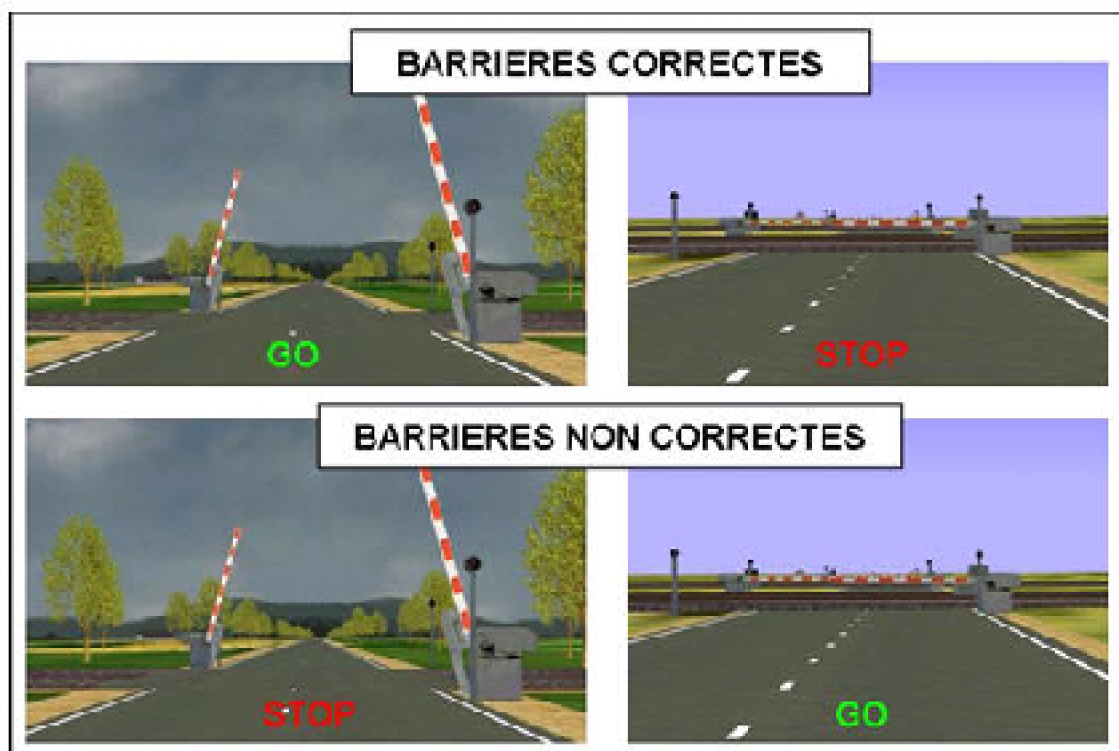


Figure 7. Captures d'écran du simulateur dans les quatre conditions possibles.

Cette expérience étant particulièrement longue à réaliser, elle a été découpée en 2 parties (les 4 essais et 20 premières barrières, puis 30 barrières suivantes) séparées par une pause d'au moins 5 minutes, pendant laquelle le participant effectuait un test de la batterie neuropsychologique. De même que pour les expériences présentées plus haut, la vitesse du véhicule était enregistrée (un enregistrement par seconde), mais cette fois, aucune limitation de vitesse n'était imposée au participant. La consigne était au contraire de conduire le plus rapidement possible. L'expérience leur était présentée comme s'il s'agissait d'une course, sinon aucune pression temporelle ne leur demandait de prendre une décision rapide.



Figure 8. Ecran du simulateur en situation d'inhibition : barrière ouverte avec message « Stop ».

Expérience 4 : situation de Tourne-à-gauche

Dans cette dernière situation expérimentale, aucune composante exécutive particulière n'a été isolée. Le principe était plutôt opposé, c'est-à-dire que le conducteur était dans ce cas en situation de conduite réaliste. En effet, cette situation de conduite en milieu urbain ne requérait du conducteur que le suivi des directions données par l'expérimentateur. Cette situation de tourne-à-gauche en ville devrait nous permettre d'observer l'implication du fonctionnement exécutif dans son intégralité et de manière écologique. Le trajet parcouru par le conducteur était identique pour chaque participant. Il était composé d'un ensemble de 15 intersections au total, dont 10 étaient des tourne-à-gauche, pour un trajet total dans la ville de 10,3 km. Les autres intersections ont permis d'éviter d'effectuer une boucle fermée (voir annexe 6 pour un plan du trajet). Toutes les intersections étaient semi protégées, c'est-à-dire, qu'il y avait une voie spécifique pour tourner à gauche, mais que le feu était non exclusif, le conducteur devait donc couper le flux de véhicules arrivant en sens inverse. Plusieurs variables ont été manipulées :

Le plan expérimental complet proposait donc 2^3 conditions expérimentales (soit huit conditions au total). Notre expérimentation n'a pas exploité la combinaison complète de ces huit conditions expérimentales. En effet, certaines combinaisons n'étaient pas pertinentes ou pas réalisables dans des conditions réalistes de circulation. Par exemple, la combinaison « Présence d'un véhicule devant + flot dense de véhicule en sens inverse + feu vert » n'était que très peu probable, car si le flot était dense et qu'un véhicule était devant, le feu avait toutes les chances de repasser rouge avant le passage du conducteur. Finalement, cinq conditions expérimentales ont été retenues, chacune représentée par deux carrefours dans le circuit, soit **dix** intersections au total :

Des piétons mobiles étaient également présents dans la ville virtuelle et traversaient la chaussée sur laquelle le conducteur arrivait en tournant à gauche. En effet dans une intersection à feux tricolores, les piétons sont autorisés à traverser la chaussée sur laquelle arrivent des conducteurs venant d'une route perpendiculaire. Deux piétons traversaient donc la route à l'arrivée du conducteur.

La consigne donnée au conducteur dans cette expérience était de conduire de façon naturelle dans cette ville virtuelle et de suivre les indications de direction données par l'expérimentateur au fur et à mesure du trajet. On demandait au participant de respecter la limitation de vitesse en ville (50 km/h) et de faire attention à tous les événements qui pourraient survenir pendant son trajet. Grâce à l'enregistrement vidéo en quadravision (quatre caméras filment le comportement du conducteur pendant toute la durée du trajet), les stratégies visuelles du conducteur ont également été évaluées, notamment les vérifications dans les rétroviseurs au moment de changer de voie de circulation, les vérifications des feux tricolores et l'observation du trafic en sens inverse. Grâce à une grille d'observation, le comportement du conducteur a été codé en fonction de plusieurs paramètres :

La variable retenue pour mesurer la performance globale en situation de tourne-à-gauche est un score global de pénalités qui a été calculé pour chaque intersection. La somme de ces pénalités sur les dix intersections compose ce score de

pénalités. Pour chaque intersection, une pénalité était attribuée au conducteur s'il ne mettait pas son clignotant, s'il ne se vérifiait pas correctement dans son rétroviseur avant de se placer sur la file réservée ou s'il ne se plaçait pas correctement sur la file réservée ; de plus, dans six intersections sur dix, un véhicule était placé devant le conducteur, il tournait également à gauche, mais prenait un risque important en s'insérant dans le flot de véhicule arrivant en sens inverse. Si le participant suivait le véhicule de devant sans vérifier lui-même s'il pouvait passer, une pénalité lui était attribuée. Parmi les dix intersections, quatre avaient un cycle de feux tricolores court et le feu repassait au rouge avant que le participant n'ait eu le temps de passer l'intersection. Si le participant ne prenait pas en compte le changement de couleur du feu, et qu'il passait au rouge, une pénalité lui était attribuée. Enfin, à toutes les intersections, le conducteur devait tenir compte du flot de véhicules arrivant en sens inverse. Si l'insertion dans la file était trop dangereuse ou au contraire, si le participant pouvait s'insérer pour dégager la voie de circulation et qu'il ne le faisait pas, alors une pénalité lui était attribuée. En résumé, un score de pénalité de 0 (aucune erreur de conduite) à 43 était attribué à chaque conducteur.

2.2.3. Choix des variables de mesure

Le tableau suivant (Tableau 6) présente pour chaque expérience de conduite les variables quantitatives et qualitatives de mesure retenues pour mettre à l'épreuve nos hypothèses.

Tableau 6. Récapitulatif des variables dépendantes retenues pour chacune des expériences de conduite

Expérience	Variables Dépendantes
Expérience 1 : Flexibilité	
Condition 1 : sans alternance	Temps de réponse vocal (<i>TR-Flex-1</i> en ms)
	Nombre d'erreurs non corrigées (<i>ENC-Flex-1</i>)
	Vitesse moyenne du véhicule (<i>V-Flex-1</i> , en km/h)
Condition 2 : avec alternance	Temps de réponse vocal (<i>TR-Flex-2</i> en ms)
	Nombre d'erreurs non corrigées (<i>ENC-Flex-2</i>)
	Nombre d'erreurs persévératives (<i>EP-Flex-2</i>)
	Vitesse moyenne du véhicule (<i>V-Flex-2</i> , en km/h)
<i>FLEXIBILITE</i>	(<i>TR-Flex-2</i>) – (<i>TR-Flex-1</i>)
Expérience 2 : Mise à jour	Score en rappel libre (<i>RL-maj</i> , sur 27)
	Score en rappel indicé (<i>RI-maj</i> , sur 27)
	Vitesse moyenne du véhicule (<i>V-maj</i> , en km/h)
<i>MISE A JOUR</i>	[(<i>RL-maj</i>) + (<i>RI-maj</i>)] / 2
Expérience 3 : Inhibition	Temps de parcours global (<i>Tps-Inh- Glob</i> , en s)
	Vitesse moyenne sur l'ensemble du parcours (<i>V-Inh-Glob</i> , en km/h)
	Erreur barrière ouverte avec message Stop (<i>Stop-BO</i>)
	Erreur barrière fermée avec message Go (<i>Go-BF</i>)
	Erreur barrière ouverte avec message Go (<i>Go-BO</i>)
	Erreur barrière fermée avec message Stop (<i>Stop-BF</i>)
<i>INHIBITION</i>	(<i>Go-BF</i>) + (<i>Go-BO</i>)
Expérience 4 : TAG	Score de pénalités (<i>TAG</i> , max = 43)

2.3. Procédure

Pour l'ensemble des participants la procédure et l'ordre de passation des tests neuropsychologiques et des épreuves de conduite sur le simulateur a été strictement identique. Le déroulement du protocole expérimental se déroulait en trois parties distinctes, la première conditionnant la réalisation des deux autres. En effet, cette procédure a été mise au point afin de tenir compte des contraintes de la visite médicale qui conditionnait la suite de l'étude. Par ailleurs, compte tenu de la longueur du protocole, il a été fractionné en deux parties, réalisées sur deux journées espacées d'une semaine en moyenne, pour éviter l'apparition d'un phénomène de fatigue, notamment chez les participants âgés.

Lors de la première visite, le participant rencontrait le médecin généraliste pour effectuer la visite médicale d'inclusion. Si la visite médicale ne révélait pas de contre-indication à l'expérience, le participant réalisait un essai de conduite libre sur le simulateur afin de vérifier qu'il ne souffrait pas du mal du simulateur, ce qui pouvait

éventuellement arriver sans que le médecin ne puisse le détecter lors du bilan. Cet essai consistait à effectuer une prise en main afin d'appréhender les réactions du véhicule qui diffèrent sensiblement des réactions d'un véhicule normal. Cette prise en main n'était pas limitée en termes de temps, mais durait en général une dizaine de minutes lorsque tout se passait bien (c'est-à-dire lorsque le volontaire ne se sentait pas malade). Cet essai du simulateur consistait à conduire d'abord sur une autoroute avec une densité de trafic faible, pendant 5 km, puis, l'expérimentateur demandait au conducteur de prendre une sortie et le conducteur se retrouvait alors sur une route nationale avec différents types de carrefours à traverser (ronds-points, cédez-le-passage, stop...). A partir de cet essai, les deux autres rendez-vous sont pris.

La seconde visite était composée de deux expériences de conduite sur simulateur, l'expérience de mise à jour et l'expérience d'inhibition. De plus, la première moitié des tests neuropsychologiques étaient administrés. L'ordre de passation était le suivant :

- Arrivée du participant sur le lieu d'expérimentation : signature du formulaire de consentement libre, administration des questionnaires de renseignements généraux et de mobilité à des fins de caractérisation générales des échantillons et test de latéralité d'Edinburgh ; 1.
- Prise en main du simulateur avec une épreuve de conduite libre sur autoroute et route nationale ; 2.
- Réalisation de l'épreuve de mise à jour sur simulateur ; 3.
- Administration du test de Stroop ; 4.
- Administration du test des 6 éléments ; 5.
- Administration du TMT ; 6.
- Réalisation de la première moitié de l'épreuve d'évaluation de l'inhibition sur simulateur ; 7.
- Administration du Brixton ; 8.
- Administration du MMSE ; 9.
- Réalisation de la deuxième moitié de l'épreuve d'évaluation de l'inhibition sur simulateur. 10.

Cette séance durait environ deux heures, et le participant pouvait effectuer des pauses à tout moment entre deux tests. Une pause de dix minutes était imposée après chaque épreuve de conduite sur le simulateur.

Enfin, la troisième visite était également composée de deux épreuves de conduite sur le simulateur et du reste des tests neuropsychologiques :

- Administration de l'épreuve informatisée de N-back et du test des 5 Mots ; 1.
- Prise en main du simulateur avec une épreuve de conduite libre sur route nationale et traversée de village ; 2.
- Réalisation de l'expérience de flexibilité sur simulateur ; 3.
- Administration de la double tâche de Baddeley ; 4.

-
- | | |
|---|----|
| Administration de la tâche de fluence verbale ; | 5. |
| Administration du MCST ; | 6. |
| Réalisation de l'expérience de Tourne-à-gauche en situation urbaine ; | 7. |
| Administration du PMT. | 8. |

De la même manière que dans la première partie, le participant pouvait effectuer des pauses entre les tests et une pause de dix minutes était imposée après chaque épreuve de conduite sur simulateur.

3. Analyses Statistiques et exploitation des résultats

3.1. Analyses Statistiques

Toutes les analyses statistiques réalisées dans le cadre de ce travail de thèse ont été effectuées avec le logiciel de traitement statistique *SPSS-15*®. Pour les analyses de variance (ANOVA), c'est le Modèle Linéaire Général (GLM) qui a été utilisé. Pour les comparaisons de moyennes à deux facteurs, nous avons utilisé le test *t* de Student lorsque les données suivaient une loi Normale et le test non paramétrique *U* de Mann-Whitney lorsque les données ne suivaient pas la loi Normale, ou que l'échantillon comportait un petit nombre de données. Les tests statistiques d'adéquation à la *Loi Normale* ont été réalisés avec la statique de *Shapiro-Wilk*.

Notre plan expérimental était constitué de variables indépendantes intra-sujets à mesures répétées, chaque participant passait en effet l'ensemble des modalités de chaque variable. Par ailleurs, nous avons calculé à partir des risques de première espèce (α) et de seconde espèce (β , risque de ne pas observer un effet existant), la puissance, ainsi que la taille des effets. Nous avons considéré comme acceptable un risque α de 0.1 à 0.2 (c'est-à-dire une puissance de 0.8 à 0.9). Toutes les études montrant une différence significative au risque $\alpha = 0.05$, avec un risque $\beta = 0.1$ comportaient des échantillons compris entre 25 et 50 participants. Le nombre de participants proposé ici semble ainsi être un bon compromis entre la variabilité attendue des réponses et la lourdeur de notre expérimentation. Nous avons été limités dans l'inclusion des patients (peu de patients volontaires du fait de la crainte de l'évaluation). Afin de compenser, en termes de puissance statistique, ce faible nombre de participants nous avons augmenté la taille du groupe de témoins comparé. La puissance statistique que l'on calcule généralement dépend de la taille (*N*) des échantillons à comparer. Lorsque les échantillons sont de tailles différentes (N_1 , N_2 et N_3), Howell (1998, p.254) préconise d'utiliser la moyenne harmonique (N_h) de N_1 , N_2 et N_3 : $N_h = \frac{3}{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} + \frac{1}{N_3}}$. Dans notre cas, $N_h = 17.88$. En d'autres termes, notre étude effectuée avec 10 patients, 29 témoins âgés et 30 témoins jeunes, a la même puissance statistique que si elle avait été réalisée avec 3 échantillons de taille identique de 17.88, soit 18 participants, ce qui nous semble une taille d'effet raisonnable dans une étude comportementale. Les résultats seront déclarés significatifs au seuil de risque α de 5% ($p < 0.05$). Les tendances seront également mentionnées ($0.05 < p < 0.07$).

3.2. Exploitation des résultats

3.2.1. Taux d'exclusion des participants

Comme cela a été décrit dans la section 1.1 du chapitre 1, l'ensemble des participants qui se sont portés volontaires et qui ont été vus en visite médicale n'ont pas tous participé à l'étude dans son intégralité. En effet, certains ont été exclus à la visite médicale car ils répondaient à l'un des critères d'exclusion, d'autres n'ont pas réussi à prendre en main le simulateur, d'autres enfin ont ressenti la mal du simulateur et n'ont pas pu continuer. Parmi le groupe de témoins jeunes, il y a eu très peu de volontaires exclus (33 volontaires proposés pour 30 participants au final). En ce qui concerne les témoins âgés, 54 personnes de plus de 65 ans se sont portées volontaires et sont venues à la première visite à l'INRETS, et 29 ont pu terminer l'étude. C'est dans le groupe des patients avec la maladie d'Alzheimer que la « perte » a été la plus importante, avec 22 patients volontaires pour seulement 10 patients retenus au total.

3.2.2. Données démographiques des participants retenus

Pour chaque participant l'expérimentation débutait par un questionnaire de caractérisation des participants. Le tableau suivant (Tableau 7) présente les caractéristiques moyennes des participants en fonction du groupe auquel ils appartenaient (témoins jeunes, témoins âgés, patients avec maladie d'Alzheimer), en termes d'âge, de niveau d'étude⁵ et de données concernant la sécurité routière.

Tableau 7. Caractéristiques démographiques des participants répartis par groupe

⁵ Une analyse de variance à un facteur (VI : statut du participant, VD : nombre d'années d'étude) a été réalisée : $F(2, 66) = 3.804$, $p < 0.05$. Le nombre d'années d'étude diffère donc entre les trois groupes, cependant un test *post-hoc* de Scheffé indique que les témoins âgés ne diffèrent pas des jeunes ($p = 0.105$) et que les patients ne diffèrent pas des témoins âgés ($p = 0.716$). Ces groupes peuvent donc être comparés deux à deux.

Groupes	Genre	ADL ¹ moyen (écart-type)	Âge le jour de l'expérience	niveau d'étude ² Moyenne	Latéralité ³ Moyenne (écart-type)	Années (écart-type) permises	kilométrage annuel	nombre d'accidents ⁴
Témoins jeunes	n=17 F=13 H	0.00 (0.00)	24.48 (4.80)	13.37 (2.16)	D : n=29 N.L. : n=1	5.0 (4.5)	3000-5000 : n=8 5000-7000 : n=10 7000-20000 : n=9 >20000 : n=3	0 acc. : n=25 1 acc. : n=3 2 acc. : n=2
Témoins âgés	n=12 F=7 H	0.00 (0.00)	70.83 (2.95)	11.76 (2.89)	D : n=24 G : n=1 N.L. : n=4	45.7 (8.0)	3000-5000 : n=3 5000-7000 : n=6 7000-20000 : n=18 >20000 : n=2	0 acc. : n=26 1 acc. : n=3 2 acc. : n=0
Patients	n=10 F 7 H	102.20 (1.39)	74.86 (5.3)	10.90 (4.36)	D : n=10	52.6 (6.9)	3000-5000 : n=1 5000-7000 : n=6 7000-20000 : n=1 >20000 : n=2	0 acc. : n=6 1 acc. : n=3 2 acc. : n=1

1 – IADL : Instrumental Activities of Daily Living (Echelle de Lawton)

2 – Niveaux d'étude : nombre d'années d'étude à partir de la première inscription en cycle primaire.

3 – Latéralité : D = Droitier ; G = Gaucher, NL = non latéralisé.

4 – Nombre d'accidents : Nombre d'accidents dans les 5 dernières années, en tant que conducteur ; comprend les accidents avec victimes et les accidents avec dégâts matériels seuls.

Chapitre 2. Résultats : Vieillesse normale

Ce chapitre présente les résultats obtenus par deux groupes de participants, jeunes et âgés. En effet, le vieillissement normal du fonctionnement exécutif a été évalué en comparant les performances des participants jeunes à celles des participants âgés à la fois pour les tests de la batterie du Grefex et pour les situations de conduite développées.

1. Fonctionnement cognitif global

Avant de présenter les résultats spécifiques à chacune des trois composantes exécutives choisies, cette section présente les résultats obtenus par les participants aux tests

cognitifs globaux ainsi qu'aux tests de la batterie du Grefex qui n'ont pas pu être reliés à une seule des trois composantes, en raison de leur niveau de complexité.

Afin de vérifier que la dégradation des performances ne puisse pas être expliquée par une dégradation globale du niveau cognitif, nous avons vérifié que les scores de MMSE et que le niveau de mémoire des deux échantillons de participants étaient comparables, ce qui est effectivement le cas pour le MMSE ($MMSE, U = 373.5, p > 0.05$) et pour les quatre scores au test des cinq mots. De plus, d'après des normes récemment publiées pour le test des cinq mots, les participants âgés ne présentaient aucun trouble mnésique spécifique.

Le tableau suivant (Tableau 8) présente l'ensemble des résultats obtenus par les deux échantillons de participants aux tests de la batterie d'évaluation de fonctions exécutives, en fonction des variables de mesures retenues.

Tableau 8. Résultats aux tests neuropsychologiques complexes dans le vieillissement normal.

		<i>T-Âgés</i> (<i>n=29</i>) moyenne (<i>écart-type</i>)	<i>T-Jeunes</i> (<i>n=30</i>) moyenne (<i>écart-type</i>)	<i>p</i>
Test des Six Eléments				
	Six_El_Rang (max=6)	5.79 (0.49)	5.9 (0.30)	n.s.
Trail Making Test				
	TR-A (en s)	37.28 (11.44)	24.57 (6.81)	< 0.001
	ENC-A	0.03 (0.19)	0.0 (0.0)	n.s.
	TR-B (en s)	74.62 (23.90)	52.23 (11.95)	< 0.001
	ENC-B	0.21 (0.56)	0.13 (0.43)	n.s.
	EP-B	0.03 (0.19)	0.03 (0.18)	n.s.
	TR-BminA	37.34 (20.24)	27.67 (10.13)	< 0.05
Test de Brixton				
	Brix_ENC	7 (2.98)	4.33 (2.41)	< 0.001
	Brix_AC	0.37 (0.90)	0.06 (0.25)	n.s.
Double tâche de Baddeley				
	Em_Num	6.27 (0.92)	6.7 (0.70)	cf. Anova
	Em_Sim	10.76 (2.61)	11.93 (3.06)	
	M_Sim	159.14 (24.70)	179.5 (27.44)	
	Em_Dou	9.14 (2.38)	10.1 (2.78)	
	M_Dou	143.34 (23.91)	168.23 (23.72)	
Test des Fluences verbales				
	F_Form	24.65 (7.03)	25.27 (5.01)	n.s.
	E_Form	0.75 (1.18)	0.27 (0.58)	n.s.
	F_Sém	35.37 (8.25)	38.5 (8.01)	n.s.
	E_Sém	0.41 (0.73)	0.1 (0.30)	n.s.
	E_Sfor	0 (0)	0 (0)	n.s.
Wisconsin Card Sorting Test Modifié				
	WCST_Cat (max=6)	5.96 (0.18)	6 (0)	n.s.
	WCST_ET	2.06 (1.66)	0.83 (1.2)	< 0.01
	WCST_EP	0.24 (0.51)	0 (0)	< 0.01
	WCST_AC	0.55 (0.57)	0.07 (0.25)	n.s.
Test des 5 Mots				
	RI_SL (max=5)	4.75 (0.63)	4.97 (0.18)	n.s.
	RI_SI (max=5)	5 (0)	5 (0)	n.s.
	RD_SL (max=5)	4.55 (0.63)	4.67 (0.66)	n.s.
	RD_SI (max=5)	4.93 (0.25)	4.87 (0.43)	n.s.
Mini Mental State Evaluation				
	Score (max=30)	29.65 (0.72)	29.87 (0.43)	n.s.

--	--	--	--	--

Les participants âgés ne se différencient pas significativement des participants jeunes sur leur performance au test des 6 éléments. Le score de rang des âgés ($M = 5.79$, $SD = 0.49$) est très proche de celui de jeunes ($M = 5.9$, $SD = 0.3$). Les deux échantillons de participants ont bien réussi ce test de planification des activités.

Un test t de Student montre que les temps moyens de réalisation de la partie A du TMT sont significativement plus longs ($TR-A : t(57) = 5.206$, $p < 0.001$) chez les participants âgés que chez les participants jeunes et il en est de même en ce qui concerne la partie B, les âgés sont significativement plus lents que les participants jeunes ($TR-B : t(57) = 4.573$, $p < 0.001$). Afin d'éliminer la composante de vitesse de réalisation qui intervient à la fois dans les parties A et B, nous avons calculé une nouvelle variable de mesure qui correspond à la différence entre les TR à la condition B et les TR à la condition A. L'analyse de comparaison de moyennes sur cette nouvelle variable indique que les performances des participants âgés sont toujours significativement dégradées par rapport à celles des jeunes ($TR-BminA : t(57) = 2.331$, $p < 0.05$). Les résultats au Trail Making Test indiquent donc que les adultes âgés présentent une augmentation des temps de réalisation. En effet, l'analyse non paramétrique des erreurs ne révèle pas de différences significatives du nombre d'erreurs entre jeunes et âgés dans la partie A ($ENC-A$, $U(57) = 420.1$, $p > 0.05$), dans la partie B ($ENC-B$, $U(57) = 417.5$, $p > 0.05$), ainsi que pour les erreurs persévératives de la partie B ($EP-B$, $U(57) = 434.5$, $p > 0.05$).

Les participants âgés ont réalisé significativement plus d'erreurs que les participants jeunes au test de Brixton ($Brix_Enc$, $U = 201$, $p < 0.001$), mais ils ne font pas significativement plus d'abandons prématurés du critère, variable qui permet de mesurer la capacité de maintien d'une information en mémoire de travail. Les âgés présentent donc seulement un léger déficit de réalisation de cette tâche complexe de déduction de règles.

En condition simple comme en condition de double tâche, les participants âgés ne se différencient pas des participants jeunes sur le nombre de séquences correctement rappelées ($Em-Sim$ et $Em-Dou$). En revanche, afin d'étudier l'évolution des performances à la tâche motrice au cours du vieillissement, une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées a été réalisée avec un facteur inter-sujet : statut du participant (jeune / âgé) et un facteur intra-sujet : la condition de réalisation (simple / double). Cette analyse indique d'une part un effet simple de la condition [$F(1, 57) = 49.45$, $p < 0.001$] et un effet simple du statut [$F(1, 57) = 13.22$, $p < 0.001$], ce qui signifie que globalement, les participants ont significativement moins bien réussi la tâche en condition double et que les âgés ont été moins performants que les participants jeunes. En revanche, il n'y a pas d'effet d'interaction entre le statut et la condition [$F(1, 57) = 1.38$, $p > 0.1$], les âgés n'ont pas été particulièrement moins performants que les jeunes lorsque la tâche était plus complexe.

Au test des fluences verbales formelle et sémantique, les participants jeunes et âgés obtiennent des performances statistiquement semblables. Les âgés n'ont donc pas présenté de déficit particulier dans la réalisation de cette tâche. Les participants jeunes et âgés n'ont par ailleurs fait que très peu d'erreurs de retour à la fluence formelle ($E-Sfor$).

Quatre variables de mesures ont été retenues pour évaluer les performances des participants au WCST : le nombre de catégories réalisées, le nombre d'erreurs total, le nombre d'erreurs persévératives et le nombre d'abandons prématurés du critère.

Les performances des jeunes et des âgés ne diffèrent pas sur le nombre de catégories réalisées, mais les âgés ont effectué significativement plus d'erreurs au total que les jeunes (*WCST-ET*, $U = 233.5$, $p < 0.01$) et également plus d'erreurs persévératives (*WCST-EP*, $U = 345.0$, $p < 0.01$). Dans cette tâche complexe, les participants âgés ont donc des performances globalement plus faibles que les jeunes.

2. Flexibilité mentale

La flexibilité mentale a été évaluée d'une part à l'aide du *PMT*, présenté dans l'étude de Miyake *et al.* (2000) et d'autre part par la situation de conduite avec alternance entre deux tâches à réaliser.

2.1. La flexibilité en situation de laboratoire

Le tableau suivant (Tableau 9) présente les résultats obtenus par les 2 groupes de participants au *PMT*. Pour chaque groupe, c'est la moyenne (écart-type) qui a été représentée.

Tableau 9. Résultats au test de flexibilité mentale (*PMT*) dans le vieillissement normal.

	T-Âgés (n=29) moyenne (écart-type)	T-Jeunes (n=30) moyenne (écart-type)	p
Plus Minus Test			
TR-Add (en s)	48.59 (14.49)	45.3 (11.03)	n.s.
ENC-Add	0.24 (0.64)	0.10 (0.40)	n.s.
TR-Sou (en s)	61.55 (24.22)	67.77 (24.78)	n.s.
ENC-Sou	1.41 (5.65)	0.23 (0.93)	n.s.
TR-Alt (en s)	73.45 (21.4)	69.47 (20.69)	n.s.
ENC-Alt	0.69 (1.49)	0.50 (1.04)	n.s.
FLEXIBILITE 1	18.37 (12.38)	12.93 (9.61)	n.s. (0.06)

1 : FLEXIBILITE = Coût du shift (CS)

L'analyse de comparaison de moyenne sur les temps de réponse indique que les participants âgés ne sont pas significativement plus lents que les participants jeunes, quelle que soit la condition réalisée, sans flexibilité (*TR-Add* : $t(57) = 0.982$, $p > 0.05$; *TR-Sou*, $t(57) = 0.974$, $p > 0.05$), ou avec flexibilité (*TR-Alt* : $t(57) = 0.727$, $p > 0.05$). La variable retenue comme mesure de la flexibilité n'apparaît pas non plus significativement différente entre les participants jeunes et les participants âgés (*Flexibilité*, $t(57) = 1.891$, $p = 0.06$), cependant cette valeur de p indique qu'il y a une tendance en faveur d'une différence entre jeunes et âgés sur le coût du shift.

Enfin, l'analyse des taux d'erreurs ne révèle pas non plus de différences significatives entre jeunes et âgés dans la partie sans flexibilité (*ENC-Add*, $U(57) = 390.1$, $p > 0.05$; *ENC-Sou*, $U(57) = 387.5$, $p > 0.05$), ainsi que dans la partie avec flexibilité (*ENC-Alt*, $U(57) = 416.1$, $p > 0.05$).

L'évaluation de la flexibilité mentale par le PMT ne révèle donc pas de différences entre les participants âgés et les participants jeunes.

2.2. La flexibilité en situation de conduite

La composante de flexibilité en situation de conduite a été évaluée grâce à une tâche de conduite sur route nationale où le participant devait donner la forme ou la couleur d'un panneau apparaissant sur le bas côté. La tâche était divisée en deux conditions, une condition où tous les panneaux sont placés du même côté (condition sans flexibilité), et une condition où il y avait alternativement un panneau à droite et un panneau à gauche (condition avec flexibilité).

2.2.1. Statistiques descriptives

Le tableau suivant (Tableau 10) présente l'ensemble des données retenues pour les 2 groupes de participants, jeunes et âgés. Trois variables de mesures ont été retenues :

Tableau 10. Résultats à la situation de flexibilité mentale en conduite dans le vieillissement normal.

		<i>T-Âgés</i> (<i>n=29</i>) moyenne (<i>écart-type</i>)	<i>T-Jeunes</i> (<i>n=30</i>) moyenne (<i>écart-type</i>)	<i>p</i>
Condition 1 : Sans alternance				
	TR-Flex-1	1651.09 (716.01)	982.57 (342.07)	< 0.001
	ENC-Flex-1	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	n.s.
	V-Flex-1	104.99 (10.34)	108.42 (9.15)	n.s.
Condition 2 : Avec Alternance				
	TR□Flex□2	1942.92 (781.88)	1241.05 (301.75)	< 0.001
	ENC□Flex□2	0.31 (0.66)	0.00 (0.00)	n.s.
	EP□Flex□2	0.17 (0.38)	0.00 (0.00)	n.s.
	V□Flex□2	109.03 (12.34)	108.99 (9.59)	n.s.
	FLEXIBILITE ¹	291.81 (326.87)	258.48 (151.30)	n.s.

$$1 : \text{FLEXIBILITE} = (\text{TR-Flex-2}) - (\text{TR-Flex-1})$$

2.2.2. Effets sur les temps de réponse

Afin d'évaluer l'évolution de la flexibilité mentale dans le vieillissement normal sur la tâche de conduite, les temps de réponse ont été comparés entre jeunes et âgés. Un test *t* de Student montre que les temps moyens de réalisation de la condition sans alternance sont significativement plus longs (*TR-Flex-1* : $t(57) = 4.60$, $p < 0.001$) chez les participants âgés que chez les participants jeunes. Dans la condition avec alternance, les âgés sont

également significativement plus lents que les participants jeunes ($TR-Flex-2 : t(57) = 4.21, p < 0.001$). L'analyse de comparaison de moyennes sur la variable *Flexibilité* mesurée par la différence entre la condition avec flexibilité et sans flexibilité montre des résultats quelque peu surprenants. En effet, les âgés ont une augmentation de temps de réponses plus petite que les jeunes, cependant cette augmentation n'est pas significative. Les participants âgés et jeunes ont des performances similaires (*Flexibilité* : $t(57) = -0.542, p > 0.05$). Ce résultat indique que lorsque la variable de temps de réponse simple est contrôlée, il n'y a plus de différences entre participants jeunes et âgés à la tâche de flexibilité en conduite. Les participants âgés ne présentent donc pas d'altération de la flexibilité mentale dans une telle tâche. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans l'évaluation neuropsychologique de la flexibilité.

2.2.3. Effets sur les scores et sur la vitesse du véhicule

En condition sans alternance, les participants jeunes comme les participants âgés ne font aucune erreur. En condition avec alternance, le groupe de jeunes ne fait aucune erreur, les âgés en ont réalisé en moyenne 0.31 et 0.17 pour ce qui est des erreurs persévératives. Au vu de ce très petit nombre d'erreurs, aucune analyse statistique n'a été réalisée. Nous retiendrons simplement que les participants font extrêmement peu d'erreurs et réussissent bien cette tâche. Par ailleurs, en ce qui concerne la vitesse, la consigne donnée aux participants au début de cette épreuve était de respecter la limitation légale de 90 km/h sur cette route de type route nationale. Cependant, nous avons observé des écarts par rapport à cette règle et il nous a paru pertinent d'étudier comment les participants ont régulé leur vitesse en fonction de la difficulté de la tâche. Nous observons en effet que ni les participants jeunes ni les participants âgés n'ont respecté cette limitation de vitesse et conduisent nettement plus rapidement que ce soit en condition sans ou avec alternance. Cependant, nous n'avons pas observé de différence significative entre les jeunes et les âgés sur la vitesse moyenne du véhicule, que ce soit en condition sans ou en condition avec alternance.

Les deux mesures de flexibilité mentale, en situation de laboratoire et en situation de conduite sont donc concordantes. Les participants âgés ne semblent pas être atteints au niveau de la composante de flexibilité mentale. De plus, la corrélation entre la mesure de flexibilité en situation de laboratoire et en situation de conduite est significative pour l'ensemble des participants ($r = 0.351, p < 0.05$).

3. Mise à jour

La composante de mise à jour et de traitement des informations en mémoire de travail a été évaluée d'une part en situation de laboratoire, grâce à un test informatisé, la tâche de n-back (mise au point pour les besoins de l'étude) et d'autre part à l'aide d'une situation de conduite simple avec demande de mémorisation de panneaux et de mise à jour des informations stockées.

3.1. La mise à jour en situation de laboratoire

Pour l'évaluation de la composante de mise à jour des informations en mémoire de travail, c'est le test de n-back (n=0, n=1 et n=2) qui a été choisi. Les résultats obtenus par les deux échantillons de participants sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau 11).

Tableau 11. Résultats au test de mise à jour (N-Back) dans le vieillissement normal.

		<i>T-Âgés (n=29) moyenne (écart-type)</i>	<i>T-Jeunes (n=30) moyenne (écart-type)</i>	<i>p</i>
n = 0				
	TR-Maj-0	385.31 (60.39)	368.22 (47.26)	n.s.
	ENC-Maj-0	0.07 (0.26)	0.07 (0.25)	n.s.
n = 1				
	TR-Maj-1	434.61 (87.81)	403.40 (79.42)	n.s.
	ENC-Maj-1	0.10 (0.31)	0.07 (0.25)	n.s.
n = 2				
	TR-Maj-2	656.37 (171.27)	552.03 (116.49)	< 0.01
	ENC-Maj2	2.69 (2.38)	0.90 (1.09)	< 0.01
	MISE A JOUR ¹	271.05 (154.76)	183.80 (97.39)	< 0.05

$$1 : \text{MISE A JOUR} = (\text{TR-Maj-2}) - (\text{TR-Maj-0})$$

Les effets du vieillissement sur les capacités de mise à jour des informations en mémoire de travail ont été évalués par comparaison des performances entre les participants jeunes et les participants âgés. Il n'y a pas de différence significative en termes de temps de réponses dans les conditions à n = 0 et n = 1 (*TR-maj-0*, $t(57) = 1.21$, $p > 0.05$; *TR-maj-1*, $t(57) = 1.43$, $p > 0.05$). En d'autres termes, lorsque la tâche nécessite peu de mise à jour des informations, les participants âgés ont des performances comparables à celles des participants jeunes. D'ailleurs, la condition n = 0 a été retenue comme mesure de la vitesse d'exécution. En effet, dans cette tâche aucune demande de mise à jour n'était impliqué, il s'agit simplement de répondre le plus rapidement possible à l'apparition d'un stimulus. Les participants âgés ne sont donc pas ralentis par rapport aux jeunes.

En revanche, à n = 2, où la demande en mise à jour des informations est importante, les différences entre jeunes et âgés sont statistiquement significatives (*TR-maj-2*, $t(57) = 2.74$, $p < 0.01$). Les âgés sont plus lents pour répondre aux stimuli cibles que les jeunes. De plus, la variable retenue comme mesure de la mise à jour est également détériorée chez les participants âgés par rapport aux jeunes (*Mise à Jour*, $t(57) = 2.58$, $p < 0.05$), donc si l'on contrôle la vitesse d'exécution, les participants âgés sont toujours significativement moins bons que les participants jeunes.

Par ailleurs, l'analyse du nombre d'erreurs indique également une différence significative entre jeunes et âgés dans la condition n = 2 (*ENC-maj-2*, $U(57) = 248.5$, $p < 0.01$), les participants âgés ont effectué plus d'erreurs que les jeunes. En conditions n = 0 et n = 1, les performances sont semblable chez les jeunes et les âgés.

3.2. La mise à jour en situation de conduite

La composante de mise à jour des informations en mémoire de travail a été évaluée grâce à une situation de conduite où la tâche du participant était de rappeler les 3 derniers panneaux routiers d'une série de panneaux de longueur inconnue du participant. Les variables retenues sont le score de rappel libre, le score de rappel indicé (des questions sur les conditions de circulation sont posées au conducteur) ainsi que la vitesse moyenne du véhicule. Le tableau suivant (Tableau 12) présente l'ensemble des résultats obtenus par les deux groupes témoins pour chacune des variables de mesure retenues.

En rappel libre, les témoins âgés ont rappelé significativement moins de mots que les jeunes (*RL-Maj*, $t(57) = -7.117$, $p < 0.001$). En revanche, il n'y a pas de différences significatives en rappel indicé (*RI-Maj*, $t(57) = 0.281$, $p > 0.1$). Les âgés présentent donc une légère altération des capacités de mise à jour des informations en mémoire de travail, mais lorsque le rappel est indicé par l'expérimentateur, les participants âgés obtiennent des performances semblables à celles des jeunes. La variable de mise à jour retenue pour les analyses ultérieures a consisté à faire la moyenne entre le rappel libre et le rappel indicé. La comparaison de moyennes réalisée sur cette variable indique que les participants âgés présentent des performances significativement moins bonnes que les jeunes (*MAJ*, $t(57) = 6.71$, $p < 0.01$). Par ailleurs, les âgés n'ont pas roulé significativement moins vite que les jeunes dans cette situation de conduite (*V-Maj*, $t(57) = -0.820$, $p > 0.05$).

Tableau 12. Résultats à la situation de mise à jour en conduite dans le vieillissement normal.

	<i>T-Âgés</i> (<i>n=29</i>) moyenne (écart-type)	<i>T-Jeunes</i> (<i>n=30</i>) moyenne (écart-type)	<i>p</i>
RL-Maj (score max = 27)	20.59 (2.39)	24.53 (1.83)	< 0.001
RI-Maj (score max = 27)	21.97 (2.51)	24.27 (1.51)	n.s.
V-maj (en Km/h)	100.80 (12.39)	103.08 (8.64)	n.s.
MISE A JOUR	21.27 (2.15)	24.4 (1.31)	< 0.01

$$1 : \text{MISE A JOUR} = [(RL-Maj) + (RI-Maj)] / 2$$

Les deux mesures de la mise à jour, d'une part en situation de laboratoire et d'autre part en situation de conduite sont donc concordantes, la composante exécutive de mise à jour des informations en mémoire de travail est atteinte dans le vieillissement normal. De plus la corrélation entre la mesure en situation de laboratoire et celle en situation de conduite est significative ($r = -0.378$, $p < 0.001$). La corrélation négative indique que plus le temps de réponse en n-back est long, moins le score de rappel en situation de conduite est élevé.

4. Inhibition

Enfin, la troisième composante, composante d'inhibition a été évaluée d'une part grâce au test de Stroop de la batterie du Grefex, et d'autre part à l'aide d'une situation de conduite demandant l'inhibition volontaire d'un message non pertinent.

4.1. L'inhibition en situation de laboratoire

Le tableau suivant (Tableau 13) présente les résultats obtenus par les participants jeunes et âgés au test de Stroop.

Tableau 13. Résultats au test d'inhibition (Stroop) dans le vieillissement normal.

		T-Âgés (n=29) moyenne (écart-type)	T-Jeunes (n=30) moyenne (écart-type)	p
Dénomination				
	TR-Dén	58.86 (8.54)	54.60 (8.43)	n.s
	EC-Dén	0.17 (0.46)	0.30 (0.70)	n.s
	ENC-Dén	0.10 (0.31)	0.00 (0.00)	n.s
Lecture				
	TR-Lec	41.24 (6.91)	38.87 (5.61)	n.s
	EC-Lec	0.00 (0.00)	0.07 (0.25)	n.s
	ENC-Lec	0.00 (0.00)	0.03 (0.18)	n.s
Interférence				
	TR-Inter	112.59 (24.95)	87.60 (20.40)	< 0.001
	EC-Inter	0.93 (1.41)	1.27 (1.66)	n.s
	ENC-Inter	0.48 (0.87)	0.23 (0.43)	n.s
	INHIBITION ¹	53.72 (22.39)	33.00 (15.38)	< 0.001

$$1 : \text{INHIBITION} = (\text{TR-Inter}) - (\text{TR-Déno})$$

Les tests *t* de comparaison de moyennes montrent que seule la condition interférente du test de Stroop apparaît significativement différente entre les participants jeunes et âgés (*TR-Inter*, $t(57) = 4.21$, $p < 0.001$), mais pas dans les deux conditions simples (dénomination de couleur et lecture). L'analyse non paramétrique des erreurs ne montrent aucune différence significative entre les participants jeunes et âgés et ce, pour chacune des conditions. Par ailleurs, la variable d'inhibition montre également des différences significatives entre jeunes et âgés (*Inhibition*, $t(57) = 4.15$, $p < 0.001$). L'inhibition contrôlée est donc altérée dans le vieillissement normal mais se traduit simplement par un ralentissement des temps d'exécution.

4.2. L'inhibition en situation de conduite

La composante d'inhibition a été évaluée grâce à une situation de conduite où la tâche du participant était de conduire sur une route nationale ponctuée de barrières de passage à niveau. Les variables retenues sont les erreurs (arrêts aux barrières ouvertes et passages aux barrières fermées), ainsi que le temps de parcours global (exprimé en minutes), la vitesse moyenne sur l'ensemble du parcours, les temps et vitesses moyennes sur chaque partie.

Le Tableau 14 est un récapitulatif des données mesurées pour la tâche d'inhibition en situation de conduite pour les deux groupes de témoins. Cette situation où il fallait

conduire le plus rapidement possible et s'arrêter parfois brusquement a été la plus difficile à réaliser pour les participants, non pas en raisons des difficultés liées à la tâche mais en raison de la sensation de mal du simulateur qui pouvait être engendrée par les arrêts répétés. De ce fait, seuls 20 contrôles âgés (sur 29) et 29 contrôles jeunes (sur 30) ont terminé l'ensemble de la passation de cette tâche.

Tableau 14. Résultats à la situation d'inhibition en conduite dans le vieillissement normal.

		<i>T-Âgés</i> (<i>n</i> =20) <i>moyenne</i> (<i>écart-type</i>)	<i>T-Jeunes</i> (<i>n</i> =29) <i>moyenne</i> (<i>écart-type</i>)	<i>p</i>
	V-Inh-Glob (en km/h)	55.76 (4.11)	64.15 (5.16)	< 0.001
	Tps-Inh-Glob (en min)	20.06 (1.25)	18.10 (1.28)	< 0.001
	Erreurs			
	Stop-BO (max=5)	0.89 (1.08)	0.00 (0.00)	< 0.001
	Go-BF (max=5)	0.89 (1.26)	1.39 (1.32)	n.s.
	Stop-BF (max=20)	0.24 (0.57)	0.10 (0.40)	n.s.
	Go-BO (max=20)	0.03 (0.18)	0.00 (0.00)	n.s.
	INHIBITION ¹	1.79 (1.80)	1.39 (1.34)	n.s.

1 : INHIBITION = Stop-BO + Go-BF

Deux catégories d'erreurs ont été différenciées : les erreurs simples et les erreurs d'inhibition. Les erreurs simples consistaient à s'arrêter à une barrière ouverte signalée avec un message « Go » ou à passer à une barrière fermée signalée avec un message « Stop ». Les erreurs d'inhibition consistaient à s'arrêter à une barrière ouverte signalée avec un message « Stop » ou à passer à une barrière fermée signalée avec un message « Go ». L'analyse non paramétrique des erreurs révèle que les participants âgés ont des scores qui ne diffèrent pas significativement de ceux des participants jeunes en ce qui concerne les erreurs simples (*Stop-BF*, $U = 389.50$, $p > 0.05$; *Go-BO*, $U = 420.00$, $p > 0.05$). En revanche, en ce qui concerne les erreurs d'inhibition, les résultats diffèrent selon le type de barrière envisagé. En effet, les participants âgés ont des performances significativement moins bonnes que les participants jeunes pour la condition Stop-BO (*S-Stop-BO*, $U = 210.01$, $p < 0.001$), c'est-à-dire qu'ils se sont arrêtés à une barrière ouverte significativement plus souvent que les participants jeunes. En revanche, pour la condition Go-BF, les participants jeunes et âgés ont des performances similaires (*S-Go-BF*, $U = 369.00$, $p > 0.05$). La variable d'inhibition retenue qui consistait à réaliser la somme des deux types d'erreurs montre que les participants âgés ont des performances similaires à celles des jeunes (*Inhibition*, $U = 383.50$, $p > 0.05$).

Afin d'évaluer la vitesse moyenne sur le parcours, les vitesses nulles, obtenues lorsque le véhicule était à l'arrêt, ont été exclues du calcul. Ainsi, la vitesse moyenne de parcours n'était pas nécessairement liée au temps de parcours et des participants pouvaient tout à fait conduire particulièrement vite (vitesse moyenne élevée) mais s'arrêter systématiquement à chaque barrière (temps global long). L'analyse des variables de temps et de vitesse indique que les participants âgés ont mis significativement plus de temps que les participants jeunes à parcourir les 50 barrières (*Tps-Inh-Glob*, $t(52) = 5.15$,

$p < 0.001$), qu'ils se sont donc arrêtés plus souvent et qu'ils ont également conduit moins vite que les participants jeunes ($V\text{-Inh-Glob}$, $t(57) = 6.89$, $p < 0.001$).

En conclusion, la situation de conduite mise au point dans le but d'évaluer l'évolution de la capacité d'inhibition contrôlée est sensible aux effets du vieillissement normal et permet de valider l'hypothèse concernant cette composante exécutive : les conducteurs âgés présentent de légers troubles de l'inhibition, ils font plus erreurs de jugement au moment de la prise de décision, et ceci entraîne chez eux un phénomène de compensation par un ralentissement de leur vitesse de conduite.

Les deux évaluations de la composante d'inhibition indiquent donc des résultats différents entre la situation de laboratoire (Stroop) et la situation de conduite. Les participants âgés présentent des troubles d'inhibition lorsqu'elle est évaluée par le test de Stroop, mais pas lorsqu'elle est évaluée avec notre situation de conduite. De plus, la performance évaluée en situation de laboratoire (test de Stroop) et la situation de conduite ne sont pas significativement corrélées, que ce soit avec les temps de réponse au Stroop ($r = 0.170$, $p > 0.05$) ou avec les erreurs non corrigées ($r = 0.092$, $p > 0.05$).

5. La situation de tourne-à-gauche

La situation de tourne-à-gauche était une situation plus réelle de conduite où aucune tâche spécifique n'était demandée au participant hormis celle de conduire de manière aussi naturelle que possible, c'est-à-dire comme il le ferait dans sa propre voiture. La variable retenue pour mesurer la performance globale en situation de tourne-à-gauche est un score global de pénalités. Plus ce score est élevé, plus la performance du participant est mauvaise. De plus, nous avons détaillé ce score global en indiquant le détail des pénalités obtenues par les conducteurs en fonction du type de pénalité appliquée : vérification des rétroviseurs (*rétro*), utilisation du clignotant (*cligno*), placement sur la file dédiée au tourne-à-gauche (*placement*), suivi du véhicule devant sans vérification (*suivi*), vérification des feux tricolores (*feux*) et insertion dans le flot de véhicules arrivant en sens inverse (*insertion*).

Le Tableau 15 présente les résultats obtenus par les deux groupes témoins, jeunes et âgés. Cette situation de conduite a été difficile à réaliser pour les participants en raison de la sensation de mal du simulateur qui pouvait être engendrée, si bien que 23 contrôles âgés (sur 29), et 28 contrôles jeunes (sur 30) ont terminé le parcours.

Tableau 15. Résultats à la situation de Tourne-à-gauche (TAG) dans le vieillissement normal.

	<i>T-Âgés</i> (<i>n</i> =23) moyenne (écart-type)	<i>T-Jeunes</i> (<i>n</i> =28) moyenne (écart-type)	<i>p</i>
<i>Rétro</i> (max = 7)	0.69 (1.01)	0.82 (1.46)	n.s.
<i>Cligno</i> (max = 10)	0.08 (0.28)	0.10 (0.41)	n.s.
<i>Placement</i> (max = 7)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	n.s.
<i>Suivi</i> (max = 6)	0.21 (0.42)	0.07 (0.37)	n.s.
<i>Feux</i> (max = 4)	1.35 (1.53)	0.71 (1.18)	n.s.
<i>insertion</i> (max = 9)	2.43 (1.24)	1.67 (1.05)	< 0.05
TAG (max = 43)	4.78 (2.28)	3.39 (2.43)	< 0.05

Les résultats montrent que, globalement, les participants jeunes et âgés obtiennent un score de pénalité relativement faible. Cependant l'analyse non paramétrique révèle que les conducteurs âgés ont réalisé significativement plus d'erreurs de conduite que les jeunes (*TAG*, $U = 200.01$, $p < 0.05$). Concernant les sous-scores de pénalités, seul le score d'insertion apparaît significativement différent entre les participants âgés et les jeunes.

Par ailleurs, ce score global de pénalité est significativement corrélé à la variable de flexibilité en situation de conduite ($r = 0.347$, $p < 0.01$) et à la variable de mise à jour en situation de conduite ($r = -0.292$, $p < 0.05$), mais pas à la variable d'inhibition en situation de conduite ($r = 0.204$, $p > 0.05$). En revanche il est corrélé à la mesure neuropsychologique de l'inhibition ($r = 0.451$, $p < 0.05$). Nous verrons dans la section suivante comment il est possible de relier cette situation de conduite aux trois composantes exécutives.

6. Analyses de régression multiple

6.1. Evaluations neuropsychologiques

Comme nous l'avons présenté plus haut, chaque composante exécutive a été évaluée à partir d'un test spécifique. La composante de flexibilité est donc représentée par la variable *PMT-CS*, la composante de mise à jour, par la variable *Nback-TR-2min0* et la composante d'inhibition par la variable *Stroop-TR-Inter-min-Déno*. Afin de vérifier que ces trois composantes sont bien indépendantes et que les différences entre jeunes et âgés ne peuvent pas s'expliquer uniquement par la variable « vitesse d'exécution », nous avons réalisé des analyses de régression multiple.

La méthode de régression ascendante est une méthode pas à pas, en ce sens qu'il s'agit d'inclure une à une les variables explicatives dans le modèle. La première étape consiste à sélectionner la variable explicative présentant la corrélation la plus élevée de toutes avec la variable expliquée. Une fois la variable sélectionnée, il est nécessaire d'étudier la significativité de son coefficient (probabilité associée à $F < 0.05$). S'il s'avère que celui-ci n'est pas significativement différent de 0, la variable explicative

correspondante ne sera pas retenue pour faire partie du modèle. Il s'agit ensuite de réitérer ce processus, c'est-à-dire de choisir à chaque étape la variable explicative qui améliore significativement le modèle. La méthode de régression descendante relève quasiment du même ordre que la méthode ascendante à cette exception près qu'elle s'effectue dans le sens inverse. En effet, elle consiste à prendre en compte l'ensemble des variables contenues dans le modèle global et à éliminer une à une les variables non significatives (probabilité associée à $F > 0.10$). L'utilisation conjointe des deux méthodes permet d'éliminer les biais dus à l'introduction séquentielle des variables. Si les deux méthodes renvoient au même modèle, le modèle est considéré comme valide. Nous ne présenterons pas ici le détail des résultats des deux méthodes, mais seulement le modèle global obtenu si les deux méthodes aboutissaient au même modèle, ce qui a été le cas pour chacune des composantes à expliquer.

Nous avons ajusté les analyses de régression sur le niveau d'étude, car cette variable est apparue significativement liée aux variables à expliquer (Tableau 16). Contrairement à ce qui aurait pu être attendu, le sexe et le kilométrage annuel n'étaient pas significativement corrélés aux variables à expliquer, nous ne les avons donc pas fait entrer comme variable d'ajustement dans le modèle de régression. Enfin, comme cela a été préconisé par Bryan et Luszcz, nous avons utilisé la variable nominale « groupe d'âge » plutôt que l'âge individuel des sujets dans les analyses. En effet, les participants étant répartis *a priori* en deux groupes d'âge, cette variable n'est pas distribuée selon la loi normale. Le groupe d'âge a donc été codé comme une variable qualitative non ordonnée (jeune = 1 ; âgé = 2).

Tableau 16. Matrice de corrélations entre niveau d'étude et composantes exécutives (jeunes et âgés).

r	<i>Flexibilité</i> ^{**}	<i>Mise à Jour</i> ^{**}	<i>Inhibition</i> ^{**}	<i>Vitesse</i>
<i>Niveau d'étude</i>	-0.396	-0.334	-0.391	-0.134

** : $p < 0.01$

6.1.1. Flexibilité mentale

Bien que la composante de flexibilité mentale n'ait pas montré de différences entre les jeunes et les âgés, il nous paraît tout de même intéressant d'étudier comment cette composante peut être reliée aux autres. En effet, d'autres variables pourraient masquer les effets du vieillissement sur la flexibilité.

L'analyse de régression effectuée sur la composante de flexibilité, avec comme variables explicatives, le groupe d'âge, la mise à jour, l'inhibition et la vitesse d'exécution ne renvoie à aucun modèle significatif. Que ce soit en méthode ascendante ou descendante, aucune des variables explicatives n'améliore significativement la variance. La composante de flexibilité est donc une composante indépendante, en tout cas en ce qui concerne les performances observées pour des participants jeunes et des participants âgés sains.

6.1.2. Mise à jour

De la même manière, nous avons réalisé une analyse de régression multiple sur la variable de mise à jour, avec comme variables explicatives, le groupe d'âge, la flexibilité mentale, l'inhibition et la vitesse de traitement.

Les méthodes ascendante et descendante conduisent au même modèle, seule la variable groupe d'âge explique significativement les différences entre jeunes et âgés dans la performance de mise à jour ($p < 0.05$). La variance expliquée est de 10.6 %. L'introduction des autres variables n'améliore pas significativement le modèle (Tableau 17).

Tableau 17. Analyse de régression sur la mise à jour dans le vieillissement normal.

Modèle	variables explicatives entrées	R ²	Signification bilatérale
MISE A JOUR-LABO	groupe d'âge	0.076	0.035
	vitesse		n.s.
	Inhibition-labo		n.s.
	Flexibilité-labo		n.s.

6.1.3. Inhibition

L'analyse de régression réalisée sur la composante d'inhibition avec comme variables introduites dans le modèle, le groupe d'âge, la flexibilité, la mise à jour et la vitesse conduit à un modèle où, comme pour la mise à jour, seule la variable groupe d'âge explique significativement le maximum de variance (19.9% de variance expliquée par le groupe d'âge, $p < 0.001$). Les différences de performances entre jeunes et âgés à l'épreuve d'inhibition ne peuvent donc pas s'expliquer par le ralentissement ou par une dégradation à l'une des trois autres composantes (Tableau 18).

Tableau 18. Analyse de régression sur l'inhibition dans le vieillissement normal.

Modèle	variables explicatives entrées	R ²	Signification bilatérale
INHIBITION-LABO	groupe d'âge	0.199	< 0.001
	vitesse		n.s.
	Mise à Jour-labo		n.s.
	Flexibilité-labo		n.s.

6.1.4. Synthèse : indépendance des trois composantes

Au vu des résultats présentés ci-dessus, il semble que les trois composantes exécutives proposées par Miyake *et al.* (2000) soient bien indépendantes et que les performances réalisées par les jeunes et les âgés ne dépendent pas les unes des autres. La flexibilité mentale, évaluée avec la tâche de Plus Minus Test n'est pas altérée dans le vieillissement

normal, alors que les composantes d'inhibition et de mise à jour présentent de légères altérations en termes de temps de réponse, mais qui ne peuvent pas être expliquées par un ralentissement cognitif.

6.2. Evaluations en situation de conduite

Les quatre situations de conduite mises au point ont également été soumises à des analyses de régression, d'une part pour tenter d'expliquer les différences entre les situations de conduite, puis d'autre part pour les relier aux situations de laboratoire. Les analyses sont également faites avec un ajustement sur le niveau d'étude.

6.2.1. Flexibilité mentale

Bien que cette situation de conduite n'ait pas montré de différence entre les jeunes et les âgés, nous avons tout de même réalisé l'analyse de régression, d'abord avec comme variables explicatives les autres situations de conduite, puis avec les composantes exécutives mesurées en situation de laboratoire.

Deux analyses distinctes ont été réalisées. La première a consisté à entrer comme variable explicatives, seulement les autres variables des situations de conduite et la variable groupe d'âge. Cette analyse de régression ne renvoie à aucun modèle significatif. Que ce soit en méthode ascendante ou descendante, aucune des variables explicatives n'améliore significativement la variance. La composante de flexibilité en situation de conduite est donc indépendante des deux autres.

La seconde analyse a consisté à entrer comme variable explicatives les trois composantes exécutives mesurées en situation de laboratoire. De même, cette analyse ne renvoie à aucun modèle significatif, bien que la composante de flexibilité mesurée en situation de laboratoire et celle mesurée en situation de conduite soit corrélées significativement ($r = 0.351$, $p < 0.05$).

6.2.2. Mise à Jour

Lorsque l'on réalise une analyse de régression sur la composante de mise à jour en situation de conduite, avec comme variable explicative le groupe d'âge et les autres situations de conduite (Tableau 19), seule la variable groupe d'âge améliore significativement le modèle et explique 40.7 % de la variance totale ($p < 0.001$).

Lorsque l'on ajoute dans le modèle de régression les variables explicatives de flexibilité, mise à jour, inhibition et vitesse mesurées en situation de laboratoire, la variable de mise à jour en situation de laboratoire améliore significativement le modèle (11.6% de variance expliquée, $p < 0.01$).

Tableau 19. Analyse de régression sur la mise à jour en conduite dans le vieillissement normal.

Modèle	variables explicatives entrées	R ²	Signification bilatérale
MISE A JOUR-SIMU	groupe d'âge	0.407	< 0.001
	Inhibition-simu		n.s.
	Flexibilité-simu		n.s.

Tableau 20. Analyse de régression sur la mise à jour en conduite dans le vieillissement normal, ajout des variables neuropsychologiques.

Modèle	variables explicatives entrées	R ²	Signification bilatérale
MISE A JOUR-SIMU	groupe d'âge	0.397	< 0.01
	Inhibition-simu		n.s.
	Flexibilité-simu		n.s.
	Mise à jour-labo	0.116	< 0.01
	inhibition-labo		n.s.
	Flexibilité-labo		n.s.

En résumé, la situation de mise à jour en conduite automobile est indépendante des deux autres situations de conduite et les différences liées à l'âge s'expliquent à la fois par la variable groupe d'âge, mais aussi par la variable de mise à jour en situation de laboratoire.

6.2.3. Inhibition

La première analyse de régression réalisée sur la variable d'inhibition en situation de conduite, avec comme variables explicatives le groupe d'âge et les autres variables de situation de conduite n'aboutit pas à un modèle significatif. Aucune des autres variables n'explique correctement la variance de cette situation de conduite. De plus, cette variable n'est pas corrélée avec la variable d'inhibition mesurée en situation de laboratoire ($r = 0.170$, $p > 0.05$). L'analyse de régression réalisée sur la même variable d'inhibition en situation de conduite, avec comme variables explicatives le groupe d'âge et les variables exécutives mesurées en situation de laboratoire n'aboutit à aucun modèle significatif permettant d'expliquer la variance. Cette situation d'inhibition est donc particulière, nous reviendrons sur l'interprétation de ces résultats en discussion.

6.2.4 Tourne-à-gauche

La situation de tourne-à-gauche était une situation globale de conduite, dans laquelle tous les participants devaient conduire de manière aussi naturelle que possible. La performance de conduite a été évaluée grâce à un score de pénalité. Une analyse de régression a été réalisée sur la variable de performance en situation de tourne-à-gauche, avec comme variables explicatives le groupe d'âge, la flexibilité, la mise à jour et l'inhibition en situations de conduite (Tableau 21). Les variables de flexibilité et de mise à

jour expliquent significativement une part importante de la variance (15.1%, $p < 0.05$), mais pas l'inhibition.

Une seconde analyse de régression a été réalisée sur la variable du tourne-à-gauche en entrant comme variables dépendantes, les trois composantes exécutives mesurées en situation de laboratoire (Tableau 22). Les variables de flexibilité et de mise à jour en situation de laboratoire améliorent significativement le modèle et expliquent 24.3% de la variance ($p < 0.01$).

Tableau 21. Analyse de régression sur la variable de tourne-à-gauche dans le vieillissement normal.

Modèle	variables explicatives entrées	R ²	Signification bilatérale
TAG	groupe d'âge		n.s.
	Inhibition-simu		n.s.
	Flexibilité-simu	0.103	< 0.01
	Mise à jour-simu	0.271	< 0.01

Tableau 22. Analyse de régression sur la variable de tourne-à-gauche dans le vieillissement normal : Introduction des composantes exécutives mesurées par les tests neuropsychologiques.

Modèle	variables explicatives entrées	R ²	Signification bilatérale
TAG	groupe d'âge		n.s.
	Inhibition-labo		n.s.
	Flexibilité- labo	0.169	< 0.01
	Mise à jour- labo	0.187	< 0.01

En résumé, les différences de performances entre participants jeunes et participants âgés dans la situation de tourne-à-gauche, s'expliquent par les différences de performances en flexibilité mentale et en mise à jour des informations (conduite et épreuves neuropsychologiques). La variable d'inhibition ne semble donc pas intervenir dans cette situation complexe, en tout cas l'inhibition n'explique pas les différences entre jeunes et âgés.

7. Synthèse des résultats

Cette étude expérimentale sur le vieillissement normal du fonctionnement exécutif a montré plusieurs résultats principaux. Tout d'abord, le vieillissement normal s'accompagne de modifications cognitives globales qui entraînent une baisse des performances aux tests globaux du fonctionnement exécutif, tels le *TMT*, le *WCST*, le test de Brixton ainsi que la double tâche de Baddeley. Les participants âgés ont en effet obtenu à ces différents tests des performances significativement moins bonnes que celles des jeunes, ceci en termes de temps de réponse. Cependant, les participants âgés n'ont

pas réalisé significativement plus d'erreurs que les jeunes.

Ensuite, les trois composantes exécutives évaluées, la flexibilité mentale, la mise à jour des informations en mémoire de travail et l'inhibition des réponses automatiques, ne subissent pas de manière équivalente les effets du vieillissement. En effet, la mise à jour, évaluée avec une tâche de n-back et l'inhibition évaluée avec le test de Stroop, montrent des différences significatives entre participants jeunes et âgés alors que la flexibilité, mesurée avec le *PMT* ne montre pas de différence significative.

Les analyses de régression réalisées nous permettent ensuite de répondre à l'une de nos hypothèses concernant la dépendance des composantes d'après le modèle de Miyake *et al.* (2000). En effet, les trois composantes exécutives suggérées par Miyake et son équipe sont, au vu de nos résultats, non reliées les unes aux autres, et les différences observées entre les participants jeunes et âgés en mise à jour et en inhibition ne s'expliquent que par la variable « groupe d'âge » et non par les autres composantes exécutives, ni par un ralentissement cognitif.

Enfin, en ce qui concerne la conduite automobile, les situations expérimentales qui ont été proposées aux participants indiquent des résultats similaires à ceux obtenus avec les épreuves neuropsychologiques. Les participants âgés ne présentent pas de déficits de flexibilité mentale, alors que les situations de mise à jour et d'inhibition indiquent des performances dégradées dans le vieillissement. Cependant la variable d'inhibition en situation de conduite n'est pas corrélée à l'épreuve neuropsychologique évaluant l'inhibition (Le test de Stroop). Cette situation de conduite est donc à interpréter de manière isolée car l'analyse de régression réalisée ne permet pas de montrer qu'il s'agissait clairement de la mise en œuvre de processus d'inhibition, tels que nous les avons mesurés avec le test de Stroop.

Par ailleurs, la variable de vitesse d'exécution, mesurée avec la tâche de n-back à $n=0$ ne différencie pas significativement les jeunes des âgés. De plus, cette variable n'est jamais apparue significative dans nos modèles de régression. Ceci indique que les différences, liées à l'âge, observées dans les épreuves neuropsychologiques et en conduite ne peuvent pas être expliquées par cette mesure de vitesse de traitement.

En définitive, Le vieillissement normal s'accompagne de modifications du système exécutif, mais des compensations ont certainement permis aux participants âgés de gérer correctement toutes les situations de conduite, même la situation globale de tourne-à-gauche qui était la plus complexe. Le chapitre suivant va maintenant s'intéresser à ces mêmes situations expérimentales, dans le domaine du vieillissement pathologique.

Chapitre 3. Résultats : La maladie d'Alzheimer

Ce chapitre présente les résultats obtenus comparativement par le groupe de patients avec maladie d'Alzheimer et le groupe de témoins âgés. Les variables de mesures sont identiques à celles utilisées dans la présentation des résultats sur le vieillissement normal, elles ne seront donc pas rappelées ici (cf. Chapitre 2).

1. Fonctionnement cognitif global

Cette section présente les résultats obtenus par les patients et les témoins âgés aux tests cognitifs globaux ainsi qu'aux tests de la batterie du Grefex. Le tableau suivant (Tableau 23) présente l'ensemble des résultats.

Tableau 23. Résultats aux tests neuropsychologiques complexes dans la maladie d'Alzheimer.

		<i>Patients (n=10) moyenne (écart-type)</i>	<i>T-Âgés (n=29) moyenne (écart-type)</i>	<i>p</i>
Test des Six Eléments				
	Six_El_Rang (max=6)	2.33 (1.87)	5.79 (0.49)	< 0.001
TMT				
	TR-A	51.80 (17.58)	37.28 (11.44)	< 0.01
	ENC-A	0.10 (0.31)	0.03 (0.19)	n.s.
	TR-B	151.50 (51.31)	74.62 (23.90)	< 0.001
	ENC-B	0.60 (0.84)	0.21 (0.56)	n.s.
	EP-B	0.40 (0.84)	0.03 (0.19)	n.s.
	TR-BminA	99.70	37.34 (20.24)	< 0.001
Test de Brixton				
	Brix_ENC	15.67 (4.80)	7 (2.98)	x
	Brix_AC	1.83 (1.47)	0.37 (0.90)	x
Double tâche de Baddeley				
	Em_Num	4.7 (0.82)	6.27 (0.92)	cf. Anova
	Em_Sim	8.4 (2.54)	10.76 (2.61)	
	M_Sim	119.1 (39.05)	159.14 (24.70)	
	Em_Dou	5.7 (2.21)	9.14 (2.38)	
	M_Dou	80.1 (28.39)	143.34 (23.91)	
Test des Fluences verbales				
	F_Form	16.2 (2.82)	24.65 (7.03)	< 0.001
	E_Form	2 (2)	0.75 (1.18)	x
	F_Sém	21.6 (4.27)	35.37 (8.25)	< 0.001
	E_Sém	2.3 (2.62)	0.41 (0.73)	x
	E_Sfor	0.1 (0.31)	0 (0)	x
WCST				
	WCST_Cat (max=6)	5 (0.94)	5.96 (0.18)	< 0.001
	WCST_EP	2.8 (1.68)	0.24 (0.51)	< 0.001
	WCST_AC	1.7 (1.16)	0.55 (0.57)	n.s.
Test des 5 Mots				
	RI_SL (max=5)	2.9 (0.99)	4.75 (0.63)	< 0.01
	RI_SI (max=5)	4.1 (1.10)	5 (0)	< 0.01
	RD_SL (max=5)	2.2 (1.40)	4.55 (0.63)	< 0.01
	RD_SI (max=5)	3.4 (1.58)	4.93 (0.25)	< 0.01
MMSE				
	Score (max=30)	24.8 (1.48)	29.65 (0.72)	< 0.001

Les patients Alzheimer ont été sélectionnés pour participer à cette étude sur la base notamment d'un critère de score minimal au MMSE (≥ 24). Cependant le score moyen de MMSE obtenus par les 10 patients est significativement plus faible que celui des participants âgés (*MMSE*, $U = 1.01$, $p < 0.001$). Ces résultats confirment également que nos critères d'inclusions ont bien été strictement respectés et que les patients

sélectionnés sont effectivement tous en stade précoce de maladie d'Alzheimer. Le Test des 5 mots a également été utilisé afin de vérifier que les patients étaient capables de retenir les consignes. Leurs performances sont significativement plus faibles que celles des âgés pour les quatre scores ($p < 0.01$), et ces scores sont nettement différents de ceux présentés par les normes de Croisile *et al.*, pour un âge et un niveau d'étude équivalent.

La comparaison des performances entre patients et participants âgés a porté sur neuf patients seulement car un patient n'a pas réussi à comprendre les consignes et à les reproduire. Les 29 participants âgés ont terminé le test. Le test non paramétrique de Mann-Whitney montre que les performances des patients sont significativement altérées par rapport à celles des participants âgés (*Rang*, $U = 4.0$, $p < 0.001$). Aucun patient n'a obtenu le score de rang maximal de 6, c'est-à-dire qu'ils ont tous effectué au moins une erreur d'exécution, alors que seulement cinq participants âgés sur 29 n'ont pas obtenu le score maximal.

Les patients sont significativement ralentis par rapport aux témoins âgés, que ce soit dans la partie A du *TMT* (*TR-A* : $t(37) = 3.01$, $p < 0.01$) et dans la partie B (*TR-B* : $t(37) = 4.57$, $p < 0.001$). L'analyse de comparaison de moyennes sur *TR-BminA* indique que les performances des patients sont également significativement dégradées par rapport à celles des participants âgés lorsque la composante de vitesse de réalisation est contrôlée (*TR-BminA* : $t(37) = 6.461$, $p < 0.001$). En revanche, l'analyse non paramétrique des erreurs ne révèle pas de différence significative du nombre d'erreurs entre patients et contrôles âgés dans la partie A (*ENC-A*, $U = 135.1$, $p > 0.05$), dans la partie B (*ENC-B*, $U = 107.0$, $p > 0.05$), ainsi que pour les erreurs persévératives de la partie B (*EP-B*, $U = 120.0$, $p > 0.05$).

Bien que l'analyse des erreurs ne révèle pas de différences de performances entre âgés contrôles et patients, l'écart de performances entre les âgés et les patients est, en termes de temps de réponse, en moyenne de 14.5 s dans la partie A et de 76.9 s dans la partie B, alors qu'il est respectivement de 12.7 s et 22.3 s entre les participants jeunes et les âgés. La pathologie accentue donc l'effet observé dans les résultats pour le vieillissement normal.

Comme le Test des six éléments, le test de Brixton a posé des difficultés importantes aux patients : quatre d'entre eux ont échoué à la compréhension de la consigne et le test a été arrêté après cinq erreurs consécutives. Les résultats présentés ne concernent donc que cinq patients et les 29 participants âgés. Il ne nous a donc pas semblé pertinent de faire une analyse statistique sur ces performances, mais simplement de préciser que ce test est apparu comme très difficile à réaliser pour les patients qui ont réalisé un plus grand nombre d'erreurs ($M = 15.7$, $SD = 4.8$) que les âgés ($M = 7.0$, $SD = 2.98$).

Des ANOVA à mesures répétées ont été réalisées afin d'analyser l'évolution des performances à la double tâche dans la maladie d'Alzheimer. Ces analyses sont composées d'un facteur inter-sujet : statut du participant (patient / âgé) et d'un facteur intra-sujet : la condition de réalisation (simple / double). Une analyse sur l'empan et une analyse sur la tâche motrice ont été réalisées. L'analyse sur l'empan numérique indique un effet simple de la condition [$F(1, 37) = 34.49$, $p < 0.001$] et un effet simple du statut [$F(1, 37) = 12.2$, $p < 0.001$], ce qui signifie que globalement, les participants ont

significativement moins bien réussi la tâche en condition double et que les patients ont été moins performants que les participants âgés sains. En revanche, il n'y a pas d'effet d'interaction entre le statut et la condition [$F(1, 37) = 2.15, p > 0.1$], les patients n'ont pas été particulièrement moins performants que les âgés lorsque la tâche était plus complexe. L'analyse de la tâche motrice indique un effet simple de la condition [$F(1, 37) = 47.95, p < 0.001$] ainsi qu'un effet simple du statut [$F(1, 37) = 32.27, p < 0.01$]. Par ailleurs, il existe également un effet d'interaction significatif entre la condition et le statut du participant [$F(1, 37) = 8.6, p < 0.01$] qui indique que les patients ont été plus gênés dans la tâche motrice que les âgés et ce plus particulièrement lorsqu'elle devait être réalisée en condition double. Devant la difficulté de cette tâche, les patients ont donc privilégié la tâche d'empan au détriment de la tâche motrice lorsque ces deux tâches étaient concurrentes, ce que n'ont pas fait les participants âgés.

Les patients obtiennent un score de fluence verbale formelle inférieur à celui des participants âgés contrôles (respectivement, $M = 16.20$ et $M = 24.65$). Une analyse non paramétrique de comparaison de ces scores indique que cet effet est statistiquement significatif ($F\text{-For}, U = 43.0, p < 0.001$). Il en est de même pour la fluence verbale sémantique, où le nombre de mots donnés est statistiquement plus faible chez les patients par rapport aux témoins ($F\text{-Sém}, U = 17.5, p < 0.001$). Par ailleurs, les patients font globalement plus d'erreurs que les âgés, en fluence formelle et en fluence sémantique. Au vu du petit nombre d'erreurs enregistrées chez les participants âgés, nous n'avons pas validé statistiquement ce résultat.

Pour ce dernier test d'évaluation des fonctions exécutives, les patients se sont montrés moins performants que les participants âgés. En effet, ils réalisent en moyenne 5.0 catégories ($SD = 0.94$) alors que les âgés en réalisent en moyenne 5.94 ($SD = 0.18$). Cette différence dans le nombre de catégories réalisées est statistiquement significatif ($WCST\text{-Cat}, U = 61, p < 0.001$). Les patients ont également effectué significativement plus d'erreurs et, en particulier, plus d'erreurs persévératives que les témoins âgés ($WCST\text{-EP}, U = 9.0, p < 0.001$). En effet les patients réalisent en moyenne 2.8 ($SD = 1.68$) erreurs persévératives alors que les témoins en réalisent en moyenne 0.24 ($SD = 0.51$). En fait, tous les patients ont fait au moins une erreur persévérative (min = 1, max = 6), alors que parmi les témoins âgés, seuls 6 participants ont réalisé une ou deux erreurs persévératives (min = 0, max = 2). Les patients avec démence de type Alzheimer présentent donc des difficultés à réaliser cette tâche complexe de déduction de règles, et effectuent des erreurs montrant des difficultés dans la capacité à changer de sets mentaux.

2. Flexibilité mentale

2.1. La flexibilité en situation de laboratoire

Le tableau suivant (Tableau 24) présente les résultats obtenus par les patients et les participants âgés au *PMT*. Les temps de réalisation sont donnés en secondes. Pour chaque groupe, c'est la moyenne (écart-type) qui a été représentée.

Tableau 24. Résultats au test de flexibilité mentale (PMT) dans le vieillissement pathologique.

	Patients (n=10) moyenne (écart-type)	T-Âgés (n=29) moyenne (écart-type)	p
Plus Minus Test			
TR-Add	81.10 (32.94)	48.59 (14.49)	< 0.001
ENC-Add	1.40 (3.17)	0.24 (0.64)	n.s.
TR-Sou	141.00 (61.24)	61.55 (24.22)	< 0.001
ENC-Sou	1.50 (2.76)	1.41 (5.65)	n.s.
TR-Alt	138.80 (46.26)	73.45 (21.4)	< 0.001
ENC-Alt	5.80 (6.03)	0.69 (1.49)	< 0.001
Flexibilité ¹	27.75 (18.70)	18.37 (12.38)	< 0.01

1 : FLEXIBILITE = Coût du shift (CS)

L'analyse de comparaison de moyenne sur les temps de réponse (*t* de Student) indique que les patients sont significativement ralentis par rapport aux témoins âgés, dans les deux conditions, sans flexibilité (*TR-Add* : $t(37) = 4.31$, $p < 0.001$; *TR-Sou*, $t(37) = 3.99$, $p < 0.001$), ou avec flexibilité (*TR-Alt* : $t(37) = 4.31$, $p < 0.001$). L'analyse non paramétrique des erreurs révèle des différences significatives du nombre d'erreurs entre patients et âgés uniquement dans la partie avec flexibilité (*ENC-Alt*, $U = 35.1$, $p < 0.001$). La variable retenue pour la mesure de la flexibilité indique également des performances significativement dégradées chez les patients par rapport aux témoins âgés (*Flexibilité*, $t(37) = 4.75$, $p < 0.01$). Ce test qui n'avait pas révélé de dégradation de la flexibilité chez les âgés par rapport aux participants jeunes, apparaît sensible dans la maladie d'Alzheimer.

2.2. La flexibilité en situation de conduite

Le tableau suivant (Tableau 25) présente l'ensemble des données retenues pour les patients et les témoins âgés.

Tableau 25. Résultats à la situation de flexibilité mentale en conduite dans le vieillissement pathologique.

		<i>Patients</i> (<i>n</i> =9) <i>moyenne</i> (<i>écart-type</i>)	<i>T-Âgés</i> (<i>n</i> =29) <i>moyenne</i> (<i>écart-type</i>)
Condition 1 : Sans alternance			
	TR-Flex-1	4150.28 (942.33)	1651.09 (716.01)
	ENC-Flex-1	1.55 (1.42)	0.00 (0.00)
	V-Flex-1	100.15 (12.44)	104.99 (10.34)
Condition 2 : Avec Alternance			
	TR□Flex□2	4781.39 (1301.07)	1942.92 (781.88)
	ENC□Flex□2	4.66 (3.81)	0.31 (0.66)
	EP□Flex□2	2.33 (2.95)	0.17 (0.38)
	V□Flex□2	96.79 (7.16)	109.03 (12.34)
	FLEXIBILITE ¹	631.11 (567.93)	291.81 (326.87)

$$1 : \text{FLEXIBILITE} = (\text{TR-Flex-2}) - (\text{TR-Flex-1})$$

Afin d'évaluer comment la maladie d'Alzheimer pouvait retentir sur la capacité de flexibilité mentale en conduite, nous avons réalisé une ANOVA à mesures répétées avec 2 facteurs : un facteur inter-sujet (statut du participant, patient / témoin âgé) et un facteur intra-sujet (condition expérimentale, avec / sans flexibilité).

Nous observons un effet principal significatif du statut [$F(1, <37) = 87.04, p < 0.001$] indiquant que les patients Alzheimer ont des temps de réponses globalement plus longs que les participants âgés sains. Nous observons également un effet significatif de la condition [$F(1, 37) = 20.42, p < 0.001$] montrant que les participants ont été globalement moins rapides dans la partie avec flexibilité que dans la partie sans flexibilité. Enfin, nous observons un effet d'interaction significatif entre la condition et le statut [$F(1, 37) = 4.93, p < 0.05$]. Cette interaction indique que les patients ont été significativement plus lents que les contrôles âgés et que leur baisse de performance a été d'autant plus importante qu'ils étaient en condition avec alternance.

De plus, une comparaison de moyenne sur la variable de flexibilité indique que les patients ont une performance significativement moins bonne que les témoins âgés (*Flexibilité*, $t(37) = 1.47, p < 0.05$).

En condition sans alternance, les patients Alzheimer n'ont pas réalisé significativement plus d'erreurs non corrigées que les contrôles âgés qui n'en font aucune (*ENC-Flex-1*, $U = 47.85, p > 0.05$). En revanche, en condition avec alternance, l'analyse non paramétrique indique que les patients déments ont réalisé significativement plus d'erreurs non corrigées (*ENC-Flex-2*, $U = 23.5, p < 0.001$) mais également plus d'erreurs persévératives (*EP-Flex-2*, $U = 53.5, p < 0.01$). Les patients, en plus d'être ralentis significativement par rapport aux contrôles âgés, effectuent également plus d'erreurs par défaut de flexibilité mentale.

L'analyse de la vitesse (Figure 9) nous apporte également des résultats intéressants concernant les performances des patients par rapport à celles des âgés. En effet, comme cela a été expliqué précédemment, la consigne était pour chaque participant de conduire à 90 km/h et de respecter cette limitation (pour rappel, le simulateur était équipé, comme

un véhicule normal, d'un compteur de vitesse analogique). Nous avons réalisé une ANOVA à mesures répétées avec 2 facteurs : un facteur inter sujet (statut du participant : patient / témoin âgé) et un facteur intra-sujet (condition expérimentale : avec / sans flexibilité). Cette analyse indique tout d'abord un effet principal du statut [$F(1, 37) = 23.6, p < 0.001$] indiquant que les patients ont globalement conduit moins vite que les témoins âgés quelle que soit la condition. En revanche, nous n'observons pas d'effet principal de la condition [$F(1, 37) = 0.178, p > 0.05$]. Les participants n'ont globalement pas réduit leur vitesse entre les deux conditions. Enfin, l'analyse indique qu'il y a une interaction significative entre la condition et le statut [$F(1, 37) = 7.88, p < 0.01$]. Ceci signifie que lorsque patients réduisent leur vitesse dans la condition avec flexibilité, les contrôles l'augmentent significativement, ce qui est bien visible sur la Figure 9.

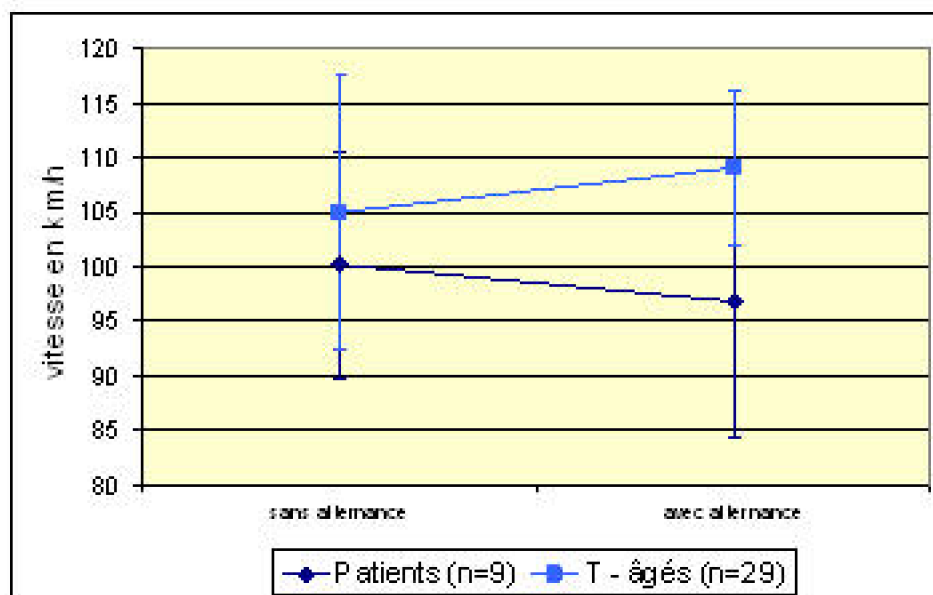


Figure 9. Vitesse moyenne du véhicule en situation de flexibilité, en fonction des conditions expérimentales.

En résumé, les deux types d'évaluation de la flexibilité indiquent que cette composante exécutive est significativement altérée dans la maladie d'Alzheimer. De plus, les deux mesures de flexibilité sont significativement corrélées ($r = 0.409, p < 0.05$).

3. Mise à jour

3.1. La mise à jour en situation de laboratoire

Dans le test de n-back, les patients Alzheimer se sont montrés significativement plus lents que les témoins âgés dans les trois conditions expérimentales ($TR-maj-0, t(37) = 2.57, p < 0.05$; $TR-maj-1, t(37) = 2.44, p < 0.05$; $TR-maj-2, t(37) = 3.57, p < 0.01$). Dans la troisième condition ($n = 2$), les patients ont également effectué significativement plus d'erreurs que les âgés ($ENC-Maj-2, U = 31.5, p < 0.001$). L'hypothèse d'un retentissement de la maladie d'Alzheimer sur la composante de mise à jour des informations en mémoire

de travail est donc bien validée.

Tableau 26. Résultats au test de mise à jour (N-Back) dans le vieillissement pathologique.

		Patients (n=10) moyenne (écart-type)	T-Âgés (n=29) moyenne (écart-type)	p
n = 0				
	TR-maj-0	447.66 (81.31)	385.31 (60.39)	< 0.05
	ENC-maj-0	0.40 (0.51)	0.07 (0.25)	n.s.
n = 1				
	TR-maj-1	536.61 (171.79)	434.61 (87.81)	< 0.05
	ENC-maj-1	1.10 (1.45)	0.10 (0.31)	n.s.
n = 2				
	TR-maj-2	918.49 (271.08)	656.37 (171.27)	< 0.01
	ENC-maj-2	10.2 (6.19)	2.69 (2.37)	< 0.001
	MISE A JOUR ¹	470.82 (218.39)	271.05 (154.76)	< 0.01

$$1 : \text{MISE A JOUR} = (\text{TR-Maj-2}) - (\text{TR-Maj-0})$$

Il est intéressant de noter que, dans la condition n = 2, bien que les contrôles âgés diffèrent significativement des jeunes en termes d'erreurs, on observe que l'écart patients – âgés est 4 fois plus important que l'écart jeunes – âgés. D'ailleurs la variable de mise à jour retenue indique des effets significatifs importants entre patients et participants âgés (*Mise à jour*, $t(37) = 3.159$, $p < 0.001$).

3.2. La mise à jour en situation de conduite

Le tableau suivant (Tableau 27) présente l'ensemble des résultats obtenus par les deux groupes de participants pour chacune des variables de mesure retenues à l'épreuve de conduite avec mise à jour.

Tableau 27. Résultats à la situation de mise à jour en conduite dans le vieillissement pathologique.

	Patients (n=10) moyenne (écart-type)	T-Âgés (n=29) moyenne (écart-type)	p
RL-Maj (score max = 27)	12.50 (2.07)	20.59 (2.39)	< 0.001
RI-Maj (score max = 27)	10.90 (3.90)	21.97 (2.51)	< 0.001
V-maj (en Km/h)	86.45 (11.30)	100.80 (12.39)	< 0.01
MISE A JOUR ¹	11.7 (2.45)	21.27 (2.15)	< 0.001

$$1 : \text{MISE A JOUR} = [(\text{RL-Maj}) + (\text{RI-Maj})] / 2$$

En rappel libre, le score des patients est statistiquement moins bon que celui des âgés (*RL-Maj*, $t(37) = 9.495$, $p < 0.001$), les patients rappellent en effet en moyenne 12.5 panneaux sur 27 ($SD = 2.07$) alors que les témoins en rappellent en moyenne 20.59 ($SD = 2.39$). Le rappel indicé est également significativement altéré chez les patients

RI-Maj, $t(37) = 10.36$, $p < 0.001$). Ainsi, même lorsque l'expérimentateur indiquait le rappel, les patients n'ont pas eu de meilleures performances, au contraire, ils rappellent même moins de panneaux en rappel indicé qu'en rappel libre, mais cette différence n'apparaît pas statistiquement significative. Nous avons vu plus haut que les performances des patients étaient altérées dans une tâche de mémoire simple (Test des 5 mots), et nous avons vu que les patients étaient capables de rappeler en moyenne 4.1 mots en rappel immédiat. La tâche de rappel de panneaux implique donc une autre composante que la mémoire, et nous pouvons également confirmer notre hypothèse : la composante spécifiquement exécutive de mise à jour et de maintien en mémoire de travail est impliquée dans cette tâche de conduite et elle est altérée dès les phases précoces de la maladie d'Alzheimer.

Par ailleurs, les patients ont conduit significativement moins vite que les témoins âgés (*V-Maj*, $t(37) = 3.224$, $p < 0.01$), bien que la consigne donnée ait été la même, à savoir conduire à 90 km/h et respecter cette limitation. Les patients ont eu tendance à ralentir à chaque fin de séries des panneaux, c'est-à-dire qu'ils conduisaient à 90 km/h en moyenne, mais relâchaient systématiquement l'accélérateur lorsque l'expérimentateur annonçait la phase de rappel.

En résumé, les deux mesures distinctes de la mise à jour des informations en mémoire de travail indiquent que les patients en stade débutant de maladie d'Alzheimer présentent des déficits clairs de la composante de mise à jour. De plus, ces deux mesures distinctes sont significativement corrélées, comme cela était le cas pour le vieillissement normal ($r = -0.477$, $p < 0.01$).

4. Inhibition

4.1. L'inhibition en situation de laboratoire

Le tableau suivant (Tableau 28) présente les résultats obtenus par les patients et participants âgés au test de Stroop.

Tableau 28. Résultats au test d'inhibition (Stroop) dans le vieillissement pathologique.

		Patients (n=10) moyenne (écart-type)	T-Âgés (n=29) moyenne (écart-type)	p
Dénomination				
	TR-Dén	97.3 (23.71)	58.86 (8.54)	< 0.001
	EC-Dén	0.6 (1.07)	0.17 (0.46)	n.s.
	ENC-Dén	0.00 (0.00)	0.10 (0.31)	n.s.
Lecture				
	TR-Lec	74.2 (27.53)	41.24 (6.91)	< 0.01
	EC-Lec	0.10 (0.32)	0.00 (0.00)	n.s.
	ENC-Lec	0.10 (0.32)	0.00 (0.00)	n.s.
Interférence				
	TR-Inter	216.5 (69.99)	112.59 (24.95)	< 0.001
	EC-Inter	3.90 (1.79)	0.93 (1.41)	< 0.01
	ENC-Inter	5.80 (4.64)	0.48 (0.87)	< 0.01
	INHIBITION ¹	119.20 (65.61)	53.72 (22.39)	< 0.001

$$1 : \text{INHIBITION} = (\text{TR-Inter}) - (\text{TR-Déno})$$

Les performances des patients sont significativement altérées comparativement à celles des contrôles âgés. En effet, les TR sont significativement plus longs dans les trois conditions (*TR-Dén*, $t(37) = 5.01$, $p < 0.001$; *TR-Lec*, $t(37) = 3.74$, $p < 0.01$; *TR-Inter*, $t(37) = 4.59$, $p < 0.001$). Les patients ont également réalisé significativement plus d'erreurs non corrigées que les âgés dans la condition interférence (*ENC-Inter*, $U = 32.1$, $p < 0.001$). Enfin, la variable choisie pour mesurer l'inhibition indique également des différences importantes entre patients et témoins âgés (*inhibition*, $t(37) = 4.73$, $p < 0.001$). L'hypothèse d'une dégradation de la composante d'inhibition contrôlée dans la maladie d'Alzheimer est donc bien validée.

4.2. L'inhibition en situation de conduite

Le Tableau 29 est un récapitulatif des données mesurées pour la tâche d'inhibition en situation de conduite pour les patients et le groupe de témoins âgés. Cette situation de conduite où il fallait conduire le plus rapidement possible et s'arrêter parfois brusquement a été difficile à réaliser pour les participants et seuls 7 patients (sur 10) et 20 contrôles âgés (sur 29) ont terminé l'ensemble de la passation de cette tâche.

Tableau 29. Résultats à la situation d'inhibition en conduite dans le vieillissement pathologique.

	<i>Patients (n=7) moyenne (écart-type)</i>	<i>T-Âgés (n=20) moyenne (écart-type)</i>	<i>p</i>
V-Inh-Glob (en km/h)	53.54 (4.51)	55.76 (4.11)	n.s.
Tps-Inh-Glob (en min)	21.14 (1.89)	20.06 (1.25)	n.s.
Erreurs			
Stop-BO (max=5)	3.20 (1.75)	0.89 (1.08)	< 0.001
Go-BF (max=5)	2.50 (1.78)	0.89 (1.26)	< 0.01
Stop-BF (max=20)	1.50 (2.12)	0.24 (0.57)	n.s.
Go-BO (max=20)	0.50 (1.70)	0.03 (0.18)	n.s.
INHIBITION ¹	5.70 (3.16)	1.79 (1.80)	< 0.001

1 : INHIBITION = Stop-BO + Go-BF

L'analyse de la vitesse du véhicule et du temps de parcours indiquent que les patients n'ont pas mis significativement plus de temps que les participants âgés à réaliser le parcours (*Tps-Inh-Glob*, $t(25) = 1.71$, $p > 0.05$) et qu'ils n'ont pas conduit significativement moins vite que les participants âgés (*V-Inh-Glob*, $t(25) = 1.43$, $p > 0.05$). Ce résultat indique que les patients, outre une difficulté à inhiber correctement les messages non pertinents, n'ont pas réduit leur vitesse afin d'être capable de gérer cette situation complexe. En effet, l'analyse non paramétrique des erreurs révèlent que les patients ont des scores qui ne diffèrent pas significativement de ceux des participants âgés en ce qui concerne les erreurs simples (*Stop-BF*, $U = 102.00$, $p > 0.05$; *Go-BO*, $U = 91.00$, $p > 0.05$). En revanche, en ce qui concerne les scores de défaut d'inhibition, les patients ont réalisé des performances significativement moins bonnes que les participants âgés, quelle que ce soit la condition (*Stop-BO*, $U = 21.01$, $p < 0.001$; *Go-BF*, $U = 43.50$, $p < 0.01$). De plus, la variable d'inhibition est également globalement détériorée chez les patients par rapport aux participants âgés (*Inhibition*, $U = 41.0$, $p < 0.001$).

Les patients avec démence Alzheimer ont donc des difficultés importantes à inhiber le message qui s'affiche, que ce soit un message « Stop » ou un message « Go ». Les participants âgés avaient uniquement des difficultés à inhiber le message « Stop », c'est-à-dire qu'ils s'arrêtaient par excès de prudence pour ne pas risquer de passer à une barrière qui aurait pu se fermer. En revanche ils ne renversaient que très peu de barrières fermées signalée par un message « Go », alors que les patients font significativement plus souvent cette erreur. Les troubles d'inhibition que présentent les patients sont donc nettement plus importants que ceux montrés par les participants âgés.

En résumé, contrairement aux résultats obtenus dans le vieillissement normal, dans le cas de la maladie d'Alzheimer, notre situation de conduite s'est avérée suffisamment sensible pour détecter des différences entre conducteurs âgés sains et conducteurs avec maladie d'Alzheimer. De plus, les deux mesures distinctes d'inhibition, en situation de laboratoire (test de Stroop) et en situation de conduite sont significativement corrélées ($r = 0.298$, $p < 0.05$). Ce résultat indique que la situation de conduite mise au point dans le simulateur peut être une bonne mesure de l'inhibition.

5. La situation de tourne-à-gauche

La variable retenue dans la situation de tourne-à-gauche était un score de pénalité noté TAG qui comprenait les dix intersections en tourne-à-gauche. Cette situation de conduite a été difficile à réaliser pour les participants en raison de la sensation de mal du simulateur et 23 contrôles âgés (sur 29), et seulement six patients sur dix ont terminé le parcours. Le tableau suivant présente les résultats obtenus par les patients et par les participants âgés.

Tableau 30. Résultats à la situation de Tourne-à-gauche (TAG) dans le vieillissement pathologique.

	<i>Patients (n=6) moyenne (écart-type)</i>	<i>T-Âgés (n=23) moyenne (écart-type)</i>	<i>p</i>
<i>Rétro (max = 7)</i>	2.16 (2.13)	0.69 (1.01)	< 0.05
<i>Cligno (max = 10)</i>	0.50 (0.83)	0.08 (0.28)	n.s.
<i>Placement (max = 7)</i>	0.83 (1.16)	0.00 (0.00)	n.s.
<i>Suivi (max = 6)</i>	0.33 (0.51)	0.21 (0.42)	n.s.
<i>Feux (max = 4)</i>	2.33 (1.50)	1.35 (1.53)	< 0.05
<i>insertion (max = 9)</i>	2.66 (1.21)	2.43 (1.24)	n.s.
TAG (max = 43)	8.83 (3.86)	4.78 (2.28)	< 0.01

Les résultats indiquent que les patients ont un score de pénalité qui est quasiment le double de celui des participants âgés sains. Cette différence est, de plus, statistiquement significative (TAG, $U = 29.5$, $p < 0.01$). Bien que l'échantillon de patients soit relativement restreint, le test de Mann-Whitney indique une probabilité faible, ce résultat nous paraît donc suffisamment robuste pour dire que les patients ont une performance dégradée par rapport aux témoins âgés. L'analyse des détails des scores indiquent par ailleurs, que les patients ont significativement réalisé plus d'erreurs de vérifications de feux, indiquant qu'ils sont passés à une intersection alors que le feu était repassé au rouge. Ils ont également réalisé significativement moins de vérifications de rétroviseurs par rapport aux témoins âgés. Les autres sous-scores ne sont pas significativement différents entre patients et témoins âgés.

Par ailleurs, cette performance en situation globale est significativement corrélée aux trois autres variables mesurées dans le simulateur de conduite (Tableau 31).

En résumé, la situation de tourne-à-gauche évaluée chez les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer indique que ceux-ci présentent une performance dégradée par rapport aux participants âgés et que la dégradation de cette performance peut être directement reliée à la dégradation des trois composantes exécutives. La section suivante concerne les analyses de régression réalisée sur les différentes composantes exécutives mesurées en laboratoire et sur simulateur.

Tableau 31. Corrélations entre TAG et expériences de conduite dans le vieillissement pathologique.

r	<i>Flexibilité</i> _*	<i>Mise à Jour</i> _{**}	<i>Inhibition</i> _{**}
TAG	0.402	-0.667	0.345

* : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$.

6. Analyses de régression multiple

6.1. Evaluations neuropsychologiques

Comme pour le vieillissement normal, nous avons réalisé des analyses de régression à partir des trois composantes exécutives mesurées par les tests neuropsychologiques (pour le détail sur la méthode d'analyse de régression, cf. chapitre 2). Nous avons également ajusté les analyses sur le niveau d'étude car cette variable est significativement corrélée aux différentes variables à intégrer dans les modèles (Tableau 32).

Tableau 32. Corrélations entre niveau d'étude et composantes exécutives : vieillissement pathologique.

r	<i>Flexibilité</i> _{**}	<i>Mise à Jour</i> _{**}	<i>Inhibition</i> _{**}	<i>Vitesse</i>
Niveau d'étude	-0.392	-0.429	-0.354	-0.105

** : $p < 0.01$

En revanche, comme pour les analyses dans le vieillissement normal, le sexe et le kilométrage annuel ne se sont pas avérées corrélées aux variables, nous n'avons donc pondéré nos analyses qu'en fonction du niveau d'étude.

6.1.1. Flexibilité mentale

Une analyse de régression a été réalisée sur la composante de flexibilité mentale avec comme variable explicative le statut des participants (patients vs témoins âgés), la vitesse d'exécution, l'inhibition et la mise à jour (Tableau 33). Les méthodes ascendante et descendante conduisent au même modèle, seule la variable « statut du participant » améliore significativement le modèle en expliquant 19.5% de la variance totale ($p < 0.01$). La composante de flexibilité mentale est donc indépendante et les différences entre patients et témoins âgés ne peuvent pas s'expliquer par des détériorations aux autres composantes exécutives. Ce résultat n'avait pas pu être clairement démontré dans le vieillissement normal puisque cette composante n'était pas atteinte. Les résultats sur le vieillissement pathologique vérifient donc cette hypothèse.

Tableau 33. Analyse de régression sur la flexibilité dans le vieillissement pathologique.

Modèle	variables explicatives	R ²	Signification
--------	------------------------	----------------	---------------

en vertu de la loi du droit d'auteur.

	entrées		bilatérale
FLEXIBILITE-LABO	statut	0.195	< 0.01
	vitesse		n.s.
	Inhibition-labo		n.s.
	Mise à jour-labo		n.s.

6.1.2. Mise à jour

De la même manière, nous avons réalisé une analyse de régression multiple sur la variable de mise à jour, avec comme variables explicatives, le statut du participant, la flexibilité mentale, l'inhibition et la vitesse de traitement.

Les méthodes ascendante et descendante conduisent au même modèle, seule la variable « statut du participant » explique significativement les différences entre patients et témoins âgés dans la performance de mise à jour ($p < 0.01$). La variance expliquée est de 21.2 %. L'introduction des autres variables n'améliore pas significativement le modèle (Tableau 34).

Tableau 34. Analyse de régression sur la mise à jour dans le vieillissement pathologique.

Modèle	variables explicatives entrées	R ²	Signification bilatérale
MISE A JOUR-LABO	statut	0.212	< 0.01
	vitesse		n.s.
	Inhibition-labo		n.s.
	Flexibilité-labo		n.s.

6.1.3. Inhibition

L'analyse de régression réalisée sur la composante d'inhibition avec comme variables introduites dans le modèle, le statut, la flexibilité, la mise à jour et la vitesse conduit à un modèle où seule la variable groupe d'âge explique significativement le maximum de variance (45.4 % de variance expliquée par le groupe d'âge, $p < 0.001$). Les différences de performances entre patients et témoins âgés à l'épreuve d'inhibition ne peuvent donc pas s'expliquer par le ralentissement ou par une dégradation à l'une des trois autres composantes (Tableau 35).

Tableau 35. Analyse de régression sur l'inhibition dans le vieillissement pathologique.

Modèle	variables explicatives entrées	R ²	Signification bilatérale
INHIBITION-LABO	statut	0.376	< 0.001
	vitesse		n.s.
	Mise à Jour-labo		n.s.
	Flexibilité-labo		n.s.

6.1.4. Synthèse : indépendance des trois composantes

Les résultats présentés dans cette section viennent confirmer ceux obtenus dans le chapitre sur le vieillissement normal. Les trois composantes exécutives proposées par Miyake *et al.* (2000) sont bien indépendantes et la dégradation des performances dans la maladie d'Alzheimer ne dépendent pas les unes des autres.

6.2. Evaluations en situation de conduite

Les analyses de régression sur les composantes en situation de conduite ont été réalisées avec un ajustement sur le niveau d'étude.

6.2.1. Flexibilité mentale

Deux analyses de régression ont été réalisées. La première a consisté à faire entrer dans le modèle de régression, le statut du participant (patient vs témoin âgé), l'inhibition en situation de conduite et la mise à jour en situation de conduite ; dans la seconde, nous avons entré les variables exécutives mesurée en situation de laboratoire ainsi que la vitesse d'exécution.

La première analyse réalisée ne renvoie à aucun modèle significatif. Aucune variable exécutive de conduite n'explique les différences de performances à la flexibilité mentale. En revanche, la seconde analyse de régression réalisée, avec comme variable dépendante la flexibilité en situation de conduite et comme variable explicative le statut du participant et les trois composantes évaluées en situation de conduite, montre que la variable de flexibilité mentale (PMT) explique significativement 13.8 % de la variance ($p < 0.01$). Les autres variables incluses n'améliorent pas significativement le modèle (Tableau 36).

Tableau 36. Analyse de régression sur la flexibilité en conduite dans le vieillissement pathologique.

Modèle	variables explicatives entrées	R ²	Signification bilatérale
FLEXIBILITE-SIMU	flexibilité-labo	0.164	< 0.001
	statut		n.s.
	mise à jour-labo		n.s.
	inhibition-labo		n.s.

En résumé, les différences de performances entre patients et témoins âgés dans l'épreuve de flexibilité ne peuvent pas être expliquées par les autres composantes exécutives, que ce soit en conduite ou en situation de laboratoire. La seule variable qui explique ces différences de performance est la variable de flexibilité évaluée à l'aide du *PMT*.

6.2.2. Mise à jour

De la même manière, deux analyses de régression ont été réalisées sur la composante de mise à jour en situation de conduite. La première analyse indique que seule la variable statut du participant améliore significativement la modèle et explique 47.9 % de la variance ($p < 0.001$). Donc la composante de mise à jour en situation de conduite est indépendante des deux autres épreuves en conduite. Lorsque l'analyse de régression introduit comme variables explicatives les trois composantes exécutives mesurées en situation de laboratoire, deux variables améliorent significativement le modèle : la mise à jour et la flexibilité (Tableau 37).

En résumé, la composante de mise à jour des informations en mémoire de travail, évaluée en situation de conduite est indépendante des deux autres situations de conduite. En revanche, les différences de performances entre patients et participants âgés peuvent s'expliquer par la composante de mise à jour et par la composante de flexibilité mentale. Ce résultat n'était pas apparu significatif dans les analyses sur le vieillissement normal, mais la flexibilité mentale n'étant pas dégradée, les effets étaient peut-être minimisés. La mise à jour des informations dépend donc en partie de la flexibilité bien que ces deux composantes évaluées en situation de laboratoire n'apparaissent pas significativement reliées.

Tableau 37. Analyse de régression sur la mise à jour en conduite dans le vieillissement pathologique.

Modèle	variables explicatives entrées	R ²	Signification bilatérale
MISE A JOUR-SIMU	Mise à jour-labo	0.406	< 0.01
	inhibition-labo		n.s.
	Flexibilité-labo	0.555	< 0.01

6.2.3. Inhibition

Pour la troisième composante exécutive mesurée en situation de conduite, la première analyse de régression réalisée a introduit comme variables explicatives, le statut du participant, la flexibilité en situation de conduite et la mise à jour en situation de conduite. Aucune variable explicative n'améliore significativement le modèle. Cependant, il est important de noter, que l'analyse de régression réalisée sur cette variable discrète est moins robuste que lorsque la variable dépendante entrée est une variable telle un temps de réponse. De plus le faible nombre de participants ayant réussi à réaliser l'épreuve jusqu'à la fin peut également expliquer que le modèle de régression n'amène pas de

résultats significatifs.

Nous avons cependant réalisé la seconde analyse de régression en introduisant comme variables explicatives les trois composantes exécutives mesurées par les tests neuropsychologiques. Le modèle obtenu ne retient aucune variable explicative entrée. Cependant, la variable d'inhibition mesurée par le Stroop explique 11.9 % de la variance, ce résultat n'apparaît pas significatif au seuil fixé à 5 %, mais la valeur p atteint 0.059, ce qui sera considéré comme une tendance. Avec une variable plus robuste ainsi que des échantillons de participants plus importants, les résultats auraient peut-être été significatifs, mais rien ne permet de le conclure.

6.2.4 Tourne-à-gauche

Enfin, la dernière situation soumise à l'analyse de régression a été la situation de tourne-à-gauche. De la même manière que pour la variable d'inhibition, les résultats sont à considérer avec précautions en termes de validité statistique puisque peu de participants (en particulier parmi les patients) ont terminé cette expérience de conduite.

Néanmoins, l'analyse de régression introduisant les trois autres variables exécutives de situation de conduite indiquent que deux composantes améliorent significativement le modèle, la flexibilité et la mise à jour (Tableau 38) et expliquent 29.3 % de la variance totale.

Tableau 38. Analyse de régression sur le tourne-à-gauche dans le vieillissement pathologique.

Modèle	variables explicatives entrées	R ²	Signification bilatérale
TAG	groupe d'âge		n.s.
	Inhibition-simu		n.s.
	Flexibilité-simu	0.366	< 0.05
	Mise à jour-simu	0.342	< 0.05

La seconde analyse réalisée, introduisant comme variables explicatives les composantes exécutives mesurées en situation de laboratoire montre que, comme pour le vieillissement normal, la flexibilité mentale et la mise à jour des informations en mémoire de travail améliorent significativement le modèle avec 17.8 % de variance expliquée (Tableau 39).

Tableau 39. Analyse de régression sur le tourne-à-gauche dans le vieillissement pathologique : introduction des composantes exécutives mesurées en situation de laboratoire.

Modèle	variables explicatives entrées	R ²	Signification bilatérale
TAG	groupe d'âge		n.s.
	Inhibition-labo		n.s.
	Flexibilité- labo	0.312	< 0.01
	Mise à jour- labo	0.287	< 0.05

En définitive, la situation de tourne-à-gauche qui a particulièrement pénalisé les patients avec maladie d'Alzheimer implique au moins deux des trois composantes exécutives, la flexibilité mentale et le mise à jour des informations en mémoire de travail. Seule l'inhibition des informations pertinentes ne semble pas améliorer les différents modèles de régression réalisés que ce soit dans le vieillissement normal ou pathologique.

7. Synthèse des résultats

Cette seconde étude expérimentale sur le vieillissement pathologique du fonctionnement exécutif permet de répondre à nos différentes hypothèses.

D'une part la maladie d'Alzheimer s'accompagne de dégradations significatives du fonctionnement cognitif global et plus particulièrement du fonctionnement exécutif. Les patients ont en effet obtenu à la batterie de tests exécutifs, des performances significativement dégradées par rapport à des contrôles âgés en bonne santé. Ces déficits se sont traduits à la fois en termes de ralentissement des réponses mais aussi en termes d'augmentation du nombre d'erreurs.

D'autre part, contrairement à ce que nous avons observé dans le vieillissement normal, la flexibilité mentale évaluée par le *PMT* montre des différences significatives entre patients et contrôles âgés. Les trois composantes exécutives évaluées, la flexibilité mentale, la mise à jour des informations en mémoire de travail et l'inhibition des réponses automatiques, qui n'étaient pas dégradées de manière uniforme dans le vieillissement normal, apparaissent donc toutes les trois altérées dans la maladie d'Alzheimer, sans distinction dans les composantes.

Les analyses de régression réalisées nous permettent également de répondre à l'hypothèse concernant la dépendance des composantes d'après le modèle de Miyake *et al.* (2000). En effet, les trois composantes sont indépendantes, tout comme cela avait été démontré dans le vieillissement normal.

Enfin, en ce qui concerne la conduite automobile, les situations expérimentales qui ont été proposées aux participants semblent être de bons indicateurs de la performance exécutive des participants. En effet, les différences de performances entre patients et participants âgés dans chacune des situations mises au point, peuvent s'expliquer en fonction de la composante exécutive qui lui est reliée. Seule la variable d'inhibition n'a pas pu être reliée à la composante exécutive d'inhibition évaluée par le Stroop.

Discussion

1. Effets du vieillissement normal sur les fonctions exécutives en conduite

Cette section est consacrée à la discussion des résultats que nous avons obtenus à partir de nos protocoles expérimentaux. Nous présentons d'une part les interprétations concernant le vieillissement cognitif « normal », et d'autre part les interprétations concernant la maladie d'Alzheimer.

1. Évaluations neuropsychologiques

Selon notre première hypothèse opérationnelle sur le fonctionnement exécutif dans le vieillissement normal, **les performances des participants âgés devaient être dégradées par rapport à celles des participants jeunes sur les trois composantes exécutives et les différences devaient surtout s'observer en termes de ralentissement des temps de réponse.**

Les trois composantes exécutives ont été évaluées à l'aide de trois tests neuropsychologiques la flexibilité à l'aide du *PMT*, la mise à jour à l'aide du test de *n-back*

et l'inhibition à l'aide du test de *Stroop*. Nos résultats indiquent des détériorations hétérogènes des trois composantes. En effet, les performances des participants âgés sont comparables à celles des jeunes sur la flexibilité mentale, mais elles sont significativement moins bonnes en ce qui concerne les tâches impliquant la mise à jour des informations en mémoire de travail et l'inhibition.

1.1. Flexibilité mentale

Les âgés ont obtenu des performances similaires à celles des jeunes dans l'épreuve du *PMT*, ce qui tend à infirmer notre hypothèse et montre que la flexibilité mentale est une composante exécutive préservée dans le vieillissement normal. Nos résultats concernant la flexibilité ne sont donc pas tout à fait en accord avec ceux de la littérature. En effet, les études qui se sont intéressées aux effets du vieillissement sur la flexibilité indiquent en général un ralentissement des temps de réponse chez les participants âgés. Cependant, dans ces études, la vitesse de traitement n'est pas contrôlée et la plupart des tests de mesure de la flexibilité mentale sont des épreuves réalisées sous une pression temporelle forte. Notre mesure de la flexibilité ayant été évaluée par le coût du shift, qui tient compte des temps de réponse des participants dans la condition où il n'y a pas de demande d'alternance entre les deux tâches, la vitesse d'exécution est donc contrôlée et dans ce cas les performances sont similaires.

Cependant, il est important de préciser deux points en ce qui concerne cette mesure de la flexibilité. D'une part, si les résultats obtenus par les participants jeunes et les participants âgés au *PMT*, dans la variable « coût du shift » n'apparaissent pas significativement différents, en revanche les performances des participants âgés présentent une variabilité relativement importante ($SD = 12.38$), et par ailleurs, la valeur p associée à la statistique du test de Student est de 0.059, ceci indiquant une tendance en faveur d'une différence significative jeunes – âgés. Il est donc possible que la variabilité importante des performances des participants âgés puisse masquer les différences entre jeunes et âgés. Nous avons donc cherché si des participants présentaient des performances éloignées de celles du reste de l'échantillon, que ce soit des performances nettement meilleures ou des performances moins bonnes, et il s'avère qu'aucun participant ne présentait de performance éloignée de plus de 1.5 écart-type de la moyenne du groupe. Il semble donc que les résultats puissent être considérés comme homogènes.

D'autre part, nous avons choisi cette épreuve du *PMT* car il s'agissait d'un test simple qui pouvait être compris par tous les participants jeunes, âgés et patients. Cependant, le *PMT* fait appel à des capacités de calcul mental simple, activité assez bien automatisée chez les adultes âgés, et donc faisant peut-être moins appel au fonctionnement exécutif. Il est donc possible que dans le souci de proposer une tâche pure et suffisamment compréhensible en particulier pour les patients, nous ayons proposé une tâche un peu 'trop simple' aux participants et donc non sensible aux effets du vieillissement. Plusieurs auteurs utilisent comme mesure de la flexibilité les temps de réponse à la partie B du *TMT*, ou le nombre d'erreurs persévératives au *WCST*, qui sont des tests plus complexes et faisant intervenir d'autres paramètres cognitifs. Dans notre étude, le *TMT* a montré des différences significatives entre participants jeunes et participants âgés dans la partie B. Il

est donc possible que lorsque la tâche à réaliser est plus complexe, la demande en flexibilité mentale soit plus importante et que les différences entre jeunes et âgés puissent alors apparaître significatives. Afin de vérifier si le *TMT* pouvait être considéré comme une meilleure mesure de la flexibilité mentale, nous avons réalisé une analyse de régression avec comme variables explicatives, le groupe d'âge, ainsi que nos trois composantes exécutives et la variable de vitesse de traitement. Le meilleur modèle explicatif du *TMT* est celui qui prend en compte uniquement la variable d'inhibition mesurée par le test de Stroop (19.4 % de variance expliquée, $p < 0.05$). Il semble donc que le *TMT* inclut une part importante d'inhibition, ce qui n'est pas le cas du *PMT*. C'est sans doute ce qui explique que ce test soit plus sensible aux effets de l'âge que le *PMT*. Nous pouvons donc considérer que notre choix méthodologique concernant le *PMT* était justifié dans le cas d'une mesure de la flexibilité et que cette composante est préservée dans le vieillissement normal. En outre, une étude publiée récemment a montré, avec le même paradigme expérimental, que les performances d'un groupe de participants âgés de 68 ans en moyenne n'étaient pas significativement différentes de celles d'un groupe de jeunes (moyenne d'âge : 22 ans). Les auteurs ont en revanche montré que la capacité de flexibilité était dégradée dans un groupe de participants plus âgés (78 ans en moyenne). Il semble donc que la composante de flexibilité soit préservée pendant un certain temps, puis qu'elle se dégrade progressivement au cours du vieillissement cognitif normal.

1.2. Mise à jour

En ce qui concerne la composante de mise à jour des informations en mémoire de travail, notre étude apporte des éléments complémentaires concernant cette fonction. En effet, à notre connaissance, peu d'études se sont spécifiquement intéressées au vieillissement de cette composante. Nos résultats indiquent que les adultes âgés ont présenté un ralentissement des temps de réponse dans l'épreuve de mise à jour, mais seulement lorsque la demande en mise à jour était importante, c'est-à-dire à partir de $n = 2$. En effet, lorsque les participants devaient retenir uniquement l'item présenté à l'essai n et celui présenté juste avant (essai $n - 1$), les différences entre jeunes et âgés n'étaient pas significatives et les âgés ne produisaient pas plus d'erreurs que les jeunes. Avec un paradigme semblable, Van der Linden *et al.* ont également montré que lorsque la demande en mise à jour était peu importante, les âgés étaient aussi performants que les jeunes et ce n'était que lorsque la demande en mise à jour augmentait, que les performances des âgés étaient dégradées par rapport à celles des participants jeunes.

Une étude récente a également montré que les participants âgés présentaient des difficultés de conscience autoévaluative (capacité à revivre mentalement son passé ou à se projeter dans l'avenir) et que ces difficultés étaient spécifiquement liées à des déficits exécutifs dans la mise à jour des informations en mémoire de travail. Ces auteurs se sont en effet placés dans le même cadre théorique que le nôtre, celui de Miyake *et al.*, et ont réalisé des analyses de régression. Ces analyses indiquent que seules les différences de performances en mise à jour pouvaient expliquer les différences de performances à la tâche de mesure de la conscience autoévaluative.

Par ailleurs, notre hypothèse va également dans le sens de celle proposée par Hartman *et al.* : le vieillissement cognitif normal implique une détérioration du système de

mise à jour, sans que cela soit expliqué par un ralentissement cognitif généralisé. Ajoutons également que ces mêmes auteurs précisent que le déficit en mise à jour ne peut pas être expliqué par un déficit en inhibition seulement. L'analyse de régression que nous avons réalisée sur la variable de mise à jour confirme ces résultats et indique que la composante de mise à jour est indépendante des deux autres composantes exécutives et ne dépend pas de la vitesse de traitement.

1.3. Inhibition

Enfin, en ce qui concerne la composante d'inhibition, notre hypothèse est également validée : nos résultats sur le vieillissement normal indiquent que les participants âgés ont présenté des temps de réponse plus longs que les participants jeunes dans la condition interférente du test de Stroop, ce qui montre des difficultés dans la capacité à inhiber l'activité automatique de lecture des mots. Les participants âgés n'ont cependant pas présenté d'augmentation du nombre d'erreurs, indiquant que la perturbation de la capacité d'inhibition intervient seulement en termes de ralentissement, mais que les âgés réussissent tout de même à inhiber l'activité automatique de lecture du mot. Ces résultats sont en accord avec les résultats de la littérature, qui indiquent que le vieillissement s'accompagne d'un ralentissement des temps de réponse dans les épreuves nécessitant l'inhibition volontaire d'une réponse automatique, tel que c'est le cas dans le test de Stroop . L'inhibition contrôlée et volontaire est donc perturbée dans le vieillissement cognitif normal.

Les analyses de régression réalisées à partir de cette composante indiquent par ailleurs, qu'il s'agit d'une fonction indépendante des deux autres et que, d'autre part, ce ne sont pas les déficits d'inhibition qui peuvent expliquer les différences de performances entre les jeunes et les âgés sur les deux autres composantes. Dans leur article de référence, Miyake *et al.* (2000) proposaient deux hypothèses concernant le lien qui unit les fonctions exécutives. (1) Les trois composantes exécutives nécessiteraient la mise en œuvre de processus d'inhibition qui seraient le régulateur des autres composantes exécutives, ou (2) une capacité d'attention contrôlée (attention exécutive) interviendrait à un niveau plus macroscopique et permettrait de maintenir (ou de supprimer) les informations relatives aux buts de la tâche en mémoire de travail. Nos résultats indiquent que dans le vieillissement normal, la capacité d'inhibition est légèrement dégradée, ce qui avait par ailleurs été déjà démontré par d'autres études . Nous avons également montré que la composante de flexibilité est quant à elle, préservée dans le vieillissement cognitif normal. Si la composante d'inhibition devait avoir une influence importante sur les autres composantes exécutives, la flexibilité mentale serait elle aussi dégradée. Nos résultats tendent donc à montrer que cette seconde hypothèse d'une capacité d'attention exécutive générale serait meilleure que l'explication de l'intervention d'un facteur général d'inhibition. Ce résultat n'est cependant pas en désaccord avec la possibilité d'un lien fort entre les composantes exécutives, lien qui a été démontré par Miyake *et al.* (2000) puis confirmé par des études notamment en imagerie .

Nos résultats suggèrent que le vieillissement cognitif normal entraîne des modifications spécifiques du fonctionnement exécutif, et que les composantes identifiées par Miyake *et al.* ne subissent pas les effets de ce vieillissement de manière similaire. De

plus, les analyses de régression réalisées sur les trois composantes exécutives indiquent que chacune d'entre elles est indépendante des deux autres et que les différences de performances jeunes / âgés ne peuvent pas s'expliquer simplement par un ralentissement de la vitesse de traitement. En effet, l'hypothèse d'un ralentissement généralisé des ressources de traitement est parfois avancée pour expliquer les différences de performances entre jeunes et âgés dans des tâches cognitives. Cependant, cette explication a été remise en cause dans un certains nombres d'études. Nos résultats vont également dans le sens de ces études. Aucune des trois composantes exécutives n'a pu être expliquée significativement par des différences de performances dans la tâche de vitesse d'exécution. Par ailleurs, bien que nous nous soyons focalisés dans cette discussion sur les résultats concernant les trois composantes exécutives, les résultats aux autres tests de la batterie du Grefex apportent également des arguments qui confirment nos hypothèses. En effet, les participants âgés n'ont pas été moins performants que les jeunes aux tests des six éléments ou au test de Brixton, ce qui indique une bonne préservation des capacités de résolution de problème et de déduction de règles. Ce résultat se retrouve aussi dans le *WCST* : les participants âgés ont des performances similaires à celles des jeunes en ce qui concerne le nombre de catégories réalisées. Cependant, les âgés ont réalisé significativement plus d'erreurs persévératives, ce qui indique de légères difficultés ($M = 0.24$) dans la capacité à changer de règles mentales.

Ces résultats concernant les évaluations neuropsychologiques sont cependant à mettre en lien, dans le cadre de notre travail de recherche, avec les résultats que nous avons obtenus dans les expérimentations mettant les participants en situation de conduite. En effet, l'objectif de notre travail de recherche était bien de mieux comprendre quelles composantes entrent en jeu dans l'activité de conduite et comment elles peuvent être altérées avec la dégradation du système exécutif. C'est pourquoi nous allons maintenant nous intéresser aux interprétations possibles des résultats concernant les performances des conducteurs âgés par rapport à celles de jeunes dans ces situations.

2. Evaluations en situation de conduite

Selon notre seconde hypothèse concernant le vieillissement cognitif normal, **les trois situations de conduite mises au point dans le but d'évaluer les composantes exécutives impliquées dans la conduite automobile, devaient montrer des différences de performances entre les participants jeunes et les participants âgés, de manière similaire à ce qui a été observé dans les évaluations neuropsychologiques.** Chacune des trois composantes a été évaluée à l'aide d'une situation particulière mise au point pour les besoins de l'étude, sur le simulateur de conduite.

2.1. Flexibilité mentale

En ce qui concerne tout d'abord la flexibilité mentale, les résultats que nous avons obtenus sont en accord avec ceux obtenus par l'évaluation neuropsychologique. En effet, les participants âgés ne présentent pas de déficits spécifiques de la flexibilité lorsque celle-ci est évaluée en situation de conduite. La tâche consistait à donner le plus

rapidement possible la forme ou la couleur d'un panneau de signalisation en fonction de sa localisation sur les côtés de la route. Il est intéressant de noter que globalement les participants âgés ont été plus lents que les participants jeunes pour répondre à l'apparition des stimuli, c'est-à-dire que même dans la condition où il n'y avait pas de demande en flexibilité, les participants âgés ont répondu moins vite que les participants jeunes. Mais la différence de performances entre la condition qui demandait une alternance systématique et celle qui n'en demandait pas n'apparaît pas détériorée chez les conducteurs âgés. Ils ne présentaient donc pas de troubles spécifiquement liés à la composante de flexibilité. La tâche que nous avons proposée aux participants était une tâche très simple, puisqu'il s'agissait pour les participants de nommer la couleur ou la forme d'un panneau. Cette tâche était tout à fait inhabituelle dans une situation de conduite, alors que le processus de reconnaissance et d'indentification d'un panneau de signalisation est quant à lui automatisé. Notre tâche a donc entraîné une implication plus importante du système exécutif. Par ailleurs, nous avons proposé comme hypothèse concernant cette situation de conduite, que les participants âgés qui seraient en difficulté pour réaliser cette tâche développeraient un comportement de compensation, en réduisant leur vitesse par exemple. Les résultats indiquent que ce n'est pas le cas puisqu'en moyenne, les participants âgés ont conduit aussi rapidement que les participants jeunes quelle que soit la condition. Ils ont également conduit plus vite dans la situation demandant une alternance que dans la situation simple. Les participants ont tous passé les conditions dans le même ordre, en commençant par la situation sans flexibilité, ce qui nous a permis d'observer cet effet d'entraînement de la conduite sur le simulateur. La différence de performance entre les deux conditions n'apparaît cependant pas significative. Les conducteurs âgés ne se sont donc pas trouvés en difficulté particulière pour réaliser cette tâche non routinière. Ceci nous permet de valider notre hypothèse concernant le vieillissement de la composante de flexibilité : dans le vieillissement normal, la flexibilité mentale n'est pas altérée. Ce résultat est particulièrement intéressant à souligner, car dans un contexte de conduite, cette composante est très importante, puisqu'un conducteur doit être en mesure d'alterner dans le traitement des différentes informations provenant de la scène routière. Il doit également être capable d'alterner entre des séquences de comportements automatisées et des séquences contrôlées. Cette alternance est en effet indispensable pour une conduite sécuritaire et nous verrons que c'est ce type de difficultés qui peut rendre la conduite non sécuritaire dans le vieillissement pathologique.

2.2. Mise à jour

La composante de mise à jour des informations en mémoire de travail a quant à elle été évaluée au moyen d'une tâche de rappel de panneaux de la circulation. Les participants devaient rappeler les trois derniers panneaux d'une série de panneaux de longueur inconnue. Les résultats indiquent que les participants âgés ont rappelé significativement moins de panneaux que les participants jeunes. Ce résultat est également en accord avec ceux que nous avons obtenu dans l'évaluation neuropsychologique de la mise à jour, dans laquelle les âgés étaient plus lents que les jeunes dans le test de n-back ; ils avaient également réalisé un nombre significativement plus grand d'erreurs non corrigées en

condition $n = 2$. Van der Linden *et al.* avaient montré que les âgés présentaient des déficits de mise à jour uniquement lorsque le nombre d'informations à retenir et à mettre à jour était suffisamment important, c'est à dire à partir de six items. Dans notre tâche de mise à jour en situation de conduite, la tâche était pourtant de ne retenir que les trois derniers panneaux, ce qui représente finalement peu d'informations. Il est donc possible que le fait d'avoir placé les participants en situation de conduite et d'avoir ajouté la tâche de mise à jour ait rendu cette tâche plus complexe. Cependant, nous n'avons pas observé de diminution de la vitesse de conduite des participants, qui auraient pu compenser leur difficulté à retenir les informations en réduisant leur vitesse. De plus, les écarts-types calculés sur les moyennes de scores des participant jeunes et âgés sont également assez modérés (respectivement, 1.31 et 2.15) ce qui indique que les résultats sont homogènes au sein des deux groupes. Ces résultats nous amènent à nous questionner sur la capacité des âgés à tenir compte des informations routières qui leur sont transmises par les panneaux. En effet, en situation réelle de conduite, les panneaux sont très fréquents sur l'ensemble du réseau routier et doivent être mémorisés et mis à jour en permanence et ceci en parallèle par rapport au reste de l'activité de conduite. Par exemple, si le conducteur rencontre successivement un panneau de limitation de vitesse, un panneau d'interdiction de dépasser, un panneau de fin du caractère prioritaire de la route et un quatrième panneau de fin d'interdiction de doubler, il doit être capable de mettre à jour correctement les informations contenues en mémoire et savoir que l'interdiction de doubler n'est plus une information active, mais qu'en revanche le premier panneau vu, la limitation de vitesse, ainsi que le troisième, la fin du caractère prioritaire de la route, ont toujours cours. Si un conducteur âgé présente des difficultés à mémoriser les trois derniers panneaux rencontrés, il risque d'oublier que la limitation de vitesse a toujours cours et qu'il ne se situe plus sur une route prioritaire, et cela peut le mettre en situation de danger potentiel. A notre connaissance, aucune étude n'avait précédemment mis en évidence ce possible déficit. Il serait intéressant de mettre en relation cette dégradation de la mise à jour des informations en mémoire de travail, mise en évidence sur le simulateur de conduite avec une situation réelle de conduite. En effet, il est possible que des difficultés rencontrées par des conducteurs âgés soient en partie dues à des difficultés dans le maintien en mémoire de travail des informations disponibles dans l'environnement routier.

2.3. Inhibition

Enfin, la composante d'inhibition en situation de conduite a été évaluée par l'expérimentation au cours de laquelle les participants devaient conduire sur une route nationale ponctuée d'intersections avec des barrières de passages à niveaux, signalées par un message qu'il fallait parfois inhiber. Pour cette composante, les résultats n'indiquent pas de différences entre les conducteurs jeunes et les conducteurs âgés. En effet, ces derniers ne font pas plus d'erreurs de gestion des barrières non cohérentes que les conducteurs jeunes. Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux que nous avons obtenus dans l'évaluation neuropsychologique de l'inhibition. En effet, les résultats au test de Stroop indiquaient que les participants âgés étaient significativement plus lents que les jeunes. Ces résultats sont d'ailleurs confirmés par un certain nombre d'études qui ont

montré que le test de Stroop était sensible aux effets du vieillissement . Nos résultats dans l'évaluation neuropsychologique indiquent donc que la capacité d'inhibition contrôlée commence à se dégrader dans le vieillissement normal. Dans ce cas, pourquoi n'avons-nous pas trouvé de différences entre les jeunes et les âgés dans l'expérience sur simulateur de conduite ? Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour répondre à cette interrogation.

Une première hypothèse repose sur le type de variable utilisé dans l'expérience sur simulateur. En effet, lors de cette expérimentation, les données enregistrées pour évaluer les capacités d'inhibition étaient exprimées en nombre d'erreurs. Pour cette tâche, nous n'avons pas pu enregistrer de temps de réaction. Cette analyse réalisée sur une variable discrète doit donc être interprétée avec quelques précautions et si les différences ne ressortent pas statistiquement significatives, ceci peut être dû au faible taux d'erreurs global obtenu par les participants.

Cependant, lorsqu'on différencie les erreurs « Stop à une barrière ouverte » des erreurs « Go à une barrière fermée », le premier type d'erreurs apparaît statistiquement différent entre conducteurs jeunes et conducteurs âgés, les âgés ayant effectué significativement plus d'erreurs que les jeunes. C'est lorsque l'on regroupe les deux types d'erreurs que les différences ne sont plus significatives. Il semblerait donc bien que l'inhibition contrôlée mesurée avec les deux types d'erreurs, dans cette situation particulière de conduite, ne soit pas dégradée dans le vieillissement normal.

La seconde hypothèse qui peut être avancée concerne l'idée du ralentissement général qui pourrait intervenir dans le vieillissement . En effet, dans la tâche d'inhibition mesurée par le test de Stroop, la variable dépendante est le temps de réponse, alors que dans la tâche d'inhibition en situation de conduite, nous avons enregistré des taux d'erreurs. La composante de ralentissement pourrait donc expliquer les différences obtenues entre jeunes et âgés au test de Stroop. Selon cette hypothèse, il serait donc possible d'observer des différences entre jeunes et âgés dans la tâche d'inhibition en conduite si l'on utilisait comme variable des temps de réponse, ce qui n'a pas été possible dans le cadre de cette étude sur simulateur.

Cependant, d'une part, notre analyse sur le test de Stroop tenait compte de la vitesse de dénomination de base et d'autre part l'analyse de régression que nous avons réalisée sur les résultats au Stroop, dans le vieillissement normal, indique que la vitesse d'exécution n'est pas une variable explicative satisfaisante pour le modèle. Ce n'est pas le ralentissement cognitif qui peut expliquer les différences entre jeunes et âgés au test de Stroop, mais bien une difficulté d'inhibition. Les différences de résultats entre les deux mesures de l'inhibition ne peuvent donc pas s'expliquer exclusivement par une différence dans le type de variable utilisé.

Enfin, une troisième hypothèse peut être proposée pour expliquer nos résultats. En effet, nous avons retenu pour notre étude la distinction entre deux types d'inhibition, l'inhibition automatique et l'inhibition contrôlée car plusieurs études ont montré que l'inhibition automatique n'était pas sensible aux effets de l'âge, contrairement à l'inhibition contrôlée . Nous avons focalisé notre étude uniquement sur les processus d'inhibition contrôlée car en situation de conduite, ce sont majoritairement des processus d'inhibition

contrôlée qui semblent intervenir. Par conséquent, l'épreuve neuropsychologique choisie était une épreuve d'inhibition contrôlée, le test de Stroop, et l'expérience en conduite impliquait également une inhibition contrôlée du signal non pertinent.

Cependant, il est possible de distinguer au sein même de la capacité d'inhibition contrôlée, deux processus distincts, (1) le processus d'inhibition des **informations non pertinentes** et (2) le processus d'inhibition des **actions automatiques ou prédominantes**. Le test de Stroop mesure la capacité à inhiber une action automatique, puisqu'il s'agit d'inhiber l'activité de lecture du mot, qui est une activité très automatisée, au profit de la dénomination de couleur, qui est plus inhabituelle. En revanche, dans la situation de conduite, il s'agissait non pas d'inhiber une action, mais une information non pertinente. En effet, le participant devait inhiber le message non pertinent afin d'adapter son comportement face à la barrière. D'ailleurs, Hasher, Zacks et May ont suggéré que l'inhibition pouvait être scindée en trois fonctions distinctes, une fonction **d'accès**, une fonction **de suppression** et une fonction **de restriction**. Les fonctions d'accès et de suppression ont pour rôle, respectivement d'empêcher l'accès initial en mémoire de travail d'informations qui ne sont pas pertinentes et de supprimer les informations présentes en mémoire de travail qui sont devenues non pertinentes lorsque la tâche a changé. La troisième fonction a pour rôle de réprimer une réponse forte ou dominante qui est déclenchée par des indices familiers mais qui n'est pas pertinente pour le traitement de la tâche en cours de réalisation. Les deux premières fonctions interviennent donc pour empêcher l'accès d'informations en mémoire de travail, la dernière intervient donc pour réprimer une action automatique non adaptée. Il est donc possible que l'inhibition des actions soit atteinte dans le vieillissement, mais pas l'inhibition des informations. Dans la littérature disponible sur l'inhibition, la distinction inhibition des actions / inhibition des informations est souvent décrite, cependant à notre connaissance, aucune étude ne s'est spécifiquement intéressée aux évolutions de ces deux types d'inhibition dans le vieillissement normal. Nos résultats semblent indiquer qu'il y aurait donc une préservation de la capacité à inhiber volontairement des informations, alors que la capacité à inhiber volontairement une action serait altérée. Il serait donc intéressant de mettre au point un protocole expérimental qui permettrait de tester cette hypothèse de manière plus systématique. Dans l'activité de conduite, les deux processus qui viennent d'être décrits sont impliqués. En effet, l'activité de conduite requiert que le conducteur soit capable d'inhiber les informations de l'environnement qui ne sont pas pertinentes pour ne traiter que celles qui le sont. Le conducteur doit également être capable d'inhiber des comportements automatiques qui ne sont pas adaptés pour la situation en cours. Notre expérimentation sur simulateur pourrait ainsi être modifiée afin de mettre en évidence les capacités d'inhibition d'une action automatique, avec par exemple un paradigme de type Go/ No Go.

2.4. La situation de tourne-à-gauche

Concernant le vieillissement normal, nous avons émis une dernière hypothèse qui porte sur la conduite sur simulateur avec mise en situation de tourne-à-gauche. Selon cette hypothèse, **pour les conducteurs âgés sains, les légères dégradations du fonctionnement exécutif devaient entraîner une augmentation du score de pénalité**

mesuré dans la situation de manœuvre en tourne-à-gauche.

Les résultats indiquent que les participants âgés ont obtenu un score de pénalité global effectivement plus élevé que celui des jeunes, indiquant qu'ils ont réalisé plus d'erreurs dans leur comportement de tourne-à-gauche. Cependant, ce score reste globalement faible et les âgés ont réalisé assez peu d'erreurs lors de ces manœuvres de tourne-à-gauche qui étaient protégées par les feux de signalisation. Paire-Ficout *et al.* rappellent d'ailleurs que les intersections les plus sécuritaires sont celles comportant des feux tricolores et que les difficultés des conducteurs âgés concernent plus souvent les intersections non protégées. Cependant, bien que les intersections présentées dans notre expérimentation étaient protégées par une voie spécifique pour tourner à gauche, le système de feux tricolores, lui, n'était pas spécifique pour le tourne-à-gauche, ce qui a mis les participants dans une situation où ils devaient croiser le trafic en sens inverse et se retrouvaient donc en situation de tourne-à-gauche semi-protégé.

Si l'on s'intéresse maintenant aux types d'erreurs réalisés, on observe que la moitié des erreurs des âgés concerne l'insertion dans le trafic (2.43 sur un score global de 4.78 en moyenne), alors que la pénalité d'insertion représentait au maximum neuf points sur les 43, soit un cinquième du total des pénalités. Cette pénalité d'insertion était attribuée lorsque le conducteur ne s'insérait pas en cas de gap long ou qu'il s'insérait de manière dangereuse en cas de gap court. Il s'agissait donc d'une situation de prise de décision sous contrainte temporelle, puisqu'il fallait que l'insertion soit réalisée pendant la période où les feux tricolores étaient au vert. Ces résultats vont dans le sens de ceux obtenus par Pietras *et al.* qui ont montré que des adultes âgés présentaient des difficultés à définir le moment où il était possible de s'insérer dans un trafic et le moment où ce n'était plus possible.

En outre, dans notre étude, aucun participant âgé ne s'est mis en situation d'accident en coupant un flot en gap court. Les erreurs étaient essentiellement réalisées par excès de prudence, c'est-à-dire que les participants s'arrêtaient même lorsque le flot de véhicules était suffisamment espacé pour permettre le passage du véhicule. Cet effet a également été démontré par Caird et Hancock qui ont montré que les conducteurs âgés ont besoin d'un gap plus long que des conducteurs jeunes pour accepter d'effectuer une manœuvre de tourne-à-gauche.

Ce type d'erreur peut donc être rapproché de celles réalisées par les participants dans la situation de conduite avec les barrières de passages à niveau, où les erreurs des participants âgés étaient surtout des erreurs d'arrêts aux barrières ouvertes (avec message « Stop »). Les conducteurs s'arrêtaient par excès de prudence, tout comme dans la situation de tourne-à-gauche, ils ne traversaient pas le flot de véhicules par excès de prudence et préféraient attendre que tous les véhicules soient passés. Afin de pallier cet inconvénient méthodologique, il serait intéressant de placer les participants dans la même situation de tourne-à-gauche, mais avec des véhicules derrière le conducteur-sujet, ce qui augmenterait la pression temporelle de passage aux feux. En effet, une réaction relativement fréquente de la part des conducteurs âgés était de vérifier dans leur rétroviseur que personne n'attendait derrière le véhicule, ce qui leur permettait d'effectuer la manœuvre dans le laps de temps qu'ils désiraient.

Par ailleurs, les analyses de corrélations que nous avons réalisées à partir du score

en vertu de la loi du droit d'auteur.

global de pénalités, indiquent que ce score est significativement corrélé aux variables de flexibilité et de mise à jour, mesurées en situation de conduite, mais pas à celle d'inhibition mesurée également en situation de conduite. Plus les participants avaient des performances dégradées dans les situations de conduite avec flexibilité ou mise à jour, plus leur score global de pénalités dans l'expérience de tourne-à-gauche était important. Il est cependant regrettable que les sous-scores de pénalités aient été trop faibles pour permettre une analyse statistique fiable des corrélations avec les autres variables mesurées, ce qui aurait par exemple permis d'évaluer dans quelle mesure l'inhibition était impliquée dans le comportement de suivi du véhicule. En effet, l'erreur de suivi de véhicule n'est arrivée que très rarement chez les participants jeunes et âgés sains. Il s'agissait d'une erreur grave montrant certainement un défaut d'inhibition important. Il aurait donc été intéressant de réaliser une mesure plus fine des erreurs d'inhibition qui peuvent être réalisées dans une situation de tourne-à-gauche et qui sont moins graves, donc peut-être plus fréquentes. Ceci aurait permis d'obtenir une évaluation plus sensible de l'inhibition et cette mesure aurait pu être comparée à la variable d'inhibition. Une telle situation de conduite impliquant une forme d'inhibition plus fine pourrait consister par exemple à placer des panneaux routiers ne concernant pas le véhicule du participant (exemple : sens interdit pour les bus) sur la voie où le participant doit tourner. Cette situation devrait entraîner la nécessité d'inhiber le message non pertinent, ou dans le cas d'un déficit d'inhibition, une difficulté à prendre la décision de tourner à gauche malgré la présence conflictuelle simultanée d'une voie spécifique pour tourner à gauche et du panneau sens interdit.

En résumé, cette situation de tourne-à-gauche en milieu urbain est une situation qui met bien en jeu deux des trois fonctions exécutives supposées, la mise à jour et la flexibilité. En ce qui concerne la composante d'inhibition, nos résultats ne permettent pas de conclure que cette variable est impliquée, cependant, il serait intéressant de proposer une mesure quantitative plus sensible de l'inhibition non seulement dans cette situation de tourne-à-gauche, mais aussi dans l'expérience d'inhibition qui a été discutée plus haut.

2. Effets de la maladie d'Alzheimer sur les fonctions exécutives en conduite

1. Evaluations neuropsychologiques

Nous avons proposé dans notre section théorique plusieurs hypothèses concernant le vieillissement pathologique. La première, portant sur la dégradation du fonctionnement exécutif peut être résumée comme suit : **les performances des patients en stade débutant de maladie d'Alzheimer devaient être dégradées par rapport à celles des participants âgés sains sur les trois composantes exécutives de flexibilité, de mise à jour et d'inhibition.**

Nos résultats indiquent des dégradations pour les trois composantes exécutives choisies en lien avec la modélisation de Miyake *et al.*, la flexibilité, la mise à jour et l'inhibition.

1.1. Flexibilité mentale

Les patients en stade débutant de maladie d'Alzheimer ont obtenu des performances significativement moins bonnes que les participants âgés dans l'épreuve du *PMT*. **Notre hypothèse est donc confirmée concernant la dégradation de la composante de flexibilité dans le début de la maladie d'Alzheimer.** Ces résultats sont d'ailleurs en accord avec les principaux résultats de la littérature qui indiquent une dégradation de la flexibilité mentale bien que, comme nous l'avons souligné dans la section théorique, la composante de flexibilité ne soit que rarement évaluée en tant que telle. En effet, dans les études publiées sur la détérioration du fonctionnement exécutif dans la maladie d'Alzheimer, on ne fait que rarement allusion aux déficits spécifiques de la flexibilité, ou bien lorsque c'est le cas, les tâches utilisées peuvent être complexes.

Cette composante qui était préservée dans le vieillissement normal est donc plus sensible à la démence de type Alzheimer. Sorel et Pennequin (2007) avaient démontré que dans le « début » du vieillissement cognitif normal, la flexibilité (évaluée par le *PMT*) était intacte, mais que les performances étaient dégradées pour des participants plus âgés (au dessus de 75 ans). Il semble donc que la composante de flexibilité soit une fonction qui se dégrade plus lentement que les deux autres dans le vieillissement cognitif normal, mais que la maladie d'Alzheimer accélère cette détérioration. Cependant, il est intéressant de noter que dans leur étude, Sorel et Pennequin, qui ont utilisé une version du *PMT* très similaire à la nôtre, obtiennent des résultats assez éloignés des nôtres, puisque les performances de leurs deux groupes d'âgés sont moins bonnes que celles de notre groupe de participants âgés, mais aussi de notre groupe de patients. Il semblerait que l'échantillon qu'ils ont inclus soit très hétérogène, car la dispersion obtenue est très grande ($SD = 51.73$) pour un échantillon de seulement 16 participants. Le *PMT*, comme bien d'autres mesures neuropsychologiques, semble donc très sensible aux différences interindividuelles.

1.2. Mise à Jour

La composante de mise à jour des informations en mémoire de travail apparaît également comme une **fonction dégradée dès les stades précoces de la maladie d'Alzheimer.** Ce résultat est également particulièrement intéressant puisque, à notre connaissance, peu d'études se sont spécifiquement intéressées avant celle-ci aux déficits particuliers de la mise à jour dans les stades précoces de la maladie d'Alzheimer. Nos résultats sur la tâche de n-back indiquent que les patients ont des performances significativement moins bonnes que celles des participants âgés à la condition $n = 2$, que ce soit en termes de rapidité ou en termes d'exactitude des réponses. Borgo *et al.* avaient également montré des difficultés pour des patients avec maladie d'Alzheimer à mettre à jour et maintenir des informations en mémoire de travail. Cependant, la tâche qu'ils avaient utilisée était beaucoup plus complexe que la nôtre et impliquait une composante d'inhibition très forte.

En effet, la tâche du participant consistait à retenir des listes de mots parmi lesquels les auteurs faisaient varier le nombre de mots à retenir et le nombre de mots à ignorer. La composante d'inhibition des informations était donc fortement impliquée et cette tâche pouvait se rapprocher d'une tâche d'oubli dirigé. Nos résultats, obtenus à partir de la tâche de n-back plus simple et plus pure pour mesurer la mise à jour du contenu de la mémoire de travail, indiquent que cette composante est bien atteinte dans le vieillissement pathologique. De plus, l'analyse de régression que nous avons réalisée sur cette composante indique que les différences de performances entre patients et participants âgés ne peuvent pas être expliquées uniquement par des déficits d'inhibition. La mise à jour n'est donc pas une « sous composante » de l'inhibition. Ce résultat, qui avait été montré dans le vieillissement normal est donc renforcé par les résultats obtenus par le groupe de patients en stade débutant de maladie d'Alzheimer.

1.3. Inhibition

La dernière composante que nous avons analysée dans le cadre de la maladie d'Alzheimer est la composante d'inhibition, évaluée avec le test de Stroop. Comme nous nous y attendions, les patients en stade débutant de maladie d'Alzheimer ont été significativement plus lents et ils ont réalisé plus d'erreurs que les participants contrôles ce qui implique qu'ils présentent des déficits dans la capacité à inhiber l'activité automatique de lecture du mot. Ces résultats sont en accord avec les résultats de la littérature qui indiquent une dégradation générale des processus d'inhibition dans la maladie d'Alzheimer. Les déficits d'inhibition sont donc encore accentués dans la maladie d'Alzheimer par rapport au vieillissement normal, puisque nous avons déjà évoqué que les participants âgés présentaient des difficultés à la tâche de Stroop par rapport aux jeunes. Dès le stade précoce de la maladie d'Alzheimer, on observe donc une augmentation des effets observés dans le vieillissement normal. Par ailleurs, comme c'était le cas pour le vieillissement normal, les analyses de régression réalisées sur la composante d'inhibition indiquent que cette composante est relativement indépendante des deux autres.

En résumé, les dégradations des performances que nous avons observées auprès de notre groupe de patients sur les trois tests spécifiques ainsi que sur les tests plus généraux de la batterie du Grefex (2001) indiquent que le système exécutif est atteint dès le stade précoce de la maladie. En effet, bien que nous nous soyons focalisés dans cette discussion sur les trois composantes exécutives, les résultats obtenus par le groupe de patients et le groupe de témoins âgés aux autres tests de la batterie du Grefex indiquent que ces tests sont sensibles aux dégradations du fonctionnement exécutif dans la maladie d'Alzheimer. Par exemple, le test modifié des six éléments, qui ne montrait pas de différences significatives entre les performances des jeunes et celles des âgés, est sensible aux effets du vieillissement pathologique. C'est d'ailleurs ce qu'indiquent d'autres auteurs, qui estiment que les épreuves plus écologiques telles que ce test des six éléments sont plus pertinentes pour évaluer les déficits présents dans la pathologie, plutôt que dans le vieillissement normal. C'est aussi ce que suggèrent Garden *et al.* qui ont montré que les performances de participants jeunes et âgés étaient significativement différentes sur des « épreuves exécutives structurées » de laboratoire (*WCST* et *SOPT*)

mais pas sur des épreuves plus écologiques, telles que le test des six éléments et le *Multiple Errands Test*. L'une des interprétations proposées par les auteurs est que les mécanismes cérébraux impliqués dans ces deux types d'épreuves n'évolueraient pas de manière semblable dans le début du vieillissement cérébral et que les épreuves écologiques ne sont pas sensibles aux évolutions du vieillissement normal mais le sont pour les dégradations observées dans le vieillissement pathologique.

A la lumière de ces premières conclusions concernant la dégradation du fonctionnement exécutif dans la maladie d'Alzheimer, nous allons à présent nous intéresser aux résultats obtenus dans les différentes situations de conduite proposées aux patients.

2. Evaluations en situation de conduite

Notre seconde hypothèse concernant la maladie d'Alzheimer, suggère que **les trois situations de conduite mises au point dans le but d'évaluer les composantes exécutives impliquées dans la conduite automobile, devaient montrer des dégradations de performances chez les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer par rapport aux participants âgés, de manière similaire à ce qui a été observé dans les évaluations neuropsychologiques**. Chacune des trois composantes a été évaluée à l'aide d'une situation particulière mise au point pour les besoins de l'étude, sur le simulateur de conduite.

2.1. Flexibilité mentale

La situation de conduite qui impliquait alternativement le traitement de la forme et de la couleur des panneaux a montré des effets significatifs entre patients et témoins âgés. Les patients sont significativement plus lents que les âgés dans les trois conditions et la variable de flexibilité apparaît significativement dégradée chez les patients. Ces résultats indiquent que notre mesure de la flexibilité en situation de conduite, qui n'apparaissait pas sensible aux effets du vieillissement normal, permet de détecter des troubles de la flexibilité mentale dans les stades débutants de la maladie d'Alzheimer. Les patients ont également réalisé plus d'erreurs persévératives que les conducteurs témoins, ce qui indique que le ralentissement des temps de réponse ne peut pas être expliqué par le développement d'une stratégie de la part des patients, consistant à répondre mieux en répondant moins vite.

Par ailleurs, l'analyse statistique concernant la vitesse du véhicule indique que les patients n'ont pas été capables de conserver une vitesse de conduite stable au cours de l'épreuve. Alors que les contrôles âgés ont même parfois conduit plus vite dans la situation avec alternance, les patients ont significativement réduit leur vitesse pour réaliser cette tâche. Il est intéressant de noter que la différence de vitesse entre patients et contrôles est faible (et non significative) dans la situation sans alternance ($\Delta = 6.39$ km/h), alors qu'elle augmente significativement en condition avec alternance ($\Delta = 12.99$ km/h). Ceci semble indiquer que les patients ont été gênés par la pression temporelle induite par la situation où il fallait alterner entre les côtés droit et gauche de la route. Afin de réduire

cette pression temporelle, ils ont choisi de diminuer leur vitesse, ce qui leur laissait plus de temps pour répondre à l'apparition des stimuli. Ce phénomène de réduction de la vitesse entre les conditions n'est cependant pas très élevé chez les patients et il pourrait par ailleurs être expliqué par le fait que la plupart des patients ont relevé systématiquement leur pied de l'accélérateur à chaque apparition d'un panneau dans la condition avec alternance, résultat que nous n'avons pas observé dans la condition simple. En effet, durant toute la durée des expériences, une caméra filmait, entre autres, les pieds du conducteur (cf. partie méthodologique) et c'est grâce à ces enregistrements vidéo que nous avons pu observer ce phénomène de relâchement du pied de la pédale d'accélérateur. Ceci leur permettait de réfléchir et d'effectuer le basculement attentionnel pour donner leur réponse. Par ailleurs, le phénomène d'inertie du moteur observé dans le simulateur est différent de celui des véhicules réels et ceci pourrait expliquer que la différence de vitesse observée entre les patients et les témoins ne soit pas très importante. Il est donc tout à fait possible que dans une situation de conduite réelle, le fait de relever très souvent le pied de l'accélérateur aurait entraîné une plus grande variabilité de la vitesse.

Ceci nous laisse suggérer que des situations accidentogènes pourraient être induites par ce phénomène de ralentissement brusque des conducteurs avec des troubles cognitifs, lorsque des informations doivent être traitées alternativement. D'ailleurs, dans une étude récente sur route réelle, *Uc et al.* ont obtenu des résultats similaires. Ils ont en effet réalisé une étude en conduite réelle qui avait pour but d'évaluer les capacités de détection de panneaux de signalisation disposés à droite et à gauche de la route parmi des distracteurs (panneaux publicitaires). Ils ont comparé un groupe de 33 conducteurs en stade précoce de maladie d'Alzheimer à un groupe de 137 conducteurs âgés sains. Les résultats indiquent que les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer ont significativement moins bien réussi la tâche de détection de panneaux cibles, mais aussi qu'ils ont réalisé plus d'erreurs de conduite pendant la recherche des panneaux. Ceci s'est traduit notamment par des ralentissements et des freinages dans des circonstances inappropriées. Par conséquent, comme cela a été indiqué dans la discussion concernant le vieillissement normal, la détection de déficits de flexibilité, que ce soit chez des adultes sans troubles cognitifs ou chez des patients avec début de maladie d'Alzheimer peut s'avérer très importante dans le cadre de l'évaluation de la compétence de conduite.

2.2. Mise à Jour

L'hypothèse proposée concernant la mise à jour des informations a également été validée, puisque les résultats indiquent que les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer ont des performances significativement dégradées par rapport à celles des contrôles âgés dans la situation de conduite avec la tâche de mémorisation et de mise à jour des panneaux routiers. En effet, dans la situation de conduite où il était nécessaire de mémoriser et de rappeler les trois derniers panneaux de la série, les patients avec maladie d'Alzheimer ont eu des performances dégradées par rapport à celles des âgés. Les participants âgés avaient déjà un score de rappel qui était en dessous de celui des jeunes, mais l'écart entre jeunes et âgés était relativement faible par rapport à l'écart que nous avons observé entre les participants âgés et les patients. En effet, les patients ont

rappelé en moyenne 12.5 panneaux sur les 27, ce qui en fait moins de la moitié ($SD = 2.07$). Les difficultés des patients à mémoriser et mettre à jour les informations en mémoire de travail ont donc été particulièrement importantes dans cette tâche écologique. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par la mesure neuropsychologique de la mise à jour, mais ils nous apportent un éclairage supplémentaire. En effet, la tâche de n-back nous a permis de mettre en évidence que les patients étaient particulièrement ralentis par rapport aux participants âgés et qu'ils commettaient plus d'erreurs. Cependant, cette tâche informatisée est très peu écologique et nous avons remarqué que les patients ont eu plus de difficultés que les participants âgés à comprendre et à réaliser ce test. Il est donc possible que la dégradation des performances puisse être expliquée par la difficulté à comprendre la tâche. Alors que dans la situation de conduite, la tâche est apparue beaucoup plus simple à réaliser par les patients. Ils ont facilement compris ce qui leur était demandé et en général, une seule phase d'essais était nécessaire. De plus, dans cette tâche les temps de réponse n'ont pas été enregistrés et il n'était pas demandé aux participants de répondre particulièrement rapidement, ce n'est donc pas la pression temporelle qui a entraîné une détérioration des performances. Les difficultés rencontrées par les patients dans cette expérience sont donc seulement liées à la dégradation du système exécutif et en particulier à la détérioration de leur capacité à mettre à jour les informations en mémoire de travail.

Par ailleurs, la consigne donnée à l'ensemble des participants était de respecter la limitation à 90 km/h ou de respecter la signalisation particulière indiquée par les panneaux. Les participants jeunes et âgés ont globalement conduit plus rapidement (en moyenne 103 km/h pour les jeunes et 100 km/h pour les âgés), alors que les patients ont conduit en moyenne à 86.4 km/h. Cependant, cette diminution de la vitesse n'est pas due à un meilleur respect des limitations de vitesse. En effet, tous les participants conduisaient globalement à la même vitesse pendant la succession des panneaux, mais les patients ont tous systématiquement relevé le pied de l'accélérateur lorsque l'expérimentateur annonçait la phase de rappel (il n'y avait plus de panneaux, mais le participant continuait à conduire). Ce résultat évoque celui observé dans l'expérience de flexibilité où les patients ont systématiquement relevé le pied de l'accélérateur à chaque apparition de panneaux. Les patients ralentissent presque systématiquement lorsqu'ils doivent effectuer un traitement cognitif des informations de l'environnement. Il semble donc que les dégradations du système exécutif entraînent chez les patients, même dans des situations très simples, des difficultés pour gérer l'activité de conduite seule et pour traiter simultanément les informations de l'environnement. Pour pallier cette difficulté, ils ralentissent d'une manière qui peut être inadaptée. Ce résultat est particulièrement important, puisqu'il suggère que les conducteurs en stade précoce de maladie d'Alzheimer, bien qu'ils présentent des troubles du fonctionnement exécutif, opèrent des modifications au niveau de leur comportement de conduite pour pouvoir gérer la situation. Cependant, le problème est que ces modifications de comportement peuvent être inadaptées et qu'elles n'interviennent pas forcément au bon niveau. En effet, comme le suggère Brouwer, chez des conducteurs qui présentent des aptitudes physiques ou cognitives diminuées, il y a des possibilités de compensation aux niveaux tactique et stratégique (réduction de la vitesse, choix des horaires de conduite...) pour améliorer la gestion de la conduite au niveau opérationnel. Cependant, le ralentissement observé chez

les patients intervient de manière saccadée et ne fait pas l'objet d'une régulation globale sur la longueur du trajet dans l'objectif d'une régulation au niveau tactique ; le ralentissement se fait plutôt au dernier moment et uniquement lorsque le conducteur se rend compte qu'il ne pourra pas gérer la situation. Il serait intéressant de réaliser une observation de la conduite en situation réelle afin de vérifier si ce comportement était induit par la conduite sur simulateur ou si ce type de ralentissement intervient aussi lorsque le conducteur doit traiter et mettre à jour de nouvelles informations, ce qui peut être particulièrement dangereux dans certaines conditions de trafic. Des études sur route réelle ont déjà été réalisées et celles de Uc *et al.* (2005) dont nous avons présenté les résultats plus hauts, indiquaient qu'en situation réelle de conduite les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer réalisaient des ralentissements et des freinages tout à fait inappropriés que les expérimentateurs ont qualifié de dangereux. La même équipe a réalisé une autre étude dans laquelle des conducteurs en stade précoce de maladie d'Alzheimer et des conducteurs âgés sains devaient conduire et trouver leur itinéraire à partir d'instructions écrites. Les résultats indiquent que les patients ont réalisé plus d'erreurs de directions mais surtout qu'ils ont eu une conduite jugée plus dangereuse par les expérimentateurs à cause de freinages inappropriés pendant la recherche de leur itinéraire. Nos résultats sur simulateur permettent donc de montrer que les troubles exécutifs des patients peuvent entraîner des erreurs de conduite dans des situations de conduite qui sont pourtant habituelles, comme la recherche et la mémorisation de panneaux.

2.3. Inhibition

Enfin, la troisième composante que nous avons évaluée chez les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer concernait l'inhibition, dans la situation de conduite avec les barrières de passage à niveaux. Contrairement aux résultats observés dans le vieillissement normal, les résultats obtenus auprès des patients montrent que l'inhibition des informations non pertinentes est sensible aux effets de la dégradation pathologique du fonctionnement cognitif. En effet, les patients ont réalisé significativement plus d'erreurs aux barrières où le message était conflictuel par rapport à la position de la barrière et ce, pour les deux types de messages, c'est-à-dire pour le message « Stop avec barrière ouverte » et pour le « message Go avec barrière fermée ». Les participants âgés avaient seulement effectué un peu plus d'erreurs aux items « Stop avec barrière ouverte », ce qui nous avait laissé penser qu'ils réalisaient ces erreurs plutôt par excès de prudence pour être sûr de ne pas entrer en collision avec une barrière. Les résultats obtenus par les patients montrent qu'ils ne sont pas capables d'inhiber le message qui leur est présenté et ils ont réalisé plus de collisions avec des barrières fermées, donc il ne s'agit pas, dans ce cas, d'un comportement montrant une prudence exagérée. Les patients semblent se comporter de manière rigide et réagissent spontanément au message, bien que plusieurs essais aient été réalisés auparavant, dans le but de vérifier que la consigne était parfaitement comprise. Par ailleurs, plusieurs patients, qui se sont arrêtés à la barrière ouverte avec message « Stop », refusaient de repartir car le message « Stop » restait affiché à l'écran tant que le participant ne franchissait pas la barrière. Ce comportement est également un signe de rigidité et d'incapacité à inhiber cette

information qui n'est pourtant pas pertinente au vu de la situation. Comme cela a été décrit dans la section méthodologique, ce protocole expérimental avait été inspiré d'une étude présentée par Rizzo *et al.* . Ces auteurs avaient proposé ce protocole à différents groupes de participants, des patients cérébrolésés, des patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer et des contrôles et leurs résultats sont cohérents avec ceux que nous avons obtenus. Ils ont en effet montré que les patients présentaient des performances significativement dégradées par rapport à celles des contrôles. Les patients en début de maladie d'Alzheimer présentent donc des déficits à la fois dans la capacité à inhiber une réponse prédominante (Stroop) et des difficultés à inhiber une information non pertinente présente dans l'environnement.

Le modèle de l'inhibition proposé par Hasher, Zacks et May décomposait l'inhibition en trois fonctions, d'accès, de suppression et de restriction. Notre protocole expérimental ne nous a pas permis d'évaluer spécifiquement ces trois fonctions puisque notre but était de décomposer uniquement les trois composantes exécutives. Cependant, le test de Stroop nous a permis d'évaluer la fonction de **restriction**, qui est atteinte dans la maladie d'Alzheimer et la situation de conduite avec inhibition a permis d'évaluer la fonction d'**accès**, qui est également atteinte dans la maladie d'Alzheimer. Cette fonction, qui n'apparaissait pas perturbée dans le vieillissement normal, est donc dégradée dès les stades précoces de la maladie d'Alzheimer. Il serait donc intéressant, dans la perspective de recherches futures, de développer un protocole qui permettrait d'évaluer séparément chacune des fonctions d'inhibition. Des applications sur route réelle seraient également intéressantes à développer et nous savons par expérience que ce type de situations où des informations contradictoires sont présentes simultanément dans l'environnement routier existe réellement. Les conducteurs vieillissants, mais aussi les conducteurs distraits, peuvent être sensibles à cette contradiction et rencontrer des difficultés pour gérer ces situations contradictoires ; nous pouvons ainsi citer l'exemple du développement, dans l'agglomération lyonnaise, des intersections avec le tramway, où les barrières peuvent se fermer alors que des feux de signalisation placés juste devant restent au vert, ce qui représente une analogie très proche à la situation que nous avons développée sur simulateur.

En résumé, les trois scénarios de conduite mis au point pour évaluer les trois composantes exécutives montrent donc que les performances des patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer sont dégradées. Comme nous l'avons suggéré dans ces discussions, ces dégradations peuvent entraîner des modifications du comportement de conduite chez les patients, qui pourraient les placer en situation de danger. Il était donc important de mettre en évidence ces différents types de déficits. Cela nous a également permis de montrer que les trois composantes interviennent à des niveaux différents de la conduite, mais que les déficits des patients entraînent chez eux des modifications du comportement à d'autres niveaux, comme le fait qu'ils ralentissent souvent de manière inappropriée, et que ces modifications de comportement pourraient être des sources potentielles d'accident.

2.4. La situation de tourne-à-gauche

La troisième et dernière hypothèse que nous avons proposée concernant la conduite

dans la maladie d'Alzheimer porte sur la situation de tourne à gauche. **Les conducteurs en stade précoce de maladie d'Alzheimer devaient présenter un score de pénalité dans la situation de tourne à gauche plus important que celui des conducteurs âgés sains.**

Les résultats que nous avons obtenus pour la situation de tourne à gauche sont en accord avec cette dernière hypothèse. En effet, les conducteurs en stade précoce de maladie d'Alzheimer ont un score de pénalité de 8.83 en moyenne, ce qui représente le double du score des conducteurs âgés sains (4.78 en moyenne). Malgré la faible taille de notre échantillon de patients (seuls six patients ont pu réaliser la situation de tourne à gauche complète, en raison de sensations du mal du simulateur), il nous semble que la puissance statistique du test non paramétrique de Mann-Whitney soit suffisante pour indiquer que ce résultat est statistiquement significatif ($p < 0.01$).

Dans le vieillissement normal, la moitié du score global de pénalité consistait en des erreurs d'insertion dans le trafic. Ce n'est pas le cas pour les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer. En effet, ils ont réalisé quasiment le même nombre d'erreurs d'insertion que les témoins âgés, ce qui est tout de même un score important, mais qui ne peut pas être expliqué par un déficit spécifique de la maladie d'Alzheimer.

Par ailleurs, nous nous attendions également à ce que les patients réalisent significativement plus d'erreurs de suivi de véhicule⁶, en raison de leurs déficits d'inhibition. Ce sous-score n'apparaît cependant pas significatif entre patients et contrôles âgés. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les patients ont eu plus de difficultés que les âgés dans la gestion de la conduite : ils roulaient beaucoup moins vite, ce qui a entraîné que lorsque le feu passait au vert, ils étaient souvent en retrait de l'intersection et le véhicule placé devant redémarrait rapidement. Ils étaient donc un peu trop loin derrière pour que cela entraîne un comportement automatique de suivi.

En revanche, deux autres sous-scores de pénalité sont apparus significatifs : le sous-score de vérification des rétroviseurs et le sous-score de vérification des feux tricolores. Les patients ont significativement moins vérifié leurs rétroviseurs avant d'effectuer les changements de file et ils ont également réalisé significativement plus de traversées d'intersections sans vérification des feux tricolores. Ce second type d'erreurs pourrait être relié aux déficits de mise à jour des informations en mémoire de travail.

Cependant, le fait qu'ils aient réalisé à la fois des erreurs de vérification des rétroviseurs et des erreurs de vérification des feux tricolores peut également indiquer que les patients présentent en outre des déficits d'exploration visuelle. Dans une étude précédente, nous avons montré que des patients en stade débutant de maladie d'Alzheimer présentaient des troubles de l'exploration visuelle dans une situation réelle de conduite. Dans cette étude, l'exploration visuelle de dix patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer et de dix témoins appariés a été mesurée dans une situation de conduite réelle sur trajet inconnu des participants. Les résultats ont montré que les patients avaient un regard assez figé sur l'exploration du devant de la scène routière avec

⁶ Erreur de suivi de véhicule : conducteur qui suivait le véhicule qui était devant lui dans la voie pour tourner à gauche, sans vérifier que la voie était libre pour pouvoir lui aussi tourner.

significativement moins de regards portés sur les autres éléments importants de la scène routière.

En outre, notre présent travail montre que même lorsque la recherche d'informations dans l'environnement est indispensable pour une gestion correcte de la situation (vérification des rétroviseurs pour un changement de voies, vérification des feux tricolores), elle n'est plus correctement effectuée par les patients. Nous aurions pu penser que ce type d'exploration visuelle relevait de mécanismes automatisés, mais notre expérimentation montre que cette exploration visuelle de la scène reste sous le contrôle du système exécutif et peut donc être soumise aux évolutions dues au vieillissement cognitif pathologique.

C'est notamment ce qu'indiquent Fisk et Sharp qui avaient montré, à l'aide d'une tâche de laboratoire, que des patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer avaient des troubles visuospatiaux et que ces troubles étaient spécifiquement reliés aux déficits exécutifs dont souffraient les patients. Rainville et Passini indiquent également que les fonctions exécutives jouent un rôle important dans les processus visuospatiaux et en particulier lorsque le patient doit se déplacer en milieu non familier.

Cependant, les études portant sur les troubles visuospatiaux sont en général réalisées plutôt sur des trajets piétons et à notre connaissance peu d'études se sont spécifiquement intéressées aux effets des troubles visuospatiaux en conduite. Il serait donc intéressant de prendre en compte ces troubles visuospatiaux et de les mettre en lien avec les déficits exécutifs afin d'évaluer le rôle joué par ces deux systèmes dans l'activité de conduite. Il semblerait ainsi que les études utilisant les paradigmes des labyrinthes puissent apporter des connaissances intéressantes. En effet, plusieurs études ont montré que les performances de résolution de labyrinthes étaient corrélées aux performances de conduite, qu'elles aient été mesurées par auto-évaluation ou par une évaluation sur route réelle .

En conclusion, les résultats que nous avons obtenus à l'aide de nos différents protocoles sur simulateur de conduite, indiquent que les patients en stade précoce de maladie d'Alzheimer présentent des déficits des trois composantes exécutives, de flexibilité, de mise à jour et d'inhibition, qui se traduisent par des performances dégradées dans les situations de conduite que nous avons mises au point. Nos résultats nous permettent de conclure que ces scénarios de conduite simulée sont suffisamment sensibles pour mettre en évidence des déficits exécutifs particuliers. En outre, ces différentes situations de conduite nous ont également permis d'observer des comportements particuliers de la part des conducteurs déments, que nous n'aurions pas pu observer dans une évaluation neuropsychologique des fonctions exécutives. En effet, d'une part les patients ont présenté des difficultés à réaliser les tâches, même lorsqu'elles n'étaient pas sous pression temporelle, et d'autre part nous avons observé des comportements spécifiques de ralentissement, voire de freinage, que nous n'avons pas observé chez les participants âgés. Bien que notre étude n'ait pas pour objectif de proposer une évaluation de la compétence de conduite des participants, elle permet tout de même de suggérer qu'il existe des situations basiques de conduite qu'il serait intéressant d'évaluer chez des conducteurs âgés pour qui l'on soupçonne des troubles de la capacité de conduite.

Conclusions et perspectives

C'est dans un contexte général d'augmentation de la population âgée et d'augmentation du nombre de conducteurs et de conductrices âgés que nous avons réalisé ce travail de recherche. Cette augmentation du nombre de conducteurs âgés mobilise non seulement la communauté scientifique qui cherche à mieux comprendre comment le système cognitif intervient dans cette activité particulière qu'est la conduite automobile et comment il évolue avec l'âge ; mais aussi les pouvoirs publics qui cherchent à évaluer l'impact de ce phénomène sur la société et notamment en termes de sécurité routière.

On sait par ailleurs que l'augmentation du nombre de personnes âgées va de paire avec une augmentation du nombre de personnes atteintes par des pathologies dégénératives. Parmi ces pathologies, la plus fréquente est la maladie d'Alzheimer, qui atteindra bientôt le seuil du million de personnes atteintes en France. Dans les stades précoces de cette maladie, le patient reste indépendant et souhaite préserver le plus longtemps possible son autonomie, ce qui passe notamment par l'utilisation de sa voiture. La communauté scientifique est donc également confrontée à cette problématique de l'augmentation de conducteurs présentant ce type de pathologies qui peuvent avoir un impact sur les aptitudes à conduire. Dans ce contexte général, l'objectif de ce travail de recherche était d'étudier comment les fonctions exécutives évoluent dans le vieillissement cognitif normal ainsi que dans les stades précoces de la maladie d'Alzheimer et d'étudier comment cette évolution du fonctionnement exécutif peut être évaluée dans des situations de conduite.

Dans la première partie de ce travail, nous avons présenté les aspects théoriques

concernant le fonctionnement exécutif, son rôle dans l'activité de conduite, puis nous nous sommes intéressés à la littérature concernant l'évolution de ce système dans le vieillissement normal et dans la maladie d'Alzheimer. Nous avons choisi comme cadre conceptuel du fonctionnement exécutif, le modèle proposé par Miyake *et al.* (2000), qui décomposent le système exécutif en trois sous-composantes de flexibilité, de mise à jour et d'inhibition. Il nous semble en effet que ces trois composantes interviennent de façon importante dans le cadre de l'activité de conduite et nous avons posé comme hypothèse que les difficultés rencontrées par les conducteurs âgés et/ou en stade précoce de démence de type Alzheimer pouvaient être dues à une dégradation du système exécutif et plus particulièrement de ces trois composantes.

A partir d'une évaluation neuropsychologique détaillée de ces trois composantes, nous avons montré que dans le vieillissement normal, les trois composantes exécutives n'évoluent pas de manière identique. En effet, l'une d'entre elle est épargnée dans le début du vieillissement cognitif normal : la flexibilité mentale. Dans les stades précoces de la maladie d'Alzheimer, les trois composantes exécutives évaluées sont apparues dégradées par rapport au vieillissement normal.

Par ailleurs, nous avons mis au point quatre scénarii de conduite sur simulateur de conduite. Trois d'entre eux évaluaient spécifiquement une composante exécutive, le quatrième était une situation plus globale mettant en jeu ces trois composantes. Les résultats indiquent que ces scénarii sur simulateur de conduite étaient tout à fait sensibles et pertinents dans une perspective d'évaluation écologique des déficits exécutifs.

Des améliorations pourraient être apportées à ces scénarii. Nous avons en effet soulevé le problème de la situation de l'inhibition qui, dans le cas du vieillissement normal, n'est pas apparue sensible aux déficits d'inhibition des conducteurs âgés, déficits qui avaient pourtant été montrés dans l'évaluation neuropsychologique. Il serait donc intéressant d'élaborer des situations de conduite qui permettraient de différencier les trois fonctions d'inhibition suggérée par Hasher, Zacks et May (1999). Ceci pourrait permettre de montrer une évolution différentielle des trois fonctions, dans le vieillissement normal et pathologique. Par ailleurs, lors de l'interprétation des résultats concernant la situation de tourne-à-gauche, nous avons suggéré que la notion d'exploration de la scène routière était également un élément important à prendre en compte dans l'évaluation des déficits cognitifs pouvant avoir des répercussions sur la conduite automobile. Dans une perspective d'amélioration de nos scénarios, il serait donc intéressant d'inclure un outil permettant de quantifier cette exploration visuelle et attentionnelle de la scène routière. L'oculométrie pourrait permettre cette mesure quantitative que nous n'avons pas réalisée dans notre travail de recherche.

Bien que l'objectif de notre travail de thèse ne fût pas de proposer un protocole d'évaluation des compétences de conduite, nos résultats pourraient permettre de proposer de nouvelles pistes pour l'amélioration des évaluations existantes. En effet, on sait aujourd'hui que le simple diagnostic de démence ne suffit pas à juger du caractère dangereux de la conduite, et que les évaluations neuropsychologiques sont peu corrélées avec les performances de conduite. Le développement de protocoles sur simulateur présente donc des perspectives intéressantes, notamment si l'on se focalise sur des situations de conduite spécifiques qui impliquent des fonctions cognitives particulières,

comme nous l'avons proposé dans ce travail sur l'implication de trois fonctions exécutives.

Par ailleurs, Les perspectives de recherches concernant les évolutions du système cognitif dans les stades de démence plus avancés mais aussi les stades pré-démenciels ainsi que dans le *MCI* nous semblent importantes à considérer. En effet, les patients que nous avons inclus dans notre étude étaient en stade précoce de maladie d'Alzheimer et étaient encore tout à fait autonomes au moment de leur inclusion dans l'étude. Cependant, la maladie va évoluer de manière certaine et il est important d'être en mesure de proposer bientôt des procédures permettant d'évaluer les compétences de ces conducteurs, dont les capacités cognitives et en particulier les capacités exécutives vont évoluer, et qui vont peut-être devenir des conducteurs dangereux. D'un autre côté, il serait également intéressant de prolonger les efforts de recherche en ce qui concerne les stades dits prédémenciels, pour lesquels l'autonomie du patient n'est pas encore remise en cause. Pour ces patients, il serait intéressant de pouvoir proposer des programmes d'évaluation de la compétence de conduite dans le but de pouvoir développer ensuite des programmes de réadaptation de la conduite. En effet, bien que cette évaluation des aptitudes à la conduite soit nécessaire, la notion de réadaptation nous semble également particulièrement importante à considérer pour les recherches futures. En ce qui concerne les conducteurs présentant une pathologie dégénérative, deux types de réadaptation pourraient être développés. D'une part, les patients en stade prédémenciels pourraient être pris en charge et les entraînements pourraient leur permettre de **maintenir** leurs compétences de conduite à un bon niveau pendant un temps prolongé. D'autre part, pour les patients qui présentent déjà des difficultés de conduite, la réadaptation pourrait leur permettre d'**améliorer** leurs compétences et de retrouver certaines compétence et habitudes de conduite perdues.

Par ailleurs, l'arrêt de la conduite suite à une évaluation négative peut s'avérer très difficile à vivre pour les patients qui présentent des troubles neurologiques. Dans notre étude nous nous sommes focalisés sur une pathologie dégénérative, mais certaines pathologies qui touchent le système exécutif peuvent intervenir chez des personnes jeunes pour qui l'autonomie est encore plus importante à retrouver pour une bonne insertion. C'est le cas notamment des patients cérébrolésés, ou des patients traumatisés crâniens. Pour ces patients, la réadaptation à la conduite est extrêmement importante puisqu'elle va permettre aux patients de retrouver leur autonomie. Dans ce cadre, le développement d'outils sur simulateur de conduite pourrait être un moyen de proposer une bonne réadaptation de la conduite car, après une évaluation précise des fonctions cognitives atteintes, les équipes de réadaptation pourront mettre l'accent sur des scénarios de réadaptation mettant en jeu ces fonctions cognitives précises. Pour pouvoir permettre cette réadaptation « à la carte », il faut cependant être en mesure de décomposer précisément le rôle spécifique de ces fonctions cognitives. Notre travail de recherche apporte des éléments de réponse importants à ce problème et pourrait être approfondis sur d'autres fonctions cognitives par exemple, ou vers une adaptation des scénarios sur route réelle.

Enfin, dans une perspective tout à fait différente d'introduction de systèmes d'aides à la conduite, notre travail de recherche présente également des aspects importants. En effet, si l'on veut développer des systèmes d'assistance à la conduite qui soient pertinents

et utilisables par cette catégorie particulière de conducteurs, il faudra tenir compte à la fois de ces changements cognitifs et aussi de leurs différences individuelles dans l'utilisation des nouvelles technologies. Dans le cadre de ce travail, nous avons par exemple montré que les conducteurs âgés présentaient déjà certaines difficultés en situation de conduite lorsqu'il s'agissait de mettre à jour des informations disponibles dans l'environnement routier. Comme nous l'avons évoqué dans la discussion de nos résultats, ces difficultés de mise à jour des informations routières peuvent perturber l'adaptation du comportement du conducteur dans des situations particulières et donc entraîner une augmentation du risque d'accident. Cette difficulté de mise à jour des informations pourrait ainsi être compensée par un outil d'aide à la conduite qui prendrait le relais pour le stockage et le maintien des informations importantes et les restituerait au conducteur au moment où il doit mettre à jour ces informations. De tels systèmes doivent bien entendu être développés et testés afin d'étudier si leur utilisation serait un réel apport pour le conducteur ou serait un nouvel élément de distraction pour des conducteurs qui peuvent déjà présenter des difficultés de contrôle attentionnel.

Références Bibliographiques

- Adam, S., Van der Linden, M., & Collette, F. (2002). Processus attentionnels et vieillissement normal. In J. Couillet, M. Leclercq, C. Moroni & P. Azouvi (Eds.), *La neuropsychologie de l'attention* (pp. 129-151). Marseille: Solal.
- Adler, G., Rottunda, S., & Dysken, M. (2005). The older driver with dementia: An updated literature review. *Journal of Safety Research*, 36(4), 399-407.
- Amieva, H., Lafont, S., Auriacombe, S., Le Carret, N., Dartigues, J.-F., Orgogozo, J.-M., & Fabrigoule, C. (2002). Inhibitory breakdown and dementia of the Alzheimer type: A general phenomenon? *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology* (Neuropsychology, Development and Cognition: Section A), 24(4), 503-516.
- Amieva, H., Lafont, S., Rouch-Leroyer, I., Rainville, C., & Dartigues, J.-F. (2004a). Evidencing inhibitory deficits in Alzheimer's disease through interference effects and shifting disabilities in the Stroop Test. *Archives of clinical Neuropsychology*, 19(6), 791-803.
- Amieva, H., Phillips, L. H., & Della Sala, S. (2003). Behavioral dysexecutive symptoms in normal aging. *Brain and Cognition*, 53, 129-132.
- Amieva, H., Phillips, L. H., Della Sala, S., & Henry, J. D. (2004b). Inhibitory functioning in Alzheimer's disease. *Brain*, 127(Pt 5), 949-964.
- Andel, R., Gatz, M., Pedersen, N. L., Reynolds, C. A., Johansson, B., & Berg, S. (2001). Deficits in controlled processing may predict dementia: a twin study. *Journal of Gerontology, Psychological Sciences*, 56B(6), 347-355.

- Andres, P., & Van der Linden, M. (2000). Age-related differences in supervisory attentional system functions. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 55(6), 373-380.
- Andres, P., & Van der Linden, M. (2002). Are central executive functions working in patients with focal frontal lesions? *Neuropsychologia*, 40(7), 835-845.
- Andres, P., & Van der Linden, M. (2004). Les capacités d'inhibition: une fonction "frontale"? *Revue Européenne de Psychologie appliquée*, 54, 137-142.
- Anstey, K. J., Wood, J., Lord, S., & Walker, J. G. (2005). Cognitive, sensory and physical factors enabling driving safety in older adults. *Clinical Psychology Review*, 25, 45-65.
- APA. (1994). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders-Fourth edition*. Washington: American Psychiatric Association.
- Arbuthnott, K., & Frank, J. (2000). Trail Making Test, Part B as a measure of executive control: Validation using a set-switching paradigm. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22(4), 518-528.
- Army Individual Test. (1944). *Manual of directions and scoring*. Washington DC: War Department.
- Avons, S. E., Nunn, J. A., Chan, L., & Armstrong, H. (2003). Executive function assessed by memory updating and random generation in schizotypal individuals. *Psychiatry Research*, 120, 145-154.
- Back-Madruga, C., Boone, K. B., Briere, J., Cummings, J., McPherson, S., Fairbanks, L., & Thompson, E. (2002). Functional ability in executive variant Alzheimer's disease and typical Alzheimer's disease. *The Clinical Neuropsychologist*, 16(3), 331-340.
- Baddeley, A. D. (1992). Attention et contrôle en mémoire. In A. D. Baddeley (Ed.), *La Mémoire Humaine, Théorie et Pratique* (pp. 133-158). Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Baddeley, A. D. (1996). Exploring the central executive. *The quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49A(1), 5-28.
- Baddeley, A. D., Bressi, S., Della Sala, S., Logie, R. H., & Spinnler, H. (1991). The decline of working memory in Alzheimer's disease. *Brain*, 114, 2521-2542.
- Baddeley, A. D., Chincotta, D., & Adlam, A. (2001). Working memory and the control of action: evidence from task switching. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(4), 641-657.
- Baddeley, A. D., & Logie, R. H. (1999). Working memory : The multiple-component model. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of Working Memory. Mechanisms of Active Maintenance and Executive Control* (pp. 28-61). Cambridge: Cambridge University Press.
- Ball, K. K., & Owsley, C. (1991). Identifying correlates of accident involvement for the older driver. *Human Factors*, 33(5), 583-595.
- Baudic, S., Traykov, L., Thibaudet, M.-C., Boller, F., & Smagghe, A. (1998). Les déficits mnésiques sont-ils impliqués dans la survenue des troubles des fonctions exécutives au stade précoce de la maladie d'Alzheimer? In M.-C. Gely-Nargeot, K. Ritchie & J. Touchon (Eds.), *Actualités 1998 sur la maladie d'Alzheimer et les syndromes*

- apparentés. Marseille: Solal.
- Baudouin, A., Vanneste, S., Pouthas, V., & Isingrini, M. (2006). Age-related changes in duration reproduction: Involvement of working memory processes. *Brain and Cognition*, 62, 17-23.
- Bayles, K. A. (2003). Effects of working memory deficits on the communicative functioning of Alzheimer's dementia patients. *Journal of Communication Disorders*, 36(3), 209-219.
- Bayles, K. A., Tomoeda, C. K., & Trosset, M. W. (1993). Alzheimer's disease: Effects on Language. *Developmental Neuropsychology*, 9(2), 131-160.
- Bellet, T. (1998). Modélisation et simulation cognitive de l'opérateur humain : une application à la conduite automobile. Doctorat, document non publié, Université René Descartes - Paris V, Paris.
- Belleville, S., Chertkow, H., & Gauthier, S. (2007). Working memory and control of attention in persons with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Neuropsychology*, 21(4), 458-469.
- Bergego, C., & Azouvi, P. (1995). Neuropsychologie des traumatismes crâniens graves de l'adulte. Paris: Frison-Roche.
- Bherer, L., Belleville, S., & Hudon, C. (2004). Le déclin des fonctions exécutives au cours du vieillissement normal, dans la maladie d'Alzheimer et dans la démence frontotemporale. *Psychologie et Neuropsychiatrie du vieillissement*, 2(3), 181-189.
- Binetti, G., Magni, E., Padovani, A., Cappa, S. F., Bianchetti, A., & Trabucchi, M. (1993). Neuropsychological heterogeneity in mild Alzheimer's disease. *Dementia*, 4, 321-326.
- Binetti, G., Magni, E., Padovani, A., Cappa, S. F., Bianchetti, A., & Trabucchi, M. (1996). Executive dysfunction in early Alzheimer's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 60(1), 91-93.
- Birren, J. E., & Schroots, J. J. F. (2001). History of geropsychology. In J. E. Birren & K. W. Schaie (Eds.), *Handbook of the Psychology of Aging* (pp. 3-28). London: Academic press.
- Blanchet, D. (1998). Causes et conséquences du vieillissement. *Cahiers de l'IAURIF: Les défis de l'âge: conséquences du vieillissement de la population*, 121(1), 47-50.
- Borgo, F., Giovannini, L., Moro, R., Semenza, C., Arcicasa, M., & Zaramella, M. (2003). Updating and inhibition processes in working memory: A comparison between Alzheimer's type dementia and frontal lobe focal damage. *Brain and Cognition*, 53(2), 197-201.
- Boujon, C. (2002). L'inhibition, au carrefour des neurosciences et des sciences de la cognition: Fonctionnement normal et pathologique. Marseille: Solal.
- Boujon, C., & Lemoine, K. (2002). Le rôle de l'inhibition dans le contrôle attentionnel des traitements. In C. Boujon (Ed.), *L'inhibition, au carrefour des neurosciences et des sciences de la cognition: Fonctionnement normal et pathologique* (pp. 79-104). Marseille: Solal.
- Broks, P., Lines, C., Atchison, L., Challenor, J., Trau, M., Foster, C., & Sagar, H. (1996). Neuropsychological investigation of anterior and posterior cortical function in

- early-stage probable Alzheimer's disease. *Behavioural Neurology*, 9, 135-148.
- Brouwer, W. H. (2002a). Attention and Driving: a cognitive neuropsychological approach. In P. Zimmermann & M. Leclercq (Eds.), *Applied Neuropsychology of Attention* (pp. 223-248). Hove: Psychology Press.
- Brouwer, W. H. (2002b). Attention et aptitude à la conduite automobile: Approche neuropsychologique. In J. Couillet, M. Leclercq, C. Moroni & P. Azouvi (Eds.), *La Neuropsychologie de l'Attention* (pp. 243-254). Marseille: Solal.
- Brouwer, W. H., & Ponds, R. W. (1994). Driving competence in older persons. *Disability and Rehabilitation*, 16(3), 149-161.
- Brutel, C. (2002). Projections de population à l'horizon 2050: un vieillissement inéluctable. *Economie et Statistique*, 355-356, 57-71.
- Brutel, C., & Omalek, L. (2003). Projections démographiques pour la France, ses régions et ses départements (horizon 2030/2050). *INSEE Résultats Société*, 16, 1-40.
- Bryan, J., & Luszcz, M. A. (1996). Speed of information processing as a mediator between age and free recall performance. *Psychology and Aging*, 11, 3-9.
- Bryan, J., & Luszcz, M. A. (2000). Measurement of executive function: Considerations for detecting adult age differences. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22(1), 40-55.
- Bryan, J., Luszcz, M. A., & Crawford, J. R. (1997). Verbal knowledge and speed of processing as mediators of age differences in verbal fluency performance among older adults. *Psychology and Aging*, 12, 473-478.
- Bugaiska, A., Clarys, D., Jarry, C., Taconnat, L., Tapia, G., Vanneste, S., & Isingrini, M. (2007). The Effect of aging in recollective experience : The processing speed and executive functioning hypothesis. *Consciousness and Cognition*(in press).
- Burgess, P. W., & Shallice, T. (1996). Bizarre responses, rule detection and frontal lobe lesions. *Cortex*, 32, 241-259.
- Burke, D. M. (1997). Language, aging, and inhibitory deficits: Evaluation of a theory. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 52B(6), 254-264.
- Bylsma, F. W. (1997). Simulators for assessing driving skills in demented patients. *Alzheimer Disease and Associated Disorders*, 11 Suppl 1, 17-20.
- Cadet, B. (1998). Processus attentionnels: Activation, Inhibition, Automatisation. In B. Cadet (Ed.), *Psychologie Cognitive* (pp. 140-159). Paris: In Press.
- Caird, J. K., Chilsholm, S. L., Edwards, C. J., & Creaser, J. I. (2005). The effect of amber light onset time on older and younger drivers' perception response time (PRT) and intersection behavior. Paper presented at the Transportation Research Board, 84th annual meeting, Washington, D.C.
- Caird, J. K., & Hancock, H. E. (2002). Left-turn and gap acceptance crashes. In D. R. E & P. L. Olson (Eds.), *Human Factors in Traffic Safety* (pp. 613-652): Lawyers & Judges publishing company.
- Camus, J. F. (1988). La distinction entre les processus contrôlés et automatiques chez Schneider et Shiffrin. In P. Perruchet (Ed.), *les Automatismes cognitifs* (pp. 55-80). Liège: Mardaga.

- Cardebat, D., Doyon, B., Puel, M., Goulet, P., & Joanette, Y. (1990). Évocation lexicale formelle et sémantique chez des sujets normaux: Performances et dynamiques de production en fonction du sexe, de l'âge et du niveau d'étude. *Acta Neurologica Belgica*, 90, 207-217.
- Carr, D. B. (1997). Motor vehicle crashes and drivers with DAT. *Alzheimer Disease and Associated Disorders*, 11 Suppl 1, 38-41.
- Carr, D. B., Duchek, J., & Morris, J. C. (2000). Characteristics of motor vehicle crashes of drivers with dementia of the Alzheimer type. *Journal of the American Geriatrics Society*, 48(1), 18-22.
- Charlton, J. L., Oxley, J., Fildes, B., Oxley, P., Newstead, S., Koppel, S., & O'Hare, M. (2006). Characteristics of older drivers who adopt self-regulatory driving behaviours. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 9(5), 363-373.
- Chicherio, C. (2006). Contrôle exécutif et réseaux neurofonctionnels au cours du vieillissement normal : Un test de l'hypothèse de dé-différenciation cognitive. Thèse de doctorat, document non publié, Université de Genève, Genève.
- Chiu, Y.-C., Algase, D., Whall, A., Liang, J., Liu, H.-C., Lin, K.-N., & Wang, P.-N. (2004). Getting lost: Directed attention and executive functions in early Alzheimer's disease patients. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 17, 174-180.
- Christie, N., Savill, T., Buttress, S., Newby, G., & Tyerman, A. (2001). Assessing fitness to drive after head injury: a survey of clinical psychologists. *Neuropsychological Rehabilitation*, 11(1), 45-55.
- Clare, L. (2002). Developing awareness about awareness in early-stage dementia. *Dementia*, 1(3), 295-312.
- Clarys, D., Bugajska, A., Tapia, G., Baudouin, A., & Isingrini, M. (2007, Septembre). Rôle des fonctions exécutives dans les effets de l'âge sur les états de conscience associés à la récupération en mémoire. Paper presented at the Congrès National de la Société Française de Psychologie, Nantes, France.
- CLIA. (2002). La prudence au volant... en vieillissant. Retrieved 21/02, 2005, from <http://www.isn.net/cliapei/5f.html>
- Collette, F. (2004). Exploration des fonctions exécutives par imagerie cérébrale. In T. Meulemans, F. Collette & M. Van der Linden (Eds.), *Neuropsychologie des Fonctions Exécutives* (pp. 25-51). Marseille: Solal.
- Collette, F., Hogge, M., Salmon, E., & Van der Linden, M. (2006). Exploration of the neural substrates of executive functioning by functional neuroimaging. *Neuroscience*, 139(1), 209-211.
- Collette, F., & Van Der Linden, M. (2002). Processus attentionnels et maladie d'Alzheimer. In J. Couillet, M. Leclercq, C. Moroni & P. Azouvi (Eds.), *La Neuropsychologie de l'attention* (pp. 157-173). Marseille: Solal.
- Collette, F., Van der Linden, M., Laureys, S., Arigoni, F., Delfiore, G., Degueldre, C., Luxen, A., & Salmon, E. (2007). Mapping the updating process : Common and specific brain activations accross different versions of the running span. *Cortex*, 43(1), 146-158.
- Collette, F., Van der Linden, M., Laureys, S., Delfiore, G., Degueldre, C., Luxen, A., &

- Salmon, E. (2005). Exploring the unity and diversity of the neural substrates of executive functioning. *Human Brain Mapping*, 25(4), 409-423.
- Collette, F., Van der Linden, M., & Salmon, E. (1999). Executive Dysfunction in Alzheimer's disease. *Cortex*, 35, 57-72.
- Cotrell, V., & Wild, K. (1999). Longitudinal study of self-imposed driving restrictions and deficit awareness in patients with Alzheimer disease. *Alzheimer Disease and Associated Disorders*, 13(3), 151-156.
- Coulon, N. (2002). Le rôle de l'inhibition dans la résistance à la distraction: Exemple de l'effet Stroop. In C. Boujon (Ed.), *L'inhibition, au carrefour des neurosciences et des sciences de la cognition: Fonctionnement normal et pathologique* (pp. 105-129). Marseille: Solal.
- Cox, D. J., Taylor, P., & Kovatchev, B. (1999). Driving simulation performance predicts future accidents among older drivers. *Journal of American Geriatrics Society*, 47(3), 381-382.
- Crawford, J. R., Bryan, J., Luszcz, M. A., Obonsawin, M. C., & Stewart, L. (2000). The executive decline hypothesis of cognitive aging : Do executive deficits qualify as differential deficits and do they mediate age-related memory decline ? *Aging Neuropsychology and Cognition*, 7, 9-31.
- Croisile, B., Astier, J.-L., & Beaumont, C. (2007). Etalonnage du test des cinq mots dans une population de sujets sains. *Revue Neurologique*, 163(3), 323-333.
- Daigneault, G., Joly, P., & Frigon, J. Y. (2002). Executive functions in the evaluation of accident risk of older drivers. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24(2), 221-238.
- Damasio, A. R. (1995). On some functions of the human prefrontal cortex. *Annals New York Academy of Sciences*, 769, 241-251.
- Dartigues, J.-F., Berr, C., Helmer, C., & Letenneur, L. (2002). Epidémiologie de la maladie d'Alzheimer. *Médecine/Science*, 18, 737-743.
- De Frias, C. M., Dixon, R. A., Fisher, N., & Camicioli, R. (2007). Intraindividual variability in neurocognitive speed: A comparison of Parkinson's disease and normal older adults. *Neuropsychologia*, 45, 2499-2507.
- De Frias, C. M., Dixon, R. A., & Strauss, E. (2006). Structure of four executive functioning tests in healthy older adults. *Neuropsychology*, 20(2), 206-214.
- De Raedt, R., & Ponjaert-Kristoffersen, I. (2000). The relationship between cognitive / neuropsychological factors and car driving performance in older adults. *Journal of American Geriatrics Society*, 48(12), 1664-1668.
- Delarque, A., Bertera-Blanchard, C., Liégeois-Chauvel, C., Ceccaldi, C., & Viton, J.-M. (2000). Conduite adaptée, perception et action. In M. Enjalbert, C. Fattal & A. Thévenon (Eds.), *Conduite automobile et handicap* (pp. 1-21). Paris: Masson.
- Delazer, M., Semenza, C., Reiner, M., Hofer, R., & Benke, T. (2003). Anomia for people names in DAT. Evidence for semantic and post-semantic impairments. *Neuropsychologia*, 41(12), 1593-1598.
- Delis, D. C., Squire, L. R., Bihrlé, A., & Massman, P. (1992). Componential analysis of problem-solving ability : Performance of patients with frontal lobe damage and

- amnesic patients on a new sorting test. *Neuropsychologia*, 30, 683-697.
- Derouesné, C. (1994). L'apport de Luria à la compréhension des conséquences des lésions frontales. *Revue de Neuropsychologie*, 4(3), 273-288.
- Dobbs, A. R. (1997). Evaluating the driving competence of dementia patients. *Alzheimer Disease and Associated Disorders*, 11 Suppl 1, 8-12.
- Dubinsky, R. M., Stein, A. C., & Lyons, K. (2000). Practice parameter: risk of driving and Alzheimer's disease (an evidence-based review): report of the quality standards subcommittee of the American Academy of Neurology. *Neurology*, 54(12), 2205-2211.
- Dubois, B. (2001). L'Epreuve des cinq mots. Fiche Technique. *Neurologie-Psychiatrie-Gériatrie*, 1, 40-42.
- Dubois, B., Pillon, B., & Sirigu, A. (1998). Fonctions intégratrices et cortex préfrontal chez l'homme. In X. Seron & M. Jeannerod (Eds.), *Neuropsychologie Humaine* (pp. 453-469). Liège: Mardaga.
- Duchek, J., Hunt, L., Ball, K., Buckles, V., & Morris, J. C. (1997). The role of selective attention in driving and dementia of the Alzheimer type. *Alzheimer Disease and Associated Disorders*, 11, 48-56.
- Duchek, J. M., Carr, D. B., Hunt, L., Roe, C. M., Xiong, C., Shah, K., & Morris, J. C. (2003). Longitudinal driving performance in early-stage dementia of the Alzheimer type. *Journal of American Geriatric Society*, 51(10), 1342-1347.
- Duyckaerts, C., Colle, M. A., Delatour, B., & Hauw, J. J. (1999). Maladie d'Alzheimer : les lésions et leur progression. *Revue Neurologique*, 155 Suppl 4, 17-27.
- Edwards, C. J., Creaser, J. I., Caird, J. K., Lamsdale, A. M., & Chisholm, S. L. (2003, March). Older and younger driver performance at complex intersections: implications for using perception-response time and driving simulation. Paper presented at the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Park City, Utah.
- Ergis, A. M., Van der Linden, M., & Deweer, B. (1994). L'exploration des troubles de la mémoire épisodique dans la maladie d'Alzheimer débutante au moyen d'une épreuve de rappel indicé. *Revue de Neuropsychologie*, 4, 47-68.
- Etienne, V. (2003). Les déficits attentionnels liés au vieillissement pathologique dans la conduite automobile: la Maladie d'Alzheimer. Mémoire de Maîtrise de Sciences Cognitives, document non publié, Université Lumière, Lyon.
- Etienne, V. (2004). Déficits Exécutifs, Conduite Automobile et Maladie d'Alzheimer: Etude sur Simulateur de Conduite. Mémoire de DEA de Neuropsychologie, document non publié, Université Lumière, Lyon.
- Etienne, V., & Marin-Lamellet, C. (2005, décembre). Déficits Attentionnels dans le maladie d'Alzheimer et Conduite Automobile. Paper presented at the 8ème Réunion francophone sur la Maladie d'Alzheimer et les syndromes apparentés, Saint Etienne.
- Etienne, V., & Marin-Lamellet, C. (2007, Juin). Mental flexibility impairment in drivers with early Alzheimer's disease: A driving simulator approach. Paper presented at the 3rd Young Researchers Seminar of ECTRI, Brno, Czech Republic.
- Etienne, V., Marin-Lamellet, C., & Laurent, B. (2006). Impairments of Executive

- Functions in Drivers with Early Alzheimer's Disease : a Driving Simulator Approach. Paper presented at the 26th International Conference of Applied Psychology, Athens.
- Ettenhofer, M. L., Hambrick, D. Z., & Abeles, N. (2006). Reliability and stability of executive functioning in older adults. *Neuropsychology*, 20(5), 607-613.
- Eustache, F., & Desgranges, B. (1997). Les systèmes de mémoire dans la maladie d'Alzheimer. *Psychologie Française*, 42(4), 391-402.
- Eustache, F., Desgranges, B., & Baron, J.-C. (1999). Les substrats neuronaux des altérations cognitives liées à la maladie d'Alzheimer et au vieillissement normal: Etudes par tomographie à émission de positons. *Médecine Sciences*, 15, 467-474.
- Fabrigoule, C., Rouch, I., Taberly, A., Letenneur, L., Commenges, D., Mazaux, J. M., Orgogozo, J. M., & Dartigues, J. F. (1998). Cognitive process in preclinical phase of dementia. *Brain*, 121, 135-141.
- Fisk, J. E., & Sharp, C. A. (2003). The role of the executive system in visuo-spatial memory functioning. *Brain and Cognition*, 52(3), 364-381.
- Fisk, J. E., & Sharp, C. A. (2004). Age-related impairment in executive functioning : Updating, inhibition, shifting and access. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 26(7), 874-890.
- Folstein, M. F., Folstein, S. E., & Mchugh, P. R. (1975). Mini Mental State: A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12, 189-198.
- Fontaine, H. (2003). Âge des conducteurs de voiture et accidents de la route: Quel risque pour les séniors ? *Recherche, Transports, Sécurité*, 79, 107-120.
- Fontaine, R. (1999a). Introduction. In R. Fontaine (Ed.), *Manuel de psychologie du vieillissement* (pp. 3-8). Paris: Dunod.
- Fontaine, R. (1999b). Le vieillissement de l'intelligence. In R. Fontaine (Ed.), *Manuel de Psychologie du Vieillessement* (pp. 83-121). Paris: Dunod.
- Fontaine, R. (1999c). *Manuel de Psychologie du vieillissement*. Paris: Dunod.
- Fox, G. K., Bowden, S. C., Bashford, G. M., & Smith, D. S. (1997). Alzheimer's disease and driving: prediction and assessment of driving performance. *Journal of the American Geriatrics Society*, 45(8), 949-953.
- Freedman, M. L., & Freedman, D. L. (1996). Should Alzheimer's disease patients be allowed to drive? A medical, legal, and ethical dilemma. *Journal of American Geriatric Society*, 44(7), 876-877.
- Freund, B., Colgrove, L. A., Petrakos, D., & McLeod, R. (2007). In my car the brake is on the right : Pedal errors among older drivers. *Accident Analysis & Prevention*, in press, corrected proof.
- Freund, B., Gravenstein, S., Ferris, R., Burke, B. L., & Shaheen, E. (2005). Drawing clocks and driving cars. *Journal of General Internal Medicine*, 20(3), 240-244.
- Freund, B., Gravenstein, S., Ferris, R., & Shaheen, E. (2002). Evaluating driving performance of cognitively impaired and healthy older adults: a pilot study comparing on-road testing and driving simulation. *Journal of American Geriatrics Society*, 50(7), 1309-1310.

- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The relations among inhibition and interference control functions: A latent-variable analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(1), 101-135.
- Gabaude, C. (2003). Exploration des capacités visuelles et attentionnelles des conducteurs âgés: Intérêts et techniques. *Recherche Transport et Sécurité*, 81, 165-176.
- Garden, S. E., Phillips, L. H., & MacPherson, S. E. (2001). Midlife aging, open-ended planning, and laboratory measures of executive function. *Neuropsychology*, 15(4), 472-482.
- Gil, R. (2000). Neuropsychologie des démences. In R. Gil (Ed.), *Neuropsychologie* (pp. 211-250). Paris: Masson.
- Godefroy, O. (2003). Frontal syndrome and disorders of executive functions. *Journal of Neurology*, 250(1), 1-6.
- Godefroy, O., Cabaret, M., Petit-Chenal, V., Pruvo, J.-P., & Rousseaux, M. (1999). Control functions of the frontal lobes. Modularity of the central-supervisory system? *Cortex*, 35(1), 1-20.
- Godefroy, O., & Grefex. (2004). Syndromes frontaux et dysexécutifs. *Revue Neurologique*, 160(10), 899-909.
- Godefroy, O., Lhullier, C., & Rousseaux, M. (1996). Non-spatial attention disorders in patients with prefrontal or posterior brain damage. *Brain*, 119, 191-202.
- Godefroy, O., Roussel-Pierronne, M., Routier, A., & Dupuy-Sonntag, D. (2004). Etude neuropsychologique des fonctions exécutives. In T. Meulemans, F. Collette & M. Van der Linden (Eds.), *Neuropsychologie des Fonctions Exécutives* (pp. 11-23). Marseille: Solal.
- Gorrie, C. A., Rodriguez, M., Sachdev, P., Duflou, J., & Waite, P. M. E. (2007). Mild neuritic changes are increased in the brains of fatally injured older motor vehicle drivers. *Accident Analysis & Prevention*, In Press, Corrected Proof.
- Grefex. (2001). L'évaluation des fonctions exécutives en pratique clinique. *Revue de Neuropsychologie*, 11(3), 383-433.
- Gruau, S., Pottier, A., Davenne, D., & Denise, P. (2003). Les facteurs d'accidents de la route par somnolence chez les conducteurs âgés: Prévention par l'activité physique. *Recherche, Transports, Sécurité*, 79-80, 134-144.
- Gurd, J. M., Amunts, K., Weis, P. H., Zafiris, O., Zilles, K., Marshall, J. C., & Fink, G. R. (2002). Posterior parietal cortex is implicated in continuous switching between verbal fluency tasks : An fMRI study with clinical implications. *Brain*, 125, 1024-1038.
- Habib, M., & Poncet, M. (1998). Neuropsychologie des démences : Démence, maladie d'Alzheimer et syndromes apparentés. In X. Seron & M. Jeannerod (Eds.), *Neuropsychologie Humaine* (pp. 529-557). Liège: Mardaga.
- Hagenmeyer, L., & Sommer, S. (2004, Septembre). Driving Simulation and older driver assessment : Preliminary design recommendations based on a usability study. Paper presented at the Driving Simulation Conference, Paris.
- Hakamies-Blomqvist, L., & Peters, B. (2000). Recent European research on older drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 32(4), 601-607.

- Hakamies-Blomqvist, L., Raitanen, T., & O'Neill, D. (2002). Driver ageing does not cause higher accident rates per km. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5(4), 271-274.
- Hakamies-Blomqvist, L., & Siren, A. (2003). Deconstructing a gender difference: Driving cessation and personal driving history of older women. *Journal of Safety Research*, 34(4), 383-388.
- Harnishfeger, K. K. (1995). The development of cognitive inhibition : Theories, definitions and research evidence. In F. N. Dempster & C. J. Brainerd (Eds.), *Interference and inhibition in cognition*. San Diego, Ca: Academic Press.
- Hartman, M., Dumas, J., & Nielsen, C. (2001). Age differences in updating working memory: Evidence from the delayed-matching-to-sample Test. *Aging Neuropsychology and Cognition*, 8(1), 14-35.
- Harvey, P. O., Le Bastard, G., Pochon, J. B., Levy, R., Allilaire, J. F., Dubois, B., & Fossati, P. (2004). Executive functions and updating of the contents of working memory in unipolar depression. *Journal of Psychiatric Research*, 38(6), 567-576.
- Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988). Working memory, comprehension and aging: a review and a new view. *The Psychology of learning and motivation*, 22, 193-225.
- Hasher, L., Zacks, R. T., & May, C. P. (1999). Inhibitory control, circadian arousal and age. In D. Gopher & A. Koriat (Eds.), *Cognitive regulation of performance : Interaction of theory and application* (pp. 653-675). Cambridge: MIT Press.
- Hirshorn, E., & Thompson-Schill, S. L. (2006). Role of the left inferior frontal gyrus in covert word retrieval : Neural correlates of switching during verbal fluency. *Neuropsychologia*, 44, 2547-2557.
- Ho, G., Scialfa, C. T., Caird, J. K., & Graw, T. (2001). Visual search for traffic signs: The effect of clutter, luminance and Aging. *Human Factors*, 43(2), 194-207.
- Hoffman Snyder, C. (2005). Dementia and driving: Autonomy versus safety. *Journal of the American Academy of nurse Practitioners*, 17(10), 393-402.
- Horn, J. L., & Cattell, R. B. (1967). Age differences in fluid and crystallized intelligence. *Acta Psychologica*, 26, 107-129.
- Houghton, G., & Tipper, S. P. (1994). A model of inhibitory mechanisms in selective attention. In D. Dagenbach & T. H. Care (Eds.), *Inhibitory Processes in Attention, Memory, and Language* (pp. 53-112). San Diego, Calif., USA: Academic Press.
- Howell, D. C. (1998). *Méthodes Statistiques en Sciences Humaines* (M. Rogier, Trans.). Bruxelles: De Boeck.
- Huguenin, R., & Rumar, K. (2001). Models in Traffic Psychology. In P.-E. Barjonnet (Ed.), *Traffic Psychology Today* (pp. 31-62). Boston: Kluwer Academic publishers.
- Hupet, M., & Schelstraete, M.-A. (1997). Les effets du vieillissement sur le langage : Effets de processus spécifiques ou généraux ? *Psychologie Française*, 42(4), 309-308.
- Hupet, M., & Van der Linden, M. (1994). L'étude du vieillissement cognitif: aspects théoriques et méthodologiques. In M. Van der Linden & M. Hupet (Eds.), *Le Vieillissement cognitif* (pp. 9-35). Paris: Presses Universitaires de France.
- Huteau, M. (1995). Les différences individuelles dans le domaines de l'intelligence. In

- M. Huteau (Ed.), *Manuel de Psychologie différentielle* (pp. 39-89). Paris: Dunod.
- Innes, C. R. H., Jones, R. D., Dalrymple-Alford, J. C., Hayes, S., Hollobon, S., Severinsen, J., Smith, G., Nicholls, A., & Anderson, T. J. (2007). Sensory-motor and cognitive tests predict driving ability of persons with brain disorders. *Journal of the Neurological Sciences*, 260(1-2), 188-198.
- Isingrini, M. (2004). Fonctions exécutives, mémoire et métamémoire dans le vieillissement normal. In T. Meulemans, F. Collette & M. Van der Linden (Eds.), *Neuropsychologie des Fonctions Exécutives* (pp. 79-108). Marseille: Solal.
- Johansson, K., Bogdanovic, N., Kalimo, H., Winblad, B., & Viitanen, M. (1997). Alzheimer's disease and apolipoprotein E epsilon-4 allele in older drivers who died in automobile accidents. *The Lancet*, 349, 1143-1144.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal Of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220.
- Kensinger, E. A., Shearer, D. K., Locascio, J. J., Growdon, J. H., & Corkin, S. (2003). Working memory in mild Alzheimer's disease and early Parkinson's disease. *Neuropsychology*, 17(2), 230-239.
- Keys, B. A., & White, D. (2000). Exploring the relationship between age, executive abilities, and psychomotor speed. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 6, 76-82.
- Kieras, D. E., Meyer, D. E., Mueller, S., & Seymour, T. (1999). Insights into Working Memory from the perspective of the EPIC architecture for modeling skilled perceptual-motor and cognitive human performance. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of Working Memory. Mechanisms of Active Maintenance and Executive Control* (pp. 183-223). Cambridge: Cambridge University Press.
- Koechlin, E., Basso, G., Pietrini, P., Panzer, S., & Grafman, J. (1999). The Role of the Anterior Prefrontal Cortex in Human Cognition. *Nature*, 399, 148-151.
- Korteling, J. E., & Kaptein, N. A. (1996). Neuropsychological driving fitness tests for brain-damaged subjects. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 77(2), 138-146.
- Kortte, K. B., Horner, M. D., & Windham, W. K. (2002). The Trail Making Test, Part B: Cognitive flexibility or ability to maintain set? *Applied Neuropsychology*, 9(2), 106-109.
- Kotler-Cope, S., & Camp, C. J. (1995). Anosognosia in Alzheimer disease. *Alzheimer Disease and Associated Disorders*, 9(1), 52-56.
- Kramer, A. F., Hahn, S., & Gopher, D. (1999). Task coordination and aging: explorations of executive control processes in the task switching paradigm. *Acta Psychologica*, 101(2-3), 339-378.
- Kray, J. (2006). Task-set switching under cue-based versus memory-based switching conditions in younger and older adults. *Brain Research*, 1105, 83-92.
- Kray, J., Li, K. Z. H., & Lindenberger, U. (2002). Age-related changes in task-switching components : The role of task uncertainty. *Brain and Cognition*, 49, 363-381.
- Lafont, S., & Laumon, B. (2003). Vieillesse et gravité des atteintes lésionnelles des

- victimes d'accident de la circulation routière. Recherche, Transports, Sécurité, 79-80, 121-133.
- Larson, G. E., Merritt, C. R., & Williams, S. E. (1988). Information processing and intelligence : Some implications of task complexity. *Intelligence*, 12, 131-147.
- Laurent, B., & Thomas-Anterion, C. (2002). Incertitudes et limites du MCI. Apport de la Neuropsychologie. *Revue Neurologique*, 158(suppl. 10), S11-S20.
- Le Bouedec, B., Martins, D., Iralde, I., Gauthier, K., & Delaporte, A. (2002). L'inhibition dans le vieillissement normal. In C. Boujon (Ed.), *L'inhibition, au carrefour des neurosciences et des sciences de la cognition: Fonctionnement normal et pathologique* (pp. 133-157). Marseille: Solal.
- Lee, H. C., Cameron, D., & Lee, A. H. (2003). Assessing the driving performance of older adult drivers: on-road versus simulated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 35(5), 797-803.
- Lehto, J. (1996). Are executive function tests dependant on working memory capacity ? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49 A, 29-50.
- Levy, R. (2003). Fonctions exécutives et démences. *Revue Neurologique*, 10(2), 5.
- Lezak, M. D. (1982). The problem of assessing executive functions. *International Journal of Psychology*, 17, 281-297.
- Lezak, M. D., Le Gall, D., & Aubin, G. (1994). Evaluation des fonctions exécutives lors des atteintes des lobes frontaux. *Revue de Neuropsychologie*, 4(3), 327-343.
- Lhermitte, F., Pillon, B., & Serdaru, M. (1986). Human autonomy and the frontal lobes. Part I: Imitation and utilization behavior : A neuropsychological study of 75 patients. *Annals of Neurology*, 19(4), 326-334.
- Little, D. M., & Hartley, A. A. (2000). Further evidence that negative priming in the Stroop color-word task is equivalent in older and younger adults. *Psychology of Aging*, 15(1), 9-17.
- Lobo, A., Launer, L. J., Fratiglioni, L., Andersen, K., Di Carlo, A., Breteler, M. M., Copeland, J. R., Dartigues, J.-F., Jagger, C., Martinez-Lage, J., Soininen, H., & Hofman, A. (2000). Prevalence of dementia and major subtypes in Europe: A collaborative study of population-based cohorts. *Neurologic Diseases in the Elderly Research Group*. *Neurology*, 54(11 suppl 5), S4-9.
- Logan, G. D. (1994). On the ability to inhibit thought and action : A user's guide to the stop signal paradigm. In D. Dagenbach & T. H. Carr (Eds.), *Inhibitory processes in attention memory and language* (pp. 189-239). Hove: Psychology Press.
- Lovett, M. C., Reder, L. M., & Lebiere, C. (1999). Modeling working memory in a unified architecture. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of Working Memory. Mechanisms of Active Maintenance and Executive Control* (pp. 135-182). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lundqvist, A. (2001). Neuropsychological aspects of driving characteristics. *Brain Injury*, 15(11), 981-994.
- Luria, A. R. (1970). The functional organization of the brain. *Scientific American*, 222, 66-78.
- Luria, A. R. (1978). The localization of function in the brain. *Biological Psychiatry*, 13(6),

633-635.

- Luria, A. R., Simernitskaya, E. G., & Tubylevich, B. (1970). The structure of psychological processes in relation to cerebral organization. *Neuropsychologia*, 8, 13-19.
- Lustig, C., Hasher, L., & Tonev, S. T. (2001). Inhibitory control over the present and the past. *European Journal of Cognitive Psychology*, 13(1-2), 107-122.
- Lyman, S., Ferguson, S. A., Braver, E. R., & Williams, A. F. (2002). Older driver involvements in police reported crashes and fatal crashes: trends and projections. *Injury Prevention*, 8, 116-120.
- Man-Son-Hing, M., Marshall, S. C., Molnar, F. J., & Wilson, K. G. (2007). Systematic review of driving risk and the efficacy of compensatory strategies in persons with dementia. *Journal of American Geriatrics Society*, 55(6), 878-884.
- Marshall, S. C., Man-Son-Hing, M., Molnar, F., Wilson, K. G., & Blair, R. (2007). The acceptability to older drivers of different types of licensing restriction. *Accident Analysis & Prevention*, 39, 776-793.
- Maurer, K., Volk, S., & Gerbaldo, H. (2003). Auguste D: la première patiente du Docteur Alzheimer. *La Recherche, Hors Série n°10*, 12-15.
- Mazer, B. L., Gelinas, I., & Benoit, D. (2004). Evaluating and retraining driving performance in clients with disabilities. *Critical Reviews in Physical and Rehabilitation Medicine*, 16(4), 291-326.
- McDowd, J. M. (1997). Inhibition in attention and aging. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 52B(6), 265-273.
- McDowd, J. M., Oseas-Kreger, D. M., & Filion, D. I. (1995). Inhibitory processes in cognition and aging. In F. N. Dempster & C. J. Brainerd (Eds.), *Interference and Inhibition in Cognition* (pp. 363-397). San diego: Academic Press.
- McGehee, D. V., Lee, J. D., Rizzo, M., & Bateman, K. (2001). Examination of older driver steering adaptation on a high performance driving simulator. Paper presented at the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Aspen, Colo.
- McGwin, G., Chapman, V., & Owsley, C. (2000). Visual risk factors for driving difficulty among older drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 32(6), 735-744.
- McKhann, G., Drachman, D., Folstein, M., Katzman, R., Price, D., & Stadlan, E. M. (1984). Clinical diagnosis of Alzheimer's disease: report of the NINCDS-ADRDA Work Group under the auspices of Department of Health and Human Services Task Force on Alzheimer's Disease. *Neurology*, 34(7), 939-944.
- Meulemans, T. (2006). Les fonctions exécutives : Approche théorique. In P. Pradat-Diehl, P. Azouvi & V. Brun (Eds.), *Fonctions exécutives et Rééducation* (pp. 1-10). Paris: Masson.
- Michelon, J. (2001). Transports urbains et personnes à mobilité réduite : une alchimie à trouver : propositions pour une politique efficiente d'accessibilité au système de transport de l'agglomération valentinoise. *Mémoire du DESS Urbanisme et Aménagement*, document non publié, IUG.
- Michon, J. A. (1979). *Dealing with danger* (No. Traffic Research Centre Report

- VK-79-01). Groningen: University of Groningen.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 167-202.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: a latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100.
- Miyake, A., & Shah, P. (1999). *Models of Working Memory: Mechanisms of Active Maintenance and Executive Control*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 134-140.
- Morris, J. C. (1984). The Clinical Dementia Rating (CDR) : Current version and scoring rules. *Neurology*, 4, 1983-1984.
- Morris, N., & Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory: The role of the central executive. *British Journal of Psychology*, 81, 111-121.
- Näätänen, R. (1992). What is Attention? In R. Näätänen (Ed.), *Attention and Brain Functions* (pp. 1-10). Hillsdale: Erlbaum Associate Publishers.
- Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive Psychology*, 9, 353-383.
- Neboit, M. (1980). L'exploration visuelle dans l'apprentissage de tâches complexes : L'exemple de la conduite automobile. Thèse de doctorat, document non publié, Ecole Pratique des Hautes Etudes, Paris.
- Nedjam, Z., Devouche, E., & Dalla Barba, G. (2004). Confabulation, but not executive dysfunction discriminate AD from frontotemporal dementia. *European Journal of Neurology*, 11, 728-733.
- Nelson, H. E. (1976). A modified card sorting test sensitive to frontal lobe defects. *Cortex*, 12(4), 313-324.
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action: willed and automatic control of behavior. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and Self-Regulation* (Vol. 4, pp. 1-18). New York and London: Plenum Press.
- Obriot-Claudiel, F., Gabaude, C., & Marquié, J.-C. (2005, Mars). Vieillesse cognitive et conduite automobile: prise de conscience des changements liés à l'âge et processus d'optimisation. Paper presented at the Séminaire du Sous-Réseau Attention, Lyon.
- OCDE. (2001). *Vieillesse et transports : Concilier mobilité et sécurité*: OCDE.
- Olzak, M., Laskowska, I., Jelonek, J., Michalak, M., Szolna, A., Gryz, J., Harat, M., & Gorzelanczyk, E. J. (2006). Psychomotor and executive functioning after unilateral posteroventral pallidotomy in patients with Parkinson's disease. *Journal of the Neurological Sciences*, 248(1-2), 97-103.
- Ott, B. R., Heindel, W. C., Whelihan, W. M., Caron, M. D., Piatt, A. L., & DiCarlo, M. A. (2003). Maze test performance and reported driving ability in early dementia. *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology*, 16(3), 151-155.
- Ott, B. R., Heindel, W. C., Whelihan, W. M., Caron, M. D., Piatt, A. L., & Noto, R. B.

- (2000). A single-photon emission computed tomography imaging study of driving impairment in patients with Alzheimer's disease. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 11(3), 153-160.
- Owens, J. M., & Lehman, R. (2001). The effects of age and distraction on reaction time in a driving simulator. Paper presented at the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Aspen, Colorado.
- Paire-Ficout, L. (2006). Les troubles de l'équilibre. . In A. Chapon, C. Gabaude & A. Fort (Eds.), *Défauts d'attention et conduite automobile* (Vol. 52): Les collections de l'INRETS.
- Paire-Ficout, L., Gabaude, C., & Marin-Lamellet, C. (2004). *Vieillesse et Sécurité Routière* (No. Rapport de fin de convention CNSR n°02/013/T): INRETS.
- Palladino, P., Cornoldi, C., De Beni, R., & Pazzaglia, F. (2001). Working memory and updating processes in reading comprehension. *Memory and Cognition*, 29(2), 344-354.
- Parasuraman, R., & Nestor, P. G. (1991). Attention and driving skills in aging and Alzheimer's disease. *Human Factors*, 33(5), 539-557.
- Pardo, J. V., Lee, J. T., Sheikh, S. A., Surerus-Johnson, C., Shah, H., Munch, K. R., Carlis, J. V., Lewis, S. M., Kuskowski, M., & Dysken, M. (2007). Where the brain grows old : Decline in anterior cingulate and medial prefrontal function with normal aging. *NeuroImage*, 35, 1231-1237.
- Park, D. C. (1999). The basic mechanisms accounting for age-related decline in cognitive function. In D. C. Park & N. Schwarz (Eds.), *Cognitive Aging : A Primer* (pp. 3-21): Psychology Press.
- Passini, R., Joannette, Y., Rainville, C., & Marchand, N. (1999). Wayfinding and information processing in dementia. In H. J. G. Zwaga, T. Boersema & H. C. M. Hoonhout (Eds.), *Visual information for everyday use* (pp. 267-273). London: Taylor and Francis.
- Passini, R., Rainville, C., Marchand, N., Joannette, Y., & Lepage, Y. (1997). Les déficits des opérations spatio-cognitives dans la démence de type Alzheimer. *Revue de Neuropsychologie*, 7(3), 247-279.
- Passolunghi, M. C., & Pazzaglia, F. (2005). A comparison of updating processes in children good or poor in arithmetic word problem-solving. *Learning and Individual Differences*, 15(4), 257-269.
- Perrotin, A., Isingrini, M., Souchay, C., Clarys, D., & Tacconat, L. (2006). Episodic feeling-of-knowing accuracy and cued recall in the elderly: Evidence for double dissociation involving executive functioning and processing speed. *Acta Psychologica*, 122, 58-73.
- Perry, R. J., & Hodges, J. R. (1999). Attention and executive deficits in Alzheimer's disease. A critical review. *Brain*, 122(3), 383-404.
- Perry, R. J., Watson, P., & Hodges, J. R. (2000). The nature and staging of attention dysfunction in early (minimal and mild) Alzheimer's disease: relationship to episodic and semantic memory impairment. *Neuropsychologia*, 38(3), 252-271.

- Persad, C. C., Abeles, N., Zacks, R. T., & Denburg, N. L. (2002). Inhibitory changes after age 60 and their relationship to measures of attention and memory. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 57(3), P223-P232.
- Phillips, L. H., & Della Sala, S. (1998). Aging, intelligence and anatomical segregation in the frontal lobes. *Learning and Individual Differences*, 10(3), 217-243.
- Pietras, T., Shi, Q., & Rizzo, M. (2005, Janvier). Traffic Entry behavior in older drivers with selective attention impairment. Paper presented at the Transportation Research board, 84th Annual Meeting, Washington D.C.
- Piquard, A., Derouesné, C., Lacomblez, L., & Siéroff, E. (2004). Planification et activités de la vie quotidienne dans la Maladie d'Alzheimer et les dégénérescences frontotemporales. *Psychologie et Neuropsychiatrie du vieillissement*, 2(2), 147-156.
- Plancade, J.-P. (1999). Conséquences macroéconomiques du vieillissement démographique (Rapport d'Information No. 143). Paris: Sénat.
- Pradat-Diehl, P., Azouvi, P., & Brun, V. (2006). *Fonctions exécutives et rééducation*. Paris: Masson.
- Prigatano, G. P., & Altman, I. M. (1990). Impaired awareness of behavioral limitations after traumatic brain injury. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 71, 1058-1064.
- Rainville, C., Giroire, J.-M., Periot, M., Cuny, E., & Mazaux, J.-M. (2003). The impact of right subcortical lesions on executive functions and spatio-cognitive abilities : A case study. *Neurocase*, 9(4), 356-367.
- Rainville, C., Joubert, S., Felican, o., Chabanne, V., Ceccaldi, M., & Péruch, P. (2005). Wayfinding in familiar and unfamiliar environments in a case of progressive topographical agnosia. *Neurocase*, 11, 297-309.
- Rainville, C., Marchand, N., & Passini, R. (2002). Performances of patients with a dementia of the Alzheimer type in the standardized Road-Map test of Direction Sense. *Neuropsychologia*, 40, 567-573.
- Rainville, C., & Passini, R. (2005). Communication, résolution de problème et démence. Orientation spatiale dans la maladie d'Alzheimer. In B.-F. Michel, F. Verdureau & P. Combet (Eds.), *Communication et Démence* (pp. 137-159). Marseille: Solal.
- Rainville, C., Passini, R., & Marchand, N. (2001). A multiple case study of wayfinding in dementia of the Alzheimer type : Decision making. *Aging, Neuropsychology, and Cognition (Neuropsychology, Development and Cognition: Section B)*, 8(1), 54-71.
- Ramaroson, H., Helmer, C., Barberger-Gateau, P., Letenneur, L., & Dartigues, J. F. (2003). Prévalence de la démence et de la malaide d'Alzheimer chez les personnes de 75 ans et plus : Données réactualisées de la cohorte PAQUID. *Revue Neurologique*, 159(4), 405-411.
- Ranney, T. A. (1994). Models of driving behavior: A review of their evolution. *Accident Analysis and Prevention*, 26(6), 733-755.
- Rasmusson, X. D., Zonderman, A. B., Kawas, C., & Resnick, S. M. (1998). Effects of Age and Dementia on the Trail Making Test. *The Clinical Neuropsychologist*, 12(2), 169-178.
- Reger, M. A., Welsh, R. K., Watson, G. S., Cholerton, B., Baker, L. D., & Craft, S.

- (2004). The relationship between neuropsychological functioning and driving ability in dementia: a meta-analysis. *Neuropsychology*, 18(1), 85-93.
- Reuchlin, M. (1998). La généralisation des conduites adaptatives: Les activités intellectuelles. In M. Reuchlin (Ed.), *Psychologie* (13ème Edition ed., pp. 199-277). Paris: Presses Universitaires de France.
- Ridderinkhof, K. R., Span, M. M., & Van der Molen, M. W. (2002). Perseverative behavior and adaptive control in older adults : Performamnce monitoring, rule inductoin, and set shifting. *Brain and Cognition*, 4, 382-401.
- Ritchie, K., & Touchon, J. (1992). Heterogeneity in senile dementia of the Alzheimer type : Individual differences, progressive deterioration or clinical subtypes ? *Journal of Clinical Epidemiology*, 45, 1394-1398.
- Rizzo, M., Anderson, S. W., Dawson, J. D., & Nawrot, M. (2000). Vision and cognition in Alzheimer's disease. *Neuropsychologia*, 38(8), 1157-1169.
- Rizzo, M., & Kellison, I. (2004). Eyes, Brain, and Autos. *Archives of Ophtalmology*, 122, 641-647.
- Rizzo, M., McGehee, D. V., Dawson, J. D., & Anderson, S. N. (2001). Simulated car crashes at intersections in drivers with Alzheimer disease. *Alzheimer Disease and Associated Disorders*, 15(1), 10-20.
- Rizzo, M., & Nawrot, M. (1998). Perception of movement and shape in Alzheimer's disease. *Brain*, 121, 2259-2270.
- Rizzo, M., Reinach, S., McGehee, D., & Dawson, J. D. (1997). Simulated car crashes and crash predictors in drivers with Alzheimer disease. *Archives of Neurology*, 54(5), 545-551.
- Rizzo, M., Severson, J., Cremer, J., & Price, K. (2003). An abstract virtual environment tool to assess decision-making in impaired drivers. Paper presented at the International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Park City, Ut.
- Rizzo, M., Shi, Q., Dawson, J. D., Anderson, S. W., Kellison, I., & Pietras, T. (2006). Stops for cops: Impaired response implementation in older drivers with cognitive decline. *Transportation Research Record*, 1922.
- Roberts, R. J., Hager, L. D., & Heron, C. (1994). Prefrontal cognitive processes : Working Memory and inhibition in the antisaccade task. *Journal of Experimental Psychology : General*, 123, 374-393.
- Rodriguez-Aranda, C., & Sundet, K. (2006). The frontal hypothesis of cognitive aging: Factor structure and age effects on four frontal tests among healthy individuals. *The Journal of Genetic psychology*, 167(3), 269-287.
- Roenker, D. L., Cissell, G. M., Ball, K. K., Wadley, V. G., & Edwards, J. D. (2003). Speed-of-processing and driving simulator training result in improved driving performance. *Human Factors*, 45(2), 218-233.
- Rogers, R. D., Andrews, T. C., Grasby, P. M., Brooks, D. J., & Robins, T. W. (2000). Contrasting cortical and subcortical activations produced by attentional-set shifting and reversal learning in humans. *Journal of cognitive Neuroscience*, 12, 142-162.
- Rogers, W. A. (2000). Attention and Aging. In D. C. Park & N. Schwartz (Eds.),

- Cognitive Aging : a Primer (pp. 57-73). Philadelphia: Taylor and Francis.
- Rousseaux, M., Cabaret, M., & Bernati, T. (2002). Evaluation clinique et écologique de l'attention. In J. Couillet, M. Leclercq, C. Moroni & P. Azouvi (Eds.), *La Neuropsychologie de l'Attention* (pp. 75-101). Marseille: Solal.
- Royall, D. R., Cordes, J., & Polk, M. (1998). CLOX : an executive clock drawing task. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 64, 588-594.
- Rubinstein, J. S., Meyer, D. E., & Evans, J. E. (2001). Executive control of cognitive processes in task switching. *Journal of experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(4), 763-797.
- Ruthruff, E., Remington, R. W., & Johnston, J. C. (2001). Switching between simple cognitive tasks : The interaction of top-down and bottom-up factors. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 27(6), 1404-1419.
- Sagawa, K. (2002). Visual functions of older people and visibility of traffic signs. *Gerontechnology*, 1(4), 296-299.
- Salthouse, T. A. (1985). Speed of behavior and its implications for cognition. In J. E. Birren & K. W. Schaie (Eds.), *Handbook of the Psychology of Aging* (pp. 401-424). New-York: Van Nostrand Reinhold.
- Salthouse, T. A. (1996). The Processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, 103(3), 403-428.
- Salthouse, T. A. (2000). Pressing issues in cognitive aging. In D. C. Park & N. Schwartz (Eds.), *Cognitive Aging : A Primer*. Hove: Psychology Press.
- Salthouse, T. A., & Becker, J. T. (1998). Independent effects of Alzheimer's disease on neuropsychological functioning. *Neuropsychology*, 12(2), 242-252.
- Salthouse, T. A., Fristoe, N., & Rhee, S. H. (1996). How localized are age-related effects on neuropsychological measures? *Neuropsychology*, 10(2), 272-285.
- Salthouse, T. A., Toth, J., Daniels, K., Parks, C., Pak, R., Wolbrette, M., & Hocking, K. J. (2000). Effects of aging on efficiency of task switching in a variant of the Trail Making Test. *Neuropsychology*, 14(1), 102-111.
- Schneider, W. (1999). Working memory in a multilevel hybrid connectionist control architecture (CAP2). In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of Working Memory. Mechanisms of Active Maintenance and Executive Control* (pp. 340-374). Cambridge: Cambridge University Press.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: Detection, search and attention. *Psychological Review*, 84(1), 1-126.
- Sebastian, M. V., Menor, J., & Elosua, M. R. (2006). Attentional dysfunction of the central executive in AD : Evidence from dual task. *Cortex*, 42, 1015-1020.
- Sellal, F. (2002). La neuropsychologie des démences. *Psychologie Française*, 47(2), 93-109.
- Shah, P., & Miyake, A. (1999). Models of Working Memory: an introduction. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of Working Memory: Mechanisms of Active Maintenance and Executive Control* (pp. 1-27). New York: Cambridge University Press.

- Shallice, T., & Burgess, P. W. (1991). Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. *Brain*, 114, 727-741.
- Siri, S., Benaglio, I., Frigerio, A., Binetti, G., & Cappa, S. F. (2001). A brief neuropsychological assessment for the differential diagnosis between frontotemporal dementia and Alzheimer's disease. *European Journal of Neurology*, 8, 125-132.
- Slavin, M. J., Mattingley, J. B., Bradshaw, J. L., & Storey, E. (2002). Local-global processing in Alzheimer's disease : An examination of interference, inhibition and priming. *Neuropsychologia*, 40, 1173-1186.
- Sorel, O., & Pennequin, V. (2007). Aging of the Planning process: The role of executive functioning. *Brain and Cognition*, In Press, Corrected Proof.
- Souchay, C., & Isingrini, M. (2004). Age related differences in metacognitive control: Role of executive functioning. *Brain and Cognition*, 56, 89-99.
- Souchay, C., Isingrini, M., & Gil, R. (2002). Alzheimer's disease and feeling-of-knowing in episodic memory. *Neuropsychologia*, 40(13), 2386-2396.
- Spector, A., & Biederman, I. (1976). Mental set and mental shift revised. *American Journal of Psychology*, 89(4), 669-679.
- Speth, A., Amieva, H., Seron, X., & Ivanoiu, A. (2003). Exploration des processus exécutifs dans la maladie d'Alzheimer à un stade débutant. *Revue Neurologique*, 10(2), 40.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interferences in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Stutts, J. C., Stewart, J. R., & Martell, C. (1998). Cognitive test performance and crash risk in an older driver population. *Accident Analysis & Prevention*, 30(3), 337-346.
- Sullivan, M. P., Faust, M. E., & Balota, D. A. (1995). Identity negative priming in older adults and individuals with dementia of the Alzheimer type. *Neuropsychology*, 9(4), 537-555.
- Sylvester, C.-Y. C., Wager, T. D., Lacey, S. C., Hernandez, L., Nichols, T. E., Smith, E. E., & Jonides, J. (2003). Switching attention and resolving interference : fMRI measures of executive functions. *Neuropsychologia*, 41, 357-370.
- Tay, R. (2006). Ageing drivers: Storm in a teacup? *Accident Analysis & Prevention*, 38(1), 112-121.
- Tetewsky, S. J., & Duffy, C. J. (1999). Visual loss and getting lost in Alzheimer's disease. *Neurology*, 52(5), 958-965.
- Thomas-Anterion, C., & Laurent, B. (2003). MCI: Un concept insuffisant voire pas nécessaire? *Revue Neurologique*, 159(12), 1205-1208.
- Thomas-Anterion, C., & Laurent, B. (2006). Les Marqueurs Neuropsychologiques du diagnostic de la maladie d'Alzheimer. *Revue Neurologique*, 162(10), 913-920.
- Touchon, J., Ritchie, K., & Gély-Nargeot, M.-c. (1997). Les démences dégénératives. *Psychologie Française*, 42(4), 365-377.
- Traykov, L., Marcie, P., Dalla Barba, G., & Boller, F. (1999). La neuropsychologie de la maladie d'Alzheimer. *Revue Neurologique*, 155 Suppl 4, S38-S43.
- Uc, E. Y., Rizzo, M., Anderson, S. N., Shi, Q., & Dawson, J. D. (2004). Driver

- route-following and safety errors in early Alzheimer disease. *Neurology*, 63(5), 832-837.
- Uc, E. Y., Rizzo, M., Anderson, S. N., Shi, Q., & Dawson, J. D. (2005a, Janvier). Driver Identification of Landmarks and Traffic Signs After a Stroke. Paper presented at the Transportation Research Board, 84th annual meeting, Washington, D.C.
- Uc, E. Y., Rizzo, M., Anderson, S. N., Shi, Q., & Dawson, J. D. (2005b). Driver landmark and traffic sign identification in early Alzheimer's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 76, 764-768.
- Uc, E. Y., Rizzo, M., Anderson, S. N., Shi, Q., & Dawson, J. D. (2006a). Unsafe rear-end collision avoidance in Alzheimer's disease. *Journal of the Neurological Sciences*, 251(1), 35-43.
- Uc, E. Y., Rizzo, M., Anderson, S. N., Sparks, J. D., Rodnitzky, R. L., & Dawson, J. D. (2006b). Driving with distraction in Parkinson disease. *Journal of Neurology*, 67(2), 1774-1780.
- Uc, E. Y., Smothers, J., Shi, Q., & Rizzo, M. (2003, March). Driver navigation and safety errors in Alzheimer's disease and stroke. Paper presented at the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Park City, Ut.
- Van der Linden, M., Brédart, S., & Beerten, A. (1994). Age-related differences in updating working memory. *British Journal of Psychology*, 85, 145-152.
- Van der Linden, M., & Collette, F. (2002). Attention et mémoire de travail. In J. Couillet, M. Leclercq, C. Moroni & P. Azouvi (Eds.), *La Neuropsychologie de l'attention* (pp. 41-54). Marseille: Solal.
- Van der Linden, M., Collette, F., & Andres, P. (1997). Vieillesse normale, démence d'Alzheimer et mémoire de travail. *Psychologie Française*, 42(4), 379-390.
- Van der Linden, M., Collette, F., Salmon, E., Delfiore, G., Degueldre, C., Luxen, A., & Franck, G. (1999). The neural correlates of updating of information in verbal working memory. *Memory*, 7, 549-560.
- Van der Linden, M., Meulemans, T., Seron, X., Coyette, F., Andres, P., & Prairal, C. (2002). L'évaluation des fonctions exécutives. In X. Seron & M. Van der Linden (Eds.), *Traité de Neuropsychologie clinique* (Vol. 1, pp. 115-155). Marseille: solal.
- Van der Molen, H. H., & Bötticher, A. M. T. (1988). A hierarchical risk model for traffic participants. *Ergonomics*, 31(4), 537-555.
- Van Gerven, P. W. M., Meijer, W. A., & Jolles, J. (2007). Education does not protect against age-related decline of switching focal attention in working memory. *Brain and Cognition*, 64, 158-163.
- Van Swieten, J. C., Koudstaal, P. J., Visser, M. C., Schouten, H. J., & Van Gijn, J. (1988). Interobserver agreement for the assessment of handicap in stroke patients. *Stroke*, 19, 604-607.
- Vance, D. E., Roenker, D. L., Cissell, G. M., Edwards, J. D., Wadley, V. G., & Ball, K. K. (2006). Predictors of driving exposure and avoidance in a field study of older drivers from the state of Maryland. *Accident Analysis & Prevention*, 38(4), 823-831.
- Verhaeghen, P., & Basak, C. (2005). Ageing and switching of the focus of attention in

- working memory: results from a modified N-Back task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 58(1), 134-154.
- Verhaeghen, P., & Salthouse, T. A. (1997). Meta-analyses of age-cognition relations in adulthood: estimates of linear and nonlinear age effects and structural models. *Psychological Bulletin*, 122(3), 231-249.
- Vogel, A., Stokholm, J., Gade, A., Bo Andersen, B., Hejl, A.-M., & Waldemar, G. (2004). Awareness of deficits in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: Do MCI patients have impairment insight? *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 17, 181-187.
- Voss, S. E., & Bullock, R. A. (2004). Executive function: the core feature of dementia? *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 18(2), 207-216.
- Waltz, J. A., Knowlton, B. J., Holyoak, K. J., Boone, K. B., McPherson, S., Masterman, D., Chow, T., Cummings, J. L., Back-Madruga, C., & Miller, B. L. (2004). Relational integration and executive function in Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, 18(2), 296-305.
- Wechsler, D. (1991). *Echelle clinique de mémoire (forme révisée) (Edition Française ed.)*. Paris: Centre de Psychologie appliquée.
- Wecker, N. S., Kramer, J. H., Wisniewski, A., Delis, D. C., & Kaplan, E. (2000). Age Effects on Executive Ability. *Neuropsychology*, 14(3), 409-414.
- West, R. L. (1996). An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological Bulletin*, 120, 272-292.
- Whelihan, W. M., DiCarlo, M. A., & Paul, R. H. (2005). The relationship of neuropsychological functioning to driving competence in older persons with early cognitive decline. *Archives of clinical Neuropsychology*, 20(2), 217-228.
- Wilson, B. A., Alderman, N., Burgess, P., & Emslie, H. (1996). *Behavioural assessment of the dysexecutive syndrome*. England: Thames Valley Company.
- Withaar, F. K., Brouwer, W. H., & van Zomeren, A. H. (2000). Fitness to drive in older drivers with cognitive impairment. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 6(4), 480-490.
- Wood-Dauphinee, S. L., Opzoomer, A., Williams, J. V., Marchand, B., & Spitzer, W. O. (1988). Assessment of global function: The reintegration to normal living index. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 69, 583-590.
- Yntema, D. B. (1963). Keeping tracks of several things at once. *Human Factors*, 5, 7-17.
- Zamarian, L., Semenza, C., Domahs, F., Benke, T., & Delazer, M. (2007). Alzheimer's disease and mild cognitive impairment : Effects of shifting and interference in simple arithmetic. *Journal of neurological Sciences*, in press, corrected proof.
- Zhang, J., Fraser, S., Lindsay, J., Clarke, K., & Mao, Y. (1998). Age-specific patterns of factors related to fatal motor vehicle traffic crashes: focus on young and elderly drivers. *Public Health*, 112(5), 289-295.
- Zimmermann, P., & Fimm, B. (2002). A test battery for attentional performance. In M. Leclercq & P. Zimmermann (Eds.), *Applied Neuropsychology of Attention. Theory, Diagnosis and Rehabilitation*. (pp. 110-151). New York: Psychology press.

Annexes

Annexe 1

1. Formulaire d'informations données aux volontaires

2. Formulaire de consentement validé par le CCPPRB

1. INFORMATIONS DONNÉES AUX VOLONTAIRES

ET MODALITÉS DE DELIVRANCE DE CETTE INFORMATION

« *Déficits exécutifs en conduite automobile: Maladie d'Alzheimer. Approche sur simulateur de conduite* »

L'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS), en tant que responsable de cette étude, vous propose de participer à une recherche qui porte sur l'analyse de l'activité de conduite. Cette étude sera réalisée en 2 étapes successives : Vous viendrez une première fois à Bron pour effectuer des tests cognitifs avec l'expérimentateur, qui vous donnera toutes les consignes au préalable. Puis vous essaierez de conduire sur le simulateur. Lors de votre seconde visite, vous réaliserez

en vertu de la loi du droit d'auteur.

d'autres tests et conduirez à nouveau sur le simulateur.

Pour ces deux visites, les instructions vous seront données au fur et à mesure de l'étude. Cette étude n'est pas un examen de conduite. Les résultats recueillis n'auront aucune influence sur votre possibilité de continuer à conduire librement, ils ne permettront pas de maintenir ou de retirer le permis de conduire. Si l'examen neuropsychologique ou la visite médicale devait révéler un problème potentiel non encore identifié, nous vous en informerons. Il vous sera alors proposé de prendre contact avec l'un des médecins impliqués dans l'étude. Si vous ne souhaitez pas être informé, merci d'écrire ci-dessous de façon manuscrite la phrase suivante : « Je ne souhaite pas être informé des résultats me concernant issus de l'examen neuropsychologique et de la visite médicale »

.....
L'INRETS a souscrit, auprès de GERLING France, une assurance en Responsabilité Civile pour que l'Etablissement soit couvert en cas de recours en responsabilité exercé par l'un de ces participants (Numéro du contrat d'assurances : **(1680) 90686**).

Votre participation d'une durée approximative de **4 heures** s'inscrit dans une étude s'étendant jusqu'au 31/12/2006. Vous percevrez une indemnité forfaitaire de **100 Euros**, en compensation des contraintes et frais générés par votre participation à cette recherche. Si vous ne pouvez pas effectuer l'intégralité de l'expérimentation, votre indemnité sera calculée au prorata du temps passé. Pour des raisons générales de protection des personnes volontaires, la loi impose l'exclusion des femmes enceintes et fixe par ailleurs l'obligation d'être affilié à la sécurité sociale. La participation à cette recherche implique une période d'exclusion de **1 jour** durant laquelle vous ne pourrez pas participer à une autre recherche biomédicale sans bénéfice individuel direct.

Les résultats individuels et les différentes données vous concernant seront strictement confidentiels. Conformément à la loi « informatique et liberté » du 6 janvier 1978, modifiée par la loi du 1^{er} juillet 1994, relative aux fichiers informatiques et aux libertés (article 40) vous avez le droit d'accéder aux données vous concernant recueillies dans cette étude. Par ailleurs, conformément à l'article R.2039 du code de Santé Publique, vous serez inscrit au fichier national des volontaires.

Signature du directeur de la Recherche :

C. Marin-Lamellet

2. FORMULAIRE DE CONSENTEMENT LIBRE ET ÉCLAIRÉ

De M, Mme, Mlle (Nom, Prénom) :

Adresse :

J'ai été invité(e) à participer à une étude réalisée par l'INRETS concernant l'analyse de l'activité de conduite. J'ai été libre d'accepter ou de refuser. J'ai reçu et compris les informations suivantes : je vais effectuer plusieurs tâches sur papier ou sur ordinateur avec un expérimentateur qui me donnera des consignes au fur et à mesure. Puis, je vais effectuer une expérimentation sur un simulateur de conduite, au cours de laquelle je vais conduire et où plusieurs tâches me seront proposées, comme mémoriser des panneaux placés au bord de la route, traverser des intersections avec passages à niveau, ou

encore, conduire dans une ville (virtuelle) et suivre les indications de l'expérimentateur. Les instructions de détail, concernant le déroulement du test, me seront fournies lors de celui-ci, par les personnes qui le mettront en œuvre.

Le but de cette étude est de recueillir des informations sur l'activité de conduite dans différents échantillons de participants et de les comparer aux informations recueillies à l'aide des tests. La nature de l'étude, son déroulement et ses contraintes m'ont été expliqués par les expérimentateurs. J'ai reçu une réponse satisfaisante à toutes les questions que j'ai pu poser librement à propos de celle-ci.

J'accepte de participer à cette étude dans les conditions précisées ci-dessus.

Mon consentement ne décharge pas les organisateurs de l'étude de leurs responsabilités. Je conserve tous mes droits garantis par la loi. Si je le désire, je suis libre à tout moment d'arrêter ma participation ; j'en informerai alors le responsable de l'étude, son collaborateur ou toute autre personne avec qui je serai amené à être en contact au cours de cette recherche. Les données me concernant resteront strictement confidentielles. Je n'autorise leur consultation et leur traitement informatique que par des personnes qui collaborent à l'étude. J'ai bien noté que le droit d'accès, prévu par la loi " Informatique et Liberté " du 6 janvier 1978, modifiée par la loi du 1^{er} juillet 1994 relative aux fichiers informatiques et aux libertés (article 40), est applicable à tout moment. Je pourrai demander toute information complémentaire au médecin investigateur ou à toute autre personne avec qui je serai amené à être en contact au cours de cette recherche. Cette étude n'est pas un examen de conduite. Les résultats recueillis n'auront aucune influence sur ma possibilité de continuer à conduire librement, ils ne permettront pas de maintenir ou de retirer mon permis de conduire.

Je percevrai une indemnité forfaitaire de **100 Euros**, en compensation des contraintes et frais générés par ma participation à cette recherche. Dans le cas où je demanderais à mettre fin à ma participation avant la fin de l'expérimentation, mon indemnisation serait calculée **au prorata** de la durée de ma participation. **Si l'examen neuropsychologique ou la visite médicale devait révéler un problème potentiel non encore identifié, nous vous en informerons. Il vous sera alors proposé de prendre contact avec l'un des médecins impliqués dans l'étude. Si vous ne souhaitez pas être informé, merci d'écrire ci-dessous de façon manuscrite la phrase suivante :« Je ne souhaite pas être informé des résultats me concernant issus de l'examen neuropsychologique et de la visite médicale » :**

.....

La participation à cette recherche implique de ma part l'acceptation de ne pas participer à une autre recherche biomédicale pendant une période de 1 jour à compter de la fin de ma participation à ladite recherche.

J'ai expliqué la nature et les contraintes
 de cette étude à M (Mme ou Melle)

* Signature du directeur de la recherche

(Précédée de la date manuscrite)

* Signature du volontaire

Annexe 2

Questionnaire médical d'inclusion des participants

Questionnaire médical d'inclusion

Nom : «**Nom**» Prénom : «**Prénom**» Date de naissance : «date_naissance»

I. Antécédents médicaux : critères d'exclusion (1 oui = exclusion)

Interventions médicales avec anesthésie générale dans les 2 derniers mois :
₁ OUI ₂ NON

Crises d'épilepsie ou traitement antiépileptique ? ₁ OUI ₂ NON

Traumatisme crânien grave avec une perte de connaissance > à 30 minutes ? ₁
OUI ₂ NON

Antécédents de chirurgie cardiaque avec circulation extra-corporelle ? ₁ OUI ₂
NON

Accident vasculaire cérébral ? ₁ OUI ₂ NON

Pathologie cardiaque, infarctus ? ₁ OUI ₂ NON

Consommation d'alcool moyenne > à 3 verres par jour ? ₁ OUI ₂ NON

Traitement par antidépresseurs non stabilisé ? ₁ OUI ₂ NON

Antécédents de crise d'angoisse ? ₁ OUI ₂ NON

Antécédents de crise vertigineuse ? ₁ OUI ₂ NON

Mal des transports ? ₁ OUI ₂ NON

II. Prise de médicaments

Actuellement, prenez vous un traitement médical ? ₁ OUI ₂ NON

Si oui, lequel (ou lesquels) ?

III. Examen médical

III.1. Informations générales

Poids : _____ kg

Taille : ____ m ____

Diabète ? ₁ OUI ₂ NON

Traité ? ₁ OUI ₂ NON

Cholestérol ? ₁ OUI ₂ NON

Traité ? ₁ OUI ₂ NON

Tabac ? ₁ OUI ₂ NON

Quantité par jour : _____

III.2. Vue

Myopie : ₁ OUI ₂ NON

Cataracte : ₁ OUI ₂ NON

Glaucome : ₁ OUI ₂ NON

Pathologie visuelle : ₁ OUI ₂ NON laquelle : _____

Examen vision : Acuité de près : Œil Droit : _____ Œil Gauche : _____

Acuité de loin : Œil Droit : _____ Œil Gauche : _____

III.3. Audition

Antécédent de surdité : ₁ OUI ₂ NON

Appareillage : ₁ OUI ₂ NON

Gêne auditive connue : Oreille droite : ₁ OUI ₂ NON

Oreille gauche : ₁ OUI ₂ NON

Equilibre / Oreille interne (Test de Tinetti) :

III.4. Tension

Hypertension artérielle ? ₁ OUI ₂ NON Tension : _____

III.5. ECG

Facteurs de risques cardiaques ? ₁ OUI ₂ NON

Résultats :

Signaler toute autre(s) maladie(s) déclarée(s) :

Accepteriez-vous, si cela s'avère nécessaire que je fasse parvenir à votre médecin vos résultats ?

₁ OUI ₂ NON Si oui, quelles sont ses coordonnées ?

Nom : Adresse :

Commentaires du bilan médical :

-

-

Avez-vous participé à une étude expérimentale au cours des deux derniers mois ? ₁ OUI ₂ NON

Si oui, Quel en était le but ?

Qui vous l'a proposé ?

Au cours de cette étude, vous a-t-on demandé de prendre un médicament? ₁ OUI
₂ NON

Si oui, lequel ?

Le sujet peut participer à la suite de l'étude : ₁ OUI ₂ NON

Signature du médecin

Dr Marie-France Boyer

Annexe 3.

1. Photographie du grand simulateur

2. Photographie du petit simulateur

1. Le « GRand » simulateur de conduite de l'inrets



2. Le « Petit » simulateur de conduite de l'inrets



Annexe 4

1. Consignes pour l'expérience de mise à jour

2. Consignes pour l'expérience de flexibilité

3. Consignes pour l'expérience d'inhibition

4. Consignes pour l'expérience de tourne-à-gauche

1. Consignes pour l'expérience de mise à jour

Dans cette épreuve vous allez conduire sur une route nationale. Veillez à respecter la signalisation ainsi que la limitation à 90 km/h. Votre tâche sera une tâche de mémorisation. Il faut donc rester concentré sur les panneaux qui vont apparaître tout au long du trajet. En effet, des panneaux d'indications vont régulièrement apparaître sur le

côté droit de la route, vous devrez tenir compte de ces panneaux et réguler votre conduite en fonction de ceux-ci. A certains moments (réguliers), je vous demanderai de me rappeler les derniers panneaux que vous avez vus, et quelles sont les conditions de circulation. Vous devrez répondre le plus rapidement possible à ces différentes questions tout en conduisant. Nous allons d'abord regarder ensemble la liste des panneaux que vous pourrez rencontrer pour nous assurer que vous les connaissez.

Avez-vous bien compris ?

Nous allons commencer par un essai.

2. Consignes pour l'expérience de Flexibilité

Dans cette épreuve vous allez conduire sur une route nationale, sans intersection ni autre difficulté particulière. Veillez à respecter la limitation à 90 km/h. Des panneaux vont apparaître régulièrement sur les côtés droit et gauche de la route. Vous n'avez pas à identifier chaque panneau, si vous ne connaissez pas certains panneaux, cela n'aura pas de conséquence sur vos réponses.

Vous devrez simplement me donner soit la **forme** soit la **couleur** du panneau qui apparaît, et ceci le plus rapidement possible dès que vous voyez le panneau :

Si le panneau est situé à droite, vous devez me dire le plus rapidement possible de quelle forme il est (montrer les exemples papier) : Triangle, Rond, Carré ou Rectangle

Si le panneau est à gauche, vous devez me dire le plus rapidement possible quelle est sa couleur principale (montrer les exemples papier) : Rouge, Vert, Bleu ou Marron / brun.

Votre réponse est enregistrée par ce micro, il faudra donc faire bien attention à **ne pas parler** en dehors de vos réponses et bien vous concentrer sur la tâche.

Nous allons commencer par une séquence où tous les panneaux seront à DROITE, il faudra donc uniquement me donner leur forme.

Ensuite nous verrons une séquence, où tous les panneaux seront à gauche, il faudra donc uniquement me donner leur couleur.

Nous terminerons par une séquence où il y aura des panneaux des 2 côtés, il faudra donc faire attention à ce qui se passe de chaque côté de la route et répondre **le plus rapidement possible** .

3. Consignes pour l'expérience d'inhibition

Dans cette épreuve vous allez conduire sur une route nationale.

Régulièrement, des voies de chemin de fer vont traverser la route qui sera protégée par des barrières de passage à niveau (montrer l'exemple papier). A chaque barrière, vous apercevrez un signal en bas de l'écran 100 m avant qui vous indiquera si la barrière sera ouverte ou fermée :

Si le signal est un STOP rouge, la barrière sera FERMÉE

Si le signal est un « Go » vert, la barrière sera SEMI-OUVERTE

ATTENTION : au départ toutes les barrières sont ouvertes, et elles ne se ferment

qu'au dernier moment. Mais, attention, parfois, le feu de signal fonctionne mal, il arrive qu'il y ait un feu rouge pour une barrière ouverte, et un feu vert pour une barrière fermée.

Votre tâche consiste donc à conduire **le plus vite possible**, mais sans dépasser la limite, mais sans perdre de temps au barrière, c'est-à-dire **ne pas s'arrêter inutilement** aux barrières ouvertes, mais **ne pas traverser des barrières fermées** !

Avez-vous bien compris ?

Nous allons commencer par un essai, puis nous ferons deux séquences identiques avec une pause entre les deux.

4. Consignes pour l'expérience de Tourne-à-Gauche

Dans cette épreuve vous allez à nouveau conduire, mais cette fois, vous allez vous déplacer dans une ville virtuelle. La vitesse est donc limitée à 50 km/h. Votre seule tâche est d'écouter mes indications de direction, et de rouler le plus naturellement possible dans cette ville, en respectant le code de la route. La plupart du temps, vous devrez traverser des intersections protégées par des feux tricolores avec de la circulation dans votre sens et en sens inverse. Faites donc bien attention à respecter les priorités, sans perdre trop de temps aux feux.

Annexe 5

1. Panneaux utilisés dans l'expérience de mise à jour

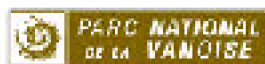
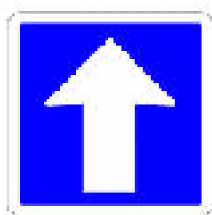
2. Panneaux utilisés dans l'expérience de flexibilité

1. Panneaux utilisés dans l'expérience de mise à jour

	Interdiction de dépasser		Priorité à droite
	Fin d'interdiction de dépasser		Attention danger
	Limitation de vitesse		Prochaine intersection prioritaire
	Fin de limitation de vitesse		Danger : Animaux
	Interdiction de klaxonner		Vent latéral
	Fin d'interdiction de klaxonner		Danger aérien
	Voie interdite aux deux roues		Rétrécissement de chaussée
	Interdiction de tourner à gauche		Virage dangereux
	Circulation à double sens		Pente à 10 %
	Stationnement interdit		Chaussée glissante
	Respect des distances de sécurité		Route prioritaire
	Interdiction de dépasser pour les P.L.		

2. Panneaux utilisés dans l'expérience de Flexibilité

Les 4 formes :



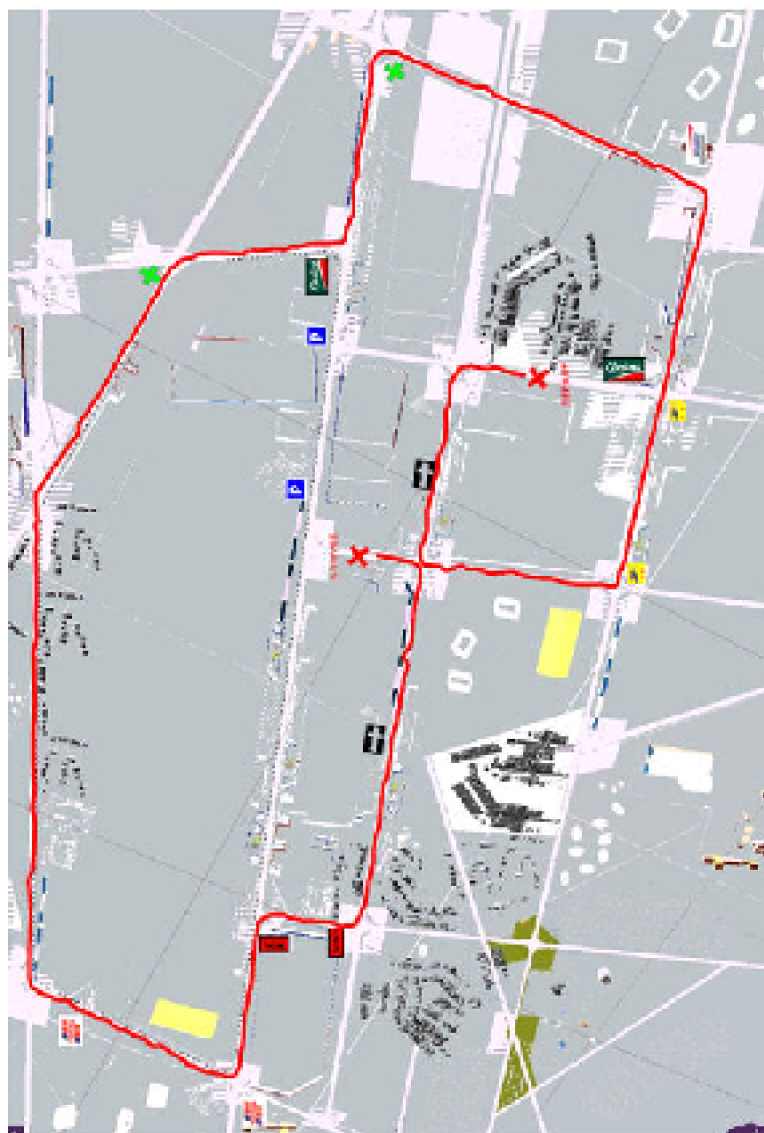
Les 4 couleurs :



Annexe 6

Plan du trajet dans la situation de tourne-à-gauche

Plan du trajet dans la situation de tourne-à-gauche



Résumé

Fonctions Exécutives et Conduite Automobile.

Etude dans le vieillissement normal et dans la maladie d'Alzheimer.

L'objectif de ce travail de recherche était d'étudier d'une part comment les fonctions exécutives évoluent dans le vieillissement cognitif normal et dans le stade précoce de la maladie d'Alzheimer et d'autre part comment cette évolution peut être évaluée dans des situations de conduite. Le modèle exécutif proposé par Miyake *et al.* (2000) a été retenu comme cadre théorique pour l'évaluation du fonctionnement exécutif. Notre démarche expérimentale a en effet consisté en une évaluation neuropsychologique des trois composantes exécutives de flexibilité mentale, de mise à jour et d'inhibition, par le biais

d'une batterie de tests. Cette évaluation a été combinée à une expérimentation sur simulateur de conduite. Nous avons mis au point quatre scénarios de conduite, qui évaluaient chacun l'une des trois composantes exécutives. Le dernier scénario était une situation naturelle de conduite avec des intersections à gauche, situation particulièrement accidentogène pour les conducteurs âgés.

Les résultats indiquent que les trois composantes exécutives n'évoluent pas de manière similaire dans le vieillissement cognitif normal qui préserve pour un certain temps la capacité de flexibilité mentale. Les trois composantes exécutives sont en revanche sensibles au vieillissement pathologique. Par ailleurs, les situations de conduite mises au point sur le simulateur sont pertinentes pour l'évaluation des trois composantes exécutives en situation écologique.

En définitive, ce travail offre des perspectives de recherche futures concernant l'amélioration des connaissances sur les aspects cognitifs de la conduite automobile. Ceci devrait permettre d'élargir ce champ de recherche notamment à d'autres pathologies qui touchent le fonctionnement exécutif et pour lesquelles les patients se trouvent en forte demande d'autonomie, et donc en forte demande vis-à-vis de la conduite automobile. De plus, des perspectives intéressantes sont également offertes concernant les possibilités non seulement d'évaluation, mais aussi de réadaptation de la conduite grâce à la mise au point de ce type de protocoles sur simulateur de conduite.

Mots-clés : Vieillesse – Maladie d'Alzheimer – Fonctions exécutives – Conduite automobile – Simulateur de conduite – Modèle de Miyake

Abstract

Executive Functions and Driving.

Study in Normal Aging and in Alzheimer's disease.

The purpose of this study was to investigate the particular role played by the executive functioning in the driving activity. The objectives of this research were indeed to study how the executive functions would evolve in normal cognitive aging and in the early stages of Alzheimer's Disease (AD), and then to study how these evolutions can be evaluated in driving situations. This study took place in the theoretical frame suggested by Miyake *et al.* (2000). Indeed, our methodology consisted in a neuropsychological evaluation of three executive components, mental flexibility, updating and inhibition. This neuropsychological evaluation was combined with an experiment in a driving simulator. We developed four driving scenarios Each one evaluated one of the three executive components and the fourth one was a natural driving situation, with left turning intersections. However, in reality, this situation of left turning is a situation which is particularly dangerous for older drivers.

The results indicated that the three executive components did not change in a similar way in normal aging, which would preserve for a certain time the mental flexibility. In AD, the three executive components were impaired. In addition, the driving experiments

indicated similar and correlated results to those obtained with the neuropsychological evaluations. The driving situations developed in the simulator are thus relevant for the evaluation of the three executive components in an ecological manner. Lastly, the results of the fourth driving experiment showed that the executive components are essential to drive safely. Finally, this study offers future research possibilities concerning the improvement of our knowledge on driving cognitive functioning. Interesting prospects are also offered concerning the possibilities, not only for evaluation, but also for driving readaptation.

Keywords : Aging – Alzheimer's Disease – Executive Functions – Miyake's Model – Driving – Driving Simulator