



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par **l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace**
Spécialité : Neurosciences – Facteurs humains

Présentée et soutenue par **Mickaël CAUSSE**
le 26 mars 2010

**Influence de la récompense et de l'âge sur la performance de pilotage :
une contribution de la neuroergonomie à la sécurité aérienne**

JURY

M. Patrice Terrier, président
M. Frédéric Dehais, co-directeur de thèse
M. Olivier Koenig, rapporteur
Mme Josette Pastor, directrice de thèse
M. Sébastien Tremblay, rapporteur
M. Umberto Sabatini

École doctorale : **Aéronautique - Astronautique**

Unité de recherche : **Équipe d'accueil ISAE-ONERA CSDV**

Directeur de thèse : **Mme Josette Pastor**
Co-directeur de thèse : **M. Frédéric Dehais**

Autre rapporteur : **M. Matthew Rizzo**

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée dans des conditions qui doivent être qualifiées d'exceptionnelles. A cheval entre le centre aéronautique et spatial de l'ISAE et l'INSERM U825, je n'ai jamais manqué ni de soutien, ni de moyens. Le fait de posséder deux pieds à terre, en des lieux a priori si différents, apporte tous les bienfaits de la pluridisciplinarité : différents points de vue sur les événements grâce à la juxtaposition des regards spécialisés, confrontation permanente des concepts et recul sur les phénomènes. En somme, cela m'a bien souvent permis d'éviter de regarder le panorama par le petit bout de la lorgnette.

J'adresse mes remerciements à mes deux directeurs de thèse, Josette Pastor et Frédéric Dehais. Je remercie Josette pour son esprit critique, intransigeante avec elle-même, et avec les autres, elle a été pour moi l'école du dépassement de soi. Merci à elle pour son intégrité, son intelligence, sa générosité et sa foi dans la vie, faisant fi des obstacles avec une force surhumaine. Merci à Frédéric pour son enthousiasme, sa formidable énergie, mise au service de tout ce qui gravite autour de la question des sciences cognitives ; mise au service de tous. Il apporte la confiance en soi et est capable de prêter cette confiance aux autres. J'ai eu cette chance rare d'avoir un « véritable » double encadrement, bénéficiant d'une expérience bicéphale, essentielle au rapprochement de deux mondes : les neurosciences et l'aéronautique.

Je remercie ceux qui m'ont fait l'honneur d'être membre de mon jury. Je leur adresse toute ma considération et mon respect pour leurs qualités de chercheurs. Merci à Olivier Koenig, Sébastien Tremblay et Matthew Rizzo qui ont accepté de rapporter ce manuscrit. Merci à Umberto Sabatini et Patrice Terrier pour avoir accepté la lourde charge de faire parti de mon jury. Merci à tous d'avoir fait le déplacement, parfois de si loin, du Québec ou d'Italie.

Merci à toutes les personnes du CAS qui ont eu la chaleur d'accueillir un apprenti chercheur durant ces trois années. Merci à Christian Colongo, chef du laboratoire, qui a poussé la gentillesse jusqu'à parfois mettre les mains dans le cambouis de mes données. Merci à Patrice pour avoir été un excellent partenaire de footing, à Dominique pour ses paroles toujours réconfortantes, à Daniel qui a été un excellent colocataire de bureau, merci à Etienne pour sa bonne humeur, à Marie pour ses coups de pouces administratifs et à Guillaume pour son humour si spécial. Merci également à tous les aviateurs de Lasbordes, tous plus sympathiques les uns que les autres.

Il me faut également remercier toutes les personnes de l'INSERM U825, Jean-François Démonet pour m'avoir accueilli au sein de son équipe, Irène, Hélène, Gérard, Éric et Chantal pour leur présence amicale. Merci à Nicolas Chauveau pour avoir relu ce manuscrit et pour ses astuces Matlabiennes. Merci aux étudiants, notamment les deux Sébastien, Olivier, Laure, Caroline, Stein, Mélanie, Evelyne, Rodolphe, les deux Estelle, Déborah. Merci également à Yoni pour son amitié.

Je remercie vivement les personnes de la Fondazione Santa Lucia de Rome, en particulier Umberto Sabatini et Patrice Péran, sans qui l'expérimentation IRMf ne serait probablement restée qu'à l'état de projet.

Je tiens également à témoigner ma reconnaissance à la foule des volontaires qui ont participé aux expérimentations de cette thèse. Pilotes, étudiants, chercheurs ou connaissances devenus anonymes, ils ont toujours fait preuve de patience et de bonne volonté.

Je remercie mes amis, ils sont la clef de voute à toute entreprise, compagnons précieux, soutiens essentiels dans les moments pénibles.

Mes pensées vont également à ma famille, tout particulièrement à mes parents. Vous m'avez toujours épaulé et fait confiance, je vous dois tout, et même un peu plus encore. Mes pensées vont également vers toi Christel.

Table des matières

Introduction.....	7
1ere partie : Contexte théorique.....	11
Chapitre 1. Facteur humain et sécurité aéronautique	13
I. Accidentologie en aviation commerciale et générale.....	13
I.1. Risque aéronautique	13
I.2. Phases de vol et accidentologie	15
I.3. Taxonomie d'accidents.....	17
II. Facteurs humains et accident	20
II.1.1. Un exemple illustratif.....	21
II.1.2. Les facteurs psychosociologiques et cognitifs connus poussant à atterrir	23
II.1.3. Facteur sociétaux émergents	27
II.1.3.1. La pression économique dans le transport aérien	28
II.1.3.2. L'âge en aviation générale.....	29
III. Conclusion : de la nécessité de la neuroergonomie	31
Chapitre 2. La neuroergonomie	35
I. Définition et champ d'application de la neuroergonomie.....	35
I.1. Les outils de la neuroergonomie	36
I.1.1. Électro-encéphalographie.....	36
I.1.2. l'IRMf.....	39
I.1.2.1. L'effet BOLD.....	39
I.1.2.2. Les designs expérimentaux.....	40
I.1.3. L'imagerie spectroscopique en proche infrarouge	41
I.1.4. La rTMS	42
I.1.5. La psychophysologie	43
I.1.5.1. Le système nerveux autonome.....	43
I.1.5.2. Mesures du système nerveux autonome	44
I.2. Application des techniques de mesures des neurosciences à l'ergonomie	48
I.2.1. Mesures en situation	48
I.2.2. Mesures en laboratoire.....	51
II. L'hypothèse du continuum cognitif.....	54
III. Contre-mesures IHM en neuroergonomie	56
IV. Conclusion.....	57
Chapitre 3. Les fonctions exécutives et leurs perturbations	60
I. Les fonctions exécutives.....	61
I.1. Localisation cérébrale des FE	62
I.2. Principales FE et leur évaluation	64
I.2.1. La mémoire de travail	65
I.2.2. Le <i>set-shifting</i>	68
I.2.3. L'inhibition	70
I.2.4. Le Raisonnement.....	72

II. Emotion, récompense et FE	74
II.1. L'hypothèse des marqueurs somatiques.....	74
II.2. Les émotions.....	77
II.3. Le stress, un corrélat de l'émotion.....	78
II.4. Influence de l'émotion et de la récompense sur les FE.....	80
II.4.1. Emotion/stress et FE, des forces opposées ?.....	80
II.4.2. Emotion et FE, des bases cérébrales duales.....	83
II.4.3. Effets de la récompense sur les FE.....	86
III. Age et FE	90
III.1. Mémoire de travail et vieillissement normal.....	93
III.2. <i>Set-shifting</i> et vieillissement normal.....	94
III.3. Inhibition et vieillissement normal.....	95
III.4. Raisonnement et vieillissement normal.....	97
III.5. Vitesse de traitement et vieillissement normal.....	98
IV. FE et aéronautique	100
IV.1. Emotion, FE et pilotage.....	102
IV.2. Vieillesse, FE et pilotage.....	104
V. Conclusion	106
2^e Partie : Résultats expérimentaux	110
Chapitre 1. Performances de pilotage et vieillissement normal	112
I. Résumé	112
II. Introduction	114
III. Méthodes	115
III.1. Participants.....	115
III.2. Scénario de vol.....	116
III.2.1. Tâche de navigation.....	116
III.2.2. La décision d'atterrir.....	118
III.3. Tests neuropsychologiques.....	119
III.3.3. Poursuite de cible.....	119
III.3.4. Le test du n-back.....	120
III.3.5. Raisonnement déductif.....	121
III.3.6. Le Wisconsin Card Sorting test version informatique.....	123
III.3.7. Le Stroop spatial.....	124
III.3.8. L'estimation des durées.....	126
III.3.9. La tâche du micro-monde.....	126
III.4. Caractéristiques des pilotes.....	127
III.4.10. Tests de personnalité.....	128
III.4.10.1. L'anxiété trait.....	128
III.4.10.2. L'impulsivité.....	128
III.5. Analyses statistiques.....	129
IV. Résultats	129
IV.1. Caractéristiques générales de la population.....	130
IV.2. Age et tests neuropsychologiques.....	131
IV.3. Facteurs prédictifs de la performance de pilotage.....	136

IV.3.1. L'écart au cap.....	136
IV.3.2. La décision d'atterrir.....	138
V. Discussion	139
V.1. Age et FE.....	140
V.2. Facteurs prédictifs de la performance de pilotage	143
V.2.1. L'âge, variable non prédictive de la performance de pilotage et de la décision d'atterrir.....	143
V.2.2. Variables prédictives de la performance de pilotage	144
V.2.3. Variables prédictives de la décision d'atterrir	145
VI. CONCLUSION	148
<i>Chapitre 2. Influence de la récompense et de l'incertitude sur la prise de décision.....</i>	<i>151</i>
I. Résumé	151
II. Introduction	153
III. Matériel et méthodes	155
III.1. La tâche	155
III.1.1. De l'avion au laboratoire.....	155
III.1.2. Stimuli	157
III.1.2.1. L'ILS.....	157
III.1.2.2. Les feedbacks.....	158
III.1.2.3. La matrice de paiement.....	159
III.1.3. Design expérimental de l'étude IRMf	160
IV. Expérimentation en psychophysiologie	162
IV.1. Design expérimental de l'étude psychophysiologique.....	162
IV.2. Participants	162
IV.3. Mesures psychophysiologiques	163
IV.3.1. La réponse électrodermale.....	164
IV.3.2. La respiration	165
IV.3.3. Le rythme cardiaque	165
IV.3.4. L'oculométrie	166
IV.4. Résultats.....	167
IV.4.1. Résultats comportementaux	167
IV.4.2. Effets du niveau d'incertitude sur les temps de réactions.....	167
IV.4.3. Effets de l'enjeu sur les temps de réactions	168
IV.4.4. Effets de l'enjeu sur les prises de décisions.....	170
V. Résultats psychophysiologiques	172
V.1. La réponse électrodermale	172
V.2. La respiration	174
V.3. Le rythme cardiaque	175
VI. Résultats préliminaires de neuroimagerie	178
VI.1. Régresseurs	178
VI.2. Résultats comportementaux.....	179
VI.3. Résultats de neuroimagerie	181
VII. Conclusion.....	183
VIII. Perspectives	189

Chapitre 3. Oculométrie en vol réel	193
I. Résumé	193
II. Introduction	195
III. Méthode	196
III.1. Participants.....	196
III.2. Scénario de vol	197
III.3. Oculométrie.....	198
III.3.1. Les aires d'intérêt.....	200
III.3.2. Réponse pupillaire	201
IV. Résultats	202
IV.1. Résultats comportementaux.....	202
IV.2. Réponse pupillaire.....	205
V. Discussion	207
VI. Conclusion.....	210
3^e partie : Discussion et perspectives	213
I. Discussion générale	215
I.1. Contribution à la définition de batteries neuropsychologiques prédictives de la performance de pilotage.....	216
I.2. Contribution à la compréhension du facteur émotionnel durant l'atterrissage	218
I.3. Opérationnalisation des résultats	220
I.4. Contribution générale	221
II. Conclusion	222
II.1. Du normal au pathologique.....	222
II.2. Du laboratoire au monde réel	223
III. Perspectives	225
III.1. Troubles addictifs dus aux antiparkinsoniens	225
III.2. Adapter l'interaction sur la base du comportement et de l'état physiologique	226
III.2.1. Drones.....	226
III.2.2. Contre-mesures.....	228
Annexes 1.....	231
Formater les images.....	231
Corriger le décalage d'acquisition entre les coupes fonctionnelles (« Slice timing »)	232
Correction du mouvement (« realign »)	232
Normalisation spatiale (« normalize »)	233
Lissage spatial (smooth).....	233
Annexes 2.....	234
Synthèse des régressions linaires et des analyses discriminantes.....	234
Références.....	238

Introduction

Depuis le premier vol contrôlé des frères Wright en 1903, le transport aérien a connu un essor considérable. En 2001, prendre l'avion était le moyen de transport le plus sûr en termes de passagers tués par cent millions de passagers-kilomètres (source ETSC¹). Cette fiabilité est le fruit d'avancées technologiques spectaculaires et de réglementations drastiques. Pourtant, du fait de l'augmentation du trafic, le nombre absolu d'accidents est en légère augmentation. Les analyses révèlent que les responsabilités sont attribuables à l'opérateur humain dans 70 à 80 % des cas d'accidents dans l'aviation civile ou militaire (O'Hare, Wiggins, Batt, & Morrison, 1994; D. A. Wiegmann & Shappell, 1999). Ces statistiques, bien que discutées, ont motivé un nombre important d'études en facteurs humains depuis les années quatre-vingt. Elles ont permis de faire de grands progrès dans la compréhension des mécanismes à l'origine de l'erreur et ont notamment débouché sur la définition de programmes de formation et sur la mise au point d'interfaces hommes-systèmes ergonomiques. Ainsi, une étude récente met en évidence les retombées positives de ces travaux sur la sécurité aérienne (Baker, Qiang, Rebok, & Li, 2008).

Malgré ces résultats scientifiques, les risques d'erreurs humaines, en particulier les erreurs décisionnelles, continuent de remettre en cause la sécurité aérienne. De plus, les enjeux en termes de coûts matériels et humains ainsi que l'apparition de très gros porteurs tels que l'airbus A380, pouvant emporter jusqu'à huit-cent passagers, motivent la mise en œuvre de nouveaux paradigmes de recherche en facteurs humains. Classiquement, les interactions homme-système artificiel (IHSA) et la compréhension des erreurs de l'opérateur ont été étudiées par le seul intermédiaire des modifications du comportement humain face à une variation du système. Si cette approche a permis de faire progresser les IHSA, surtout lorsque les observations débouchaient sur une modélisation descriptive, un pan important de l'interaction reste néanmoins méconnu. En effet, alors que dans l'aéronautique militaire par exemple, certaines contraintes physiologiques étaient prises en compte (ex : voile noir), les contraintes cognitives créées par le fonctionnement du cerveau - système biologique - étaient largement ignorées. Lorsque ces contraintes cognitives sont connues, elles font de l'erreur la conséquence logique du fonctionnement normal du cerveau placé dans un contexte mal adapté. En d'autres termes, l'erreur humaine devient alors un symptôme des carences du système.

¹ European Transport Safety Council.

Une approche originale et innovante permettant de traiter la problématique des interactions homme-système est de s'intéresser aux neurosciences intégratives et à la neuropsychologie. Les travaux de ces disciplines, basés sur l'étude du substrat et des mécanismes cérébraux des fonctions cognitives, ont fait progresser les connaissances sur la compréhension des interactions de l'homme avec son environnement. Ces résultats scientifiques suscitent depuis peu l'intérêt des spécialistes des facteurs humains. Leur application à l'ergonomie a donné très récemment naissance à un nouveau courant aux Etats-Unis : la neuroergonomie (Parasuraman, 2003; Sarter & Sarter, 2003). La neuroergonomie vise à étudier les structures et fonctions cérébrales impliquées dans le fonctionnement de l'humain dans son environnement de travail, au volant de son véhicule ou encore simplement dans tout type d'activité quotidienne. Cette nouvelle voie est extrêmement prometteuse et offre la possibilité, par le biais d'une fertilisation croisée, de produire des connaissances à la fois pour les neurosciences, en étudiant les fonctions cérébrales impliquées dans le comportement d'un individu dans le monde réel, mais aussi pour l'ergonomie, qui peut ainsi raffiner sa pratique et asseoir son socle théorique. Bien entendu, ces mesures neuropsychologiques ne peuvent être réalisées que dans le contexte du laboratoire, mais il faut pouvoir transférer ces résultats à l'aéronautique dans le cadre même de l'activité quotidienne des pilotes ou de tout autre opérateur. Dans ce but, nous verrons comment les mesures du système nerveux autonome peuvent constituer des indices de l'état cognitif et émotionnel des pilotes. Embarquées dans les aéronefs, ces mesures pourraient permettre de réagir en ligne afin d'améliorer la sécurité.

Du point de vue de la neuropsychologie, les erreurs de pilotage survenant lors de phases critiques (en particulier décollage et atterrissage) peuvent être dans certains cas assimilées à des perturbations temporaires des fonctions exécutives (FE, habiletés cognitives de haut niveau). On retrouve ces perturbations dans le syndrome dysexécutif (Baddeley, Della Sala, Papagno, & Spinnler, 1997; Manly, Hawkins, Evans, Woldt, & Robertson, 2002) observé chez des patients souffrant de lésions préfrontales focalisées dues à un traumatisme crâniocérébral (McDonald, Flashman, & Saykin, 2002) ou de maladies neurodégénératives tels que Parkinson (Brown & Marsden, 1990) et Alzheimer (Perry & Hodges, 1999). On retrouve également ce syndrome dysexécutif sous des formes plus bénignes chez le sujet âgé (Van Petten et al., 2004). La similarité des perturbations observées chez le patient, le sujet âgé ou le pilote subissant l'influence du stress, est en faveur de l'hypothèse de mécanismes cérébraux communs. Ceci suggère l'existence d'un continuum cognitif allant de l'individu sain aux performances optimales au patient aux performances altérées. Le pilote en situation dégradée est quelque part entre les deux extrêmes (Pastor, 1999).

Le dysfonctionnement temporaire ou définitif des FE et son impact sur la performance de pilotage constitue le fil rouge de cette thèse. Nous nous intéresserons en particulier à deux types de perturbations : la pression économique pesant sur les prises de décision des pilotes de ligne au moment de l'atterrissage et le vieillissement cognitif des pilotes de l'aviation générale et son impact sur le pilotage. Enfin, nous chercherons à rendre opérationnels des moyens de mesure en ligne de la performance du pilote ainsi que la détection précoce des erreurs que ce dernier pourrait commettre.

Avant d'exposer nos travaux, une première partie illustrera le positionnement théorique de cette thèse. Des questions de sécurité aéronautique et des éléments de réponses apportés par les études en facteurs humains seront évoqués dans le Chapitre I de cette première partie. Le Chapitre II sera consacré à la neuroergonomie, son champ d'étude et ses outils d'investigations. Le chapitre III traitera des FE et de leurs perturbations, qu'elles soient transitoires (émotion et stress) ou définitives (vieillesse). La seconde partie de cette thèse présentera les travaux que nous avons réalisés. Le Chapitre I traitera des travaux liés à l'identification des effets du vieillissement normal sur les FE et leurs conséquences sur le pilotage ; le Chapitre II sera consacré à l'étude de l'impact du facteur émotionnel dans la prise de décision au cours de la phase d'atterrissage ; le Chapitre III évoquera l'opérationnalisation de l'utilisation de l'oculométrie en vol réel. Enfin, dans une troisième et dernière partie, nous discuterons nos résultats et présenterons les perspectives de ce travail.

1ere partie :
Contexte théorique

“We cannot change the human condition, but we can change the conditions under which humans work” (James Reason, 2000).

Chapitre 1. Facteur humain et sécurité aéronautique

I. Accidentologie en aviation commerciale et générale

I.1. Risque aéronautique

Le progrès technique et les efforts considérables en vue d'améliorer la sécurité ont conduit les appareils à être extrêmement fiables au point que l'aviation commerciale est devenue en 2001 le moyen de transport le plus sûr en termes de passagers tués par 100 millions de passagers-kilomètres. Il faut cependant tempérer ces chiffres, même si la proportion d'accidents² par vol décroît légèrement, leur nombre absolu ne cesse de s'accroître mécaniquement en raison de l'augmentation du trafic (Fig. 1). Certains prévisionnistes estiment que ce nombre absolu doublera d'ici 2020 (Source : *Airport Council International*). Par ailleurs, même si le taux d'accident s'établit en moyenne dans le monde à 1 par million d'heures de vol, il existe de fortes disparités géographiques (0.7 accident par million d'heures de vol en Europe, 0.4 aux États-Unis, plus de 13 en Afrique). De plus, les chiffres faisant référence au nombre de tués pour 100 millions de passagers-kilomètres peuvent masquer d'autres statistiques, telles que celles des tués par 100 millions de passagers-heures. Si l'on considère ces derniers chiffres, le transport aérien est bien moins sûr que le bateau, l'autobus ou le train (Tableau 1). Enfin, du fait que les accidents se produisent majoritairement au cours de phases de vol bien spécifiques, comme le décollage et

² Selon la définition du Conseil National de la Sécurité des Transports américain, un accident implique : des dommages substantiels à l'aéronef et/ou l'occurrence de blessures graves ou du décès d'au moins un passager se trouvant sur ou dans l'appareil, par contact direct avec celui-ci, ou par exposition au souffle des turboréacteurs. Cet accident doit intervenir entre le moment où un individu prend place dans un avion avec l'intention de voyager et son débarquement.

l'atterrissage, la tendance à l'allongement des escales avec de plus faibles rotations quotidiennes explique également la baisse du nombre de crashes.

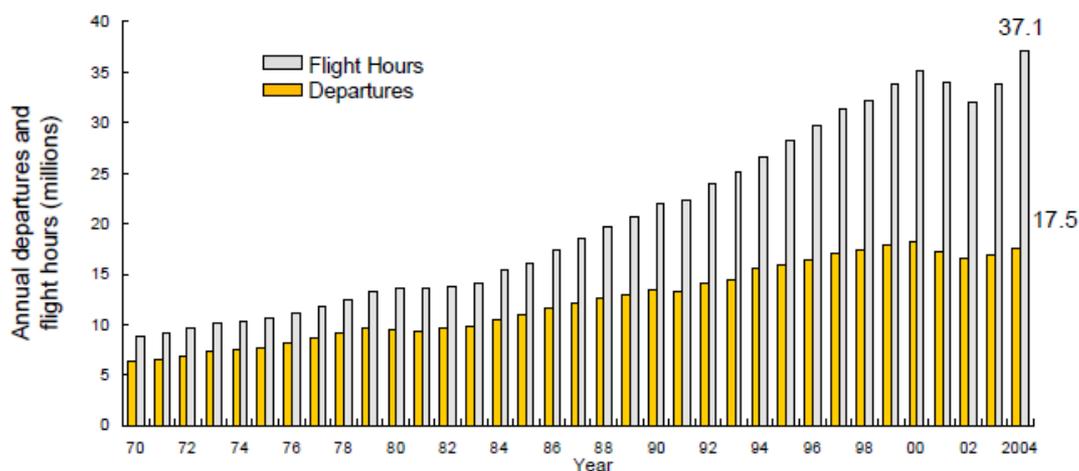


Fig. 1 : Nombre d'heures de vol et de départs annuels pour la période 1970/2004 pour l'aviation commerciale au niveau mondial. Image tirée du rapport Boeing *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959-2004*.

Tableau 1 : Taux de décès par 100 millions de passagers-kilomètres et 100 millions de passagers-heures en fonction de différents modes de transports dans l'union européenne pour la période 2001/2002. Tiré du rapport *Transport Safety Performance in the EU a Statistical Overview* (ETSC, 2003).

Road (Total)	0.95	Road (Total)	28
Motorcycle/moped	13.8	Motorcycle/moped	440
Foot	6.4	Cycle	75
Cycle	5.4	Foot	25
Car	0.7	Car	25
Bus and coach	0.07	Bus and coach	2
Ferry	0.25	Air (civil aviation)	16
Air (civil aviation)	0.035	Ferry	8
Rail	0.035	Rail	2

Table 1: Deaths per 100 million person kilometres

Table 2: Deaths per 100 million person travel hours

Contrairement aux pilotes de l'aviation commerciale (AC), les pilotes privés n'ont pas nécessairement fait l'objet d'un entraînement professionnel. Ils volent la plupart du temps seuls, sans copilote et sans système d'assistance. Ils ont également moins de support de la part du contrôle aérien et sont beaucoup plus vulnérables aux conditions météorologiques. Il n'est pas surprenant de constater que le taux d'accident dans l'aviation générale (AG) est

considérablement plus élevé que dans l'AC. La *National Transportation Safety Board*³ (NTSB) indique que l'AG est responsable de 91% des accidents et incidents et 94% des décès du transport aérien dans son intégralité (NTSB, 2005). Il faut également rapprocher deux chiffres : on estime que le taux de tués est de 0.016 pour 100,000 heures de vol dans l'AC alors qu'il est de 1.31 pour l'AG (Li & Baker, 2007). La probabilité d'accident mortel y est donc quatre-vingt-deux fois plus importante (chiffres basés sur la période 2002-2005).

Certaines phases de vol s'avèrent être plus accidentogènes que d'autres et leur participation respective à la survenue des accidents diffère quelque peu entre l'AC et l'AG.

I.2. Phases de vol et accidentologie

Entre le moment où un aéronef entame le roulage sur le tarmac de l'aéroport de départ et celui où il s'immobilise sur celui d'arrivée, un certain nombre de phases de vol bien définies sont discriminables. Chacune d'elles présente des caractéristiques propres et des risques particuliers.

Six phases de vol sont classiquement identifiées :

- Roulage : l'avion roule à faible vitesse pour atteindre la piste de décollage ou rejoindre son parking après avoir atterri ;
- Décollage et montée initiale : l'avion est mis en puissance sur la piste puis il quitte le sol et entame la montée ;
- Montée : les volets sont rentrés et l'avion continue de monter jusqu'à l'altitude de croisière spécifiée dans le plan de vol ;
- Croisière : l'avion vole à altitude pratiquement constante excepté lors du surgissement de divers événements (perturbation météorologique, conflit avec un autre aéronef...). C'est dans l'immense majorité des cas la phase la plus longue d'un vol ;
- Descente et approche initiale : l'avion descend tout en se rapprochant de l'aéroport de destination. Si le contrôle le demande, le pilote peut faire des boucles en attendant son tour pour amorcer l'approche finale ;
- Approche finale et atterrissage : l'avion s'aligne sur la piste, stabilise son plan de descente puis pose les roues sur le sol et freine.

³ Conseil National de la Sécurité des Transports, organisme indépendant du gouvernement américain responsable des enquêtes sur les accidents aéronautiques.

De façon générale, c'est lorsque l'avion est près du sol que le risque d'accident est le plus important : la charge de travail et le stress de l'équipage sont élevés et la marge de manœuvre pour compenser une erreur est extrêmement faible. Ces assertions sont largement corroborées par les observations de la modification de certains paramètres physiologiques tels que le rythme cardiaque au cours de cette phase (Lee & Liu, 2003). Les études statistiques montrent que 71% des accidents et 41% des décès de l'AC surviennent au cours de l'approche finale et de l'atterrissage, alors que ces deux phases représentent seulement 4% de l'exposition, part de temps de la phase considérée rapportée à la durée totale d'un vol standard d'une durée de 1h30 (Fig. 2).

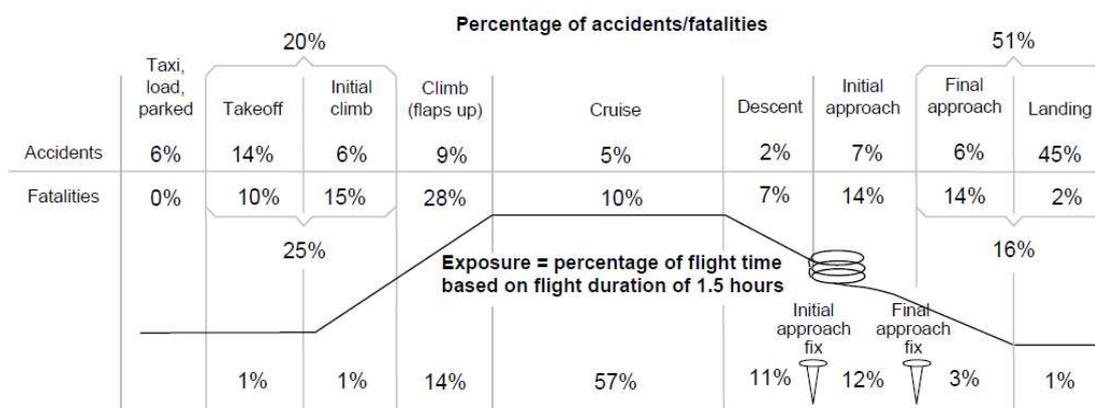


Fig. 2 : Pourcentages d'accidents et de décès pour l'aviation commerciale en fonction des différentes phases de vol. Les statistiques intègrent l'ensemble des événements au niveau mondial pour la période 1995/2004. Image tirée du rapport Boeing *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959-2004*.

Les statistiques classifiant les accidents en fonction des phases de vol dans l'AG diffèrent sur certains points de celles de l'AC (Fig. 3). En particulier, 42.4% des pertes humaines sont liées à des accidents intervenant durant la phase de croisière (contre 10% seulement pour l'AC). Le décollage et l'atterrissage demeurent des phases très meurtrières avec respectivement 19.3% et 11.7% des décès répertoriés (Bazargan & Ross, 2004). Comme pour l'AC, c'est lors de la phase d'atterrissage que se produisent la plus grande quantité d'événements aériens (Fig. 5).

Proportions d'accidents en AG selon 3 phases de vol critiques

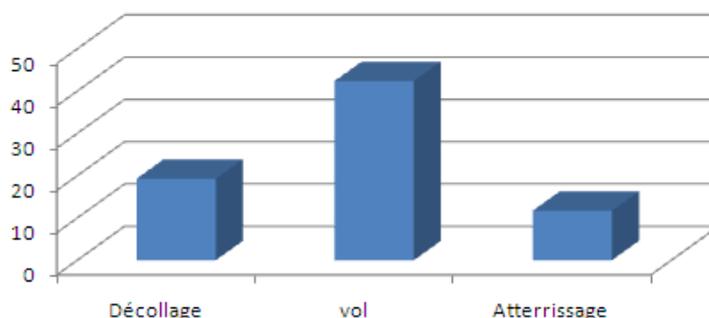


Fig. 3 : Pourcentages de décès pour l'aviation générale en fonction de trois phases de vol : le décollage, la croisière (vol) et l'atterrissage.

I.3. Taxonomie d'accidents

À la discrimination des phases de vol s'ajoute une typologie permettant de catégoriser les accidents et incidents aéronautiques. Cette typologie est réalisée par le CAST (*Commercial Aviation Safety Team*), une structure fondée en 1998 aux états unis. Ainsi, un accident intervenant au cours d'une phase de vol donnée, telle que la phase de croisière, peut être classé dans différentes catégories (défaillance du moteur, perte de contrôle en vol etc.).

Les accidents de type CFIT⁴ sont les plus fréquents et les plus coûteux en termes de vies humaines (Fig. 4). Ils concernent les accidents par collision avec le terrain, généralement un relief, alors que l'avion est parfaitement contrôlable. Au début des années 1970, un certain nombre d'études pointaient déjà la prédominance des accidents CFIT. La famille des systèmes TAWS (*Terrain Awareness and Warning System*), capables de prévenir l'équipage d'un aéronef qu'une collision avec le sol est imminente, est apparue à cette époque. Les systèmes TAWS utilisés dans les avions de ligne actuels sont le GPWS (*Ground Proximity Warning System*) et plus récemment l'EGPWS (*Enhanced Ground Proximity Warning System*). Grâce à une base de données mondiale des reliefs, ce dernier permet notamment la détection des obstacles se trouvant devant l'avion, et non plus seulement en dessous de l'avion. Cependant, ces systèmes ne suffisent pas à endiguer totalement les accidents CFIT. Ces derniers continuent de constituer la catégorie d'accidents la plus meurtrière, en raison notamment de la persistance de mauvaises prises de décisions réalisées au cours du pilotage.

⁴ *Controlled Flight Into Terrain* : impact avec le terrain sans perte de contrôle.

Une très grande partie des accidents de type CFIT se produisent sous certaines conditions caractéristiques : à basse altitude, durant la phase d’approche, dans des régions présentant du relief, lorsque la visibilité est réduite, la nuit et en cas de conditions météorologiques dégradées. Les CFIT sont typiquement des accidents consécutifs à un enchaînement d’erreurs de pilotage et de mauvaises prises de décisions. En effet, la particularité des accidents CFIT réside dans le fait que l’avion est en parfait état de fonctionnement et que l’équipage n’en a jamais perdu le contrôle. Il faut noter que les accidents CFIT peuvent également être observés chez des pilotes très qualifiés, la fatigue, la perte de la conscience de la situation et la désorientation sont des facteurs fréquemment évoqués.

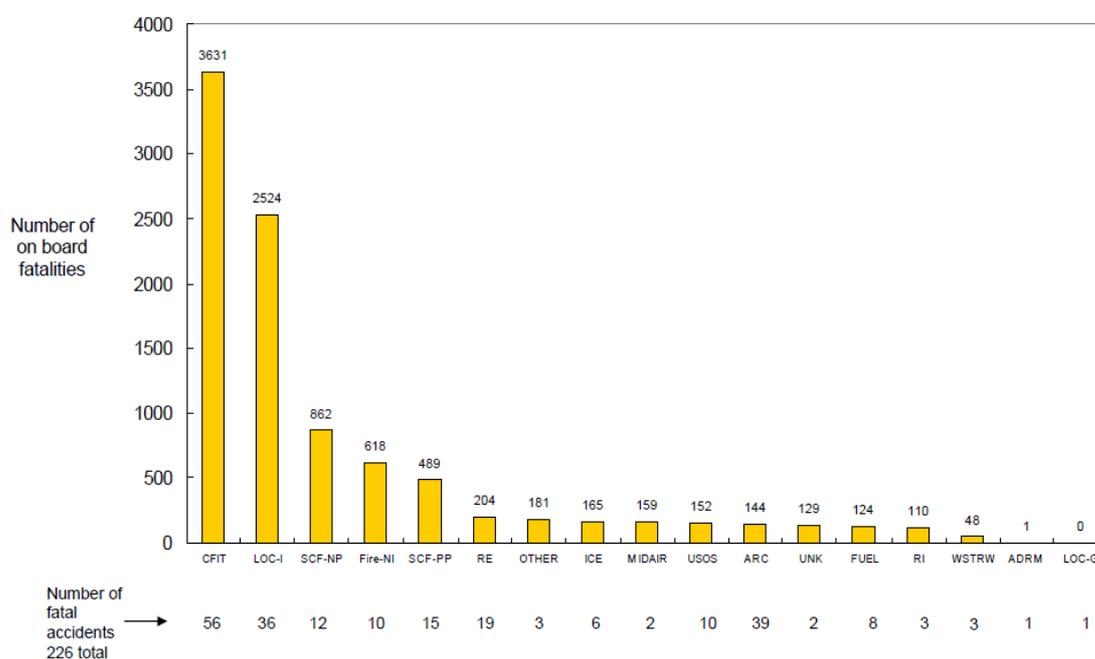


Fig. 4 : Nombre de décès et d’accidents fatals en fonction des types d’accidents définis par la taxonomie CAST/ICAO pour l’aviation commerciale au niveau mondial. Les statistiques considèrent la période 1987/2004. Tiré du rapport Boeing *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents worldwide Operations 1959 – 2004*. Légende : CFIT : impact sans perte de contrôle ; LOC-I : perte de contrôle en vol ; SCF-NP : panne ou mauvais fonctionnement d’un circuit ou d’un composant (ne faisant pas partie du groupe motopropulseur) ; Fire-NI : feu fumée (sans impact) ; SCF-PP : panne ou mauvais fonctionnement d’un circuit ou d’un composant (ne faisant pas partie du groupe motopropulseur) ; RE : sortie de piste ; OTHER : autre ; ICE : givrage ; MIDAIR : collision ; USOS : atterrissage trop court/trop long ; ARC : contact anormal avec la piste ; UNK : inconnu ou indéterminé ; FUEL : problème carburant ; RI : incursion sur piste ; WSTRW : cisaillement du vent ou orage ; ADRM : aérodrome ; LOC-G : perte de contrôle au sol.

Cette taxonomie d’accident est également employée en AG (Fig. 5). Le BEA (Bureau Enquête Analyse) montre que les pertes de contrôle en vol (LOC-I) et les collisions avec le terrain de type CFIT sont les causes d’accidents les plus meurtrières et qu’elles interviennent majoritairement

durant la phase de croisière. Une des raisons pour laquelle ces accidents ont plutôt lieu durant la phase de croisière s'explique par le fait que les avions légers volent beaucoup plus bas que les avions de ligne et sont, en conséquence, plus susceptibles de rencontrer des obstacles sur leur trajectoire. Par ailleurs, les pilotes d'avions légers volent souvent à vue, sans système d'anticollision à bord et sont fortement vulnérables aux conditions météorologiques (Capobianco & Lee, 2001).

Les facteurs favorisant l'accident sont nombreux en AG. On peut citer la complexité générée par les vols de nuit, la forte sensibilité aux dégradations soudaines de la météorologie, les spécificités de l'avion ou encore l'hétérogénéité des caractéristiques des pilotes comme l'expérience et l'âge (Bazargan & Guzhva, 2007). Enfin, nous l'avons vu, à l'instar de l'AC, la plus grande partie des événements aéronautiques se produisent durant l'atterrissage (contact anormal ou sortie de piste), Fig. 5. Ils sont très souvent la résultante de mauvaises prises de décisions, telle que celle de poursuivre l'atterrissage alors que celui-ci aurait du être interrompu en raison d'une énergie trop importante, d'une mauvaise trajectoire, d'un trop fort vent traversier etc.

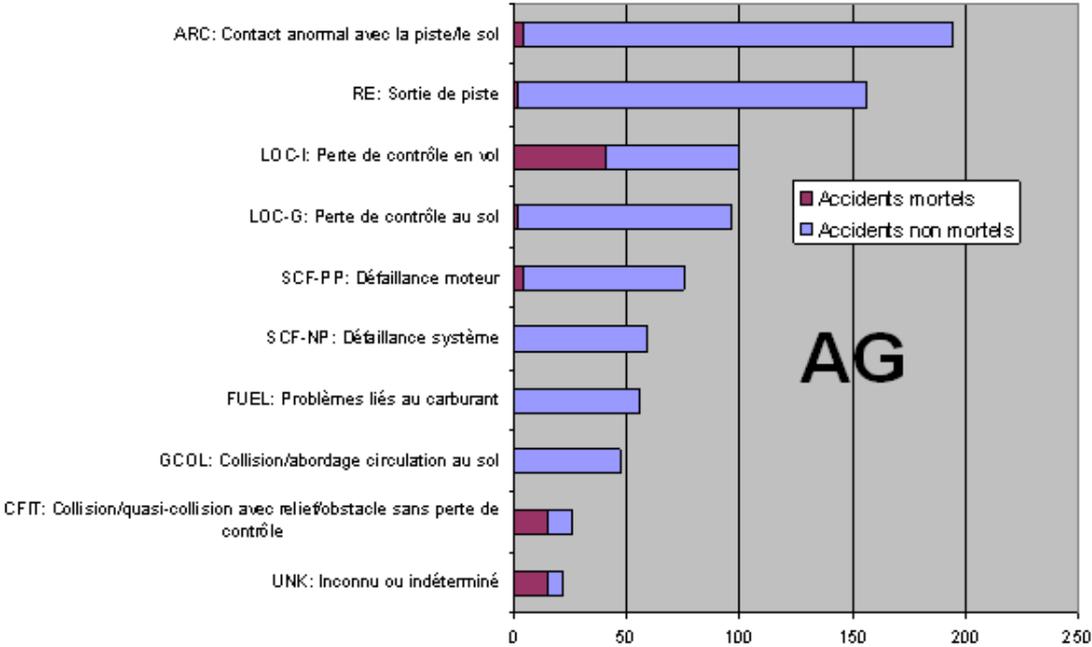


Fig. 5 : Nombre d'accidents mortels et non mortels pour l'aviation générale en fonction des catégories d'accidents CAST/ICAO (BEA, 2009).

II. Facteurs humains et accident

Les statistiques indiquent que les erreurs humaines représentent la cause prédominante d'accident dans l'aviation civile ou militaire (O'Hare, Wiggins, Batt, & Morrison, 1994; D. A. Wiegmann & Shappell, 1999). Ces chiffres sont à prendre avec précaution et sont très dépendants de la méthodologie d'enquête employée après une catastrophe. Les experts recherchent en priorité une défaillance technique. Lorsqu'il n'a pas été possible d'en identifier une, l'accident est attribué à une défaillance humaine (Dekker, 2005). Les déterminismes de l'erreur ne sont pas toujours recherchés en profondeur. Les différentes composantes du système qui ont pu être défaillantes, en particulier les interactions homme-machine ou homme-organisation ne sont pas nécessairement examinées (Dekker, 2002; Dekker, 2005; Hollnagel, 2004). Désormais, des modèles du fonctionnement humain, en particulier ceux de l'ergonomie cognitive, ont été développés pour rendre compte des déterminismes cognitifs individuels sous-jacents à la production de l'erreur et du rôle de l'organisation dans sa survenue. L'erreur humaine n'est que très rarement l'unique cause d'un accident (Wiegmann & Shappell, 2001). En introduisant son modèle de « l'emmental », Reason (1990; 2000) propose d'élargir le champ d'analyse au delà de l'opérateur situé en première ligne (*i.e.* les pilotes) pour mettre à jour ou anticiper les causes plus lointaines d'accidents. En effet, selon l'auteur, les erreurs commises par les opérateurs, les « erreurs actives », sont favorisées par des « erreurs latentes », préexistantes parfois depuis longtemps dans le système (ex : interface de contrôle mal conçue).

Les erreurs intervenant durant la phase d'atterrissage peuvent être éclairées selon le paradigme de Reason. Durant celle-ci, la production d'erreurs de pilotage est en effet fortement connectée au contexte opérationnel de l'activité de l'équipage (ex : consignes de la compagnie, formation...). Comme l'ont montré les statistiques présentées précédemment, l'atterrissage est une phase de vol particulièrement critique. Elle implique des séquences d'actions formalisées (sortir le train, déployer les volets hypersustentateurs, capturer un faisceau radio, puis un autre etc.), le passage par des points géographiques bien précis (ex : balises radios) et des processus de prise de décision basés sur des éléments rationnels (ex : prise en compte du vent traversier maximum accepté par l'appareil). Cependant, l'incertitude peut être forte au cours de cette phase et un certain nombre de biais de raisonnements peuvent altérer la pertinence des décisions prises par l'équipage. En AC, la cause de nombreux événements aériens au cours de l'atterrissage réside dans la persistance de l'équipage à mener l'atterrissage à son terme alors qu'une remise de gaz

serait nécessaire afin de retenter une nouvelle approche ou de se dérouter vers un aéroport présentant des conditions météorologiques plus favorables. Les conditions dans lesquelles une remise de gaz doit avoir lieu ne sont pas toujours bien nettes, l'incertitude est parfois très importante et l'interprétation de la situation par l'équipage peut être erronée. L'*International Air Transport Association* a mené une étude portant sur quatre-mille-neuf-cent-quatre-vingt-onze remises de gaz entre janvier 2003 et septembre 2004 (IATA, 2005). Les conclusions ont révélé qu'un accident sur trois à l'approche et à l'atterrissage aurait pu être évité si une remise de gaz avait été exécutée au moment opportun.

II.1.1. Un exemple illustratif

L'accident suivant est caractéristique de cette tendance à persister à atterrir alors que les conditions de vol ne le permettent pas.

Exemple du vol AA-1420 provenant de Dallas/Fort Worth (DFW) à destination de Little Rock (LIT) :

Le 1^{er} juin 1999, l'avion programmé au départ n'arrive toujours pas, en raison du mauvais temps autour de l'aéroport de Dallas. Le retard est tel qu'un autre appareil est demandé. Le McDonnell Douglas nouvellement affrété décolle. Durant le vol, l'équipage est informé que le temps est fortement dégradé dans la zone de l'aéroport d'arrivée, en raison notamment de la présence d'un fort vent traversier et de violents orages. La tour de contrôle demande à l'équipage de tenter d'accélérer pour arriver avant l'installation complète des perturbations. Plus tard, le contrôleur informe l'équipage qu'un vent traversier à 28 nœuds souffle dans la zone de l'aéroport. Après avoir vérifié que la tolérance maximale est de 30 nœuds sur cet appareil, le capitaine réalise qu'il fait erreur et que cette limitation concerne les atterrissages sur piste sèche, or la piste d'arrivée est contaminée (présence d'eau de pluie). Le capitaine se corrige et finit par tableur sur une tolérance maximale de 20 nœuds de vent traversier sur piste contaminée. En revanche, le copilote conclut par erreur que la tolérance maximale est de 25 nœuds. L'approche se poursuit et la tour informe de la présence de cisaillement de vents. À proximité de l'aéroport, la piste apparaît et s'évanouit plusieurs fois derrière la couche de nuages. Le contrôle informe que le vent traversier est désormais de 30 nœuds avec des rafales à 45 nœuds et qu'une pluie diluvienne s'abat désormais sur l'aéroport. Les conditions météorologiques ne sont dès lors plus compatibles avec

un atterrissage. À 400 pieds au dessus de la piste, les instruments indiquent que l'appareil dévie d'un degré (décalage d'un point sur l'instrument) sur la droite par rapport à l'axe de celle-ci. L'équipage finit par réussir à poser l'avion, mais ce dernier dérape très fortement sur la droite. Le pilote se bat avec l'appareil pour le recentrer, les inverseurs de poussée sont actionnés de façon asymétrique (davantage de puissance à gauche). L'avion dépasse le seuil de piste, percute différents éléments (chaîne de sécurité, structures de la piste...), finit par s'immobiliser et prend feu. Le capitaine ainsi que dix passagers furent tués. L'accident fit cent-cinq blessés et l'appareil fut détruit sous l'action des impacts puis de l'incendie.

Le *National Transportation Safety Board* identifia plusieurs causes à cet accident. Premièrement, l'équipage oublia de déployer les aérofreins justes après l'atterrissage et les inverseurs de poussée furent actionnés de façon asymétrique et au delà des spécifications maximales recommandées. Ensuite, la fatigue et le stress, généré par le contexte météorologique très défavorable, furent identifiés comme facteurs de dégradation des performances de l'équipage. Enfin, la plus grande responsabilité de l'accident revint à l'équipage, qui a persévéré dans la décision de continuer l'approche puis d'atterrir alors que la composante de vent traversier dépassait largement les tolérances maximales de l'appareil, telles que précisées par la compagnie. De plus, plus troublant encore, l'appareil possédait largement assez de carburant pour remettre les gaz et se dérouter sur un autre aéroport.

Dans cet exemple, l'équipage a persisté à poser l'appareil à tout prix et n'a pas envisagé la seule bonne décision à prendre : remettre les gaz et détourner l'appareil vers un autre aéroport plus sûr. L'accident de Little Rock n'était pas directement imputable aux conditions météorologiques puisqu'elles étaient connues dès la préparation du vol, puis mises à jour régulièrement jusqu'au moment de l'approche. Par ailleurs, les pilotes connaissaient les spécifications en termes de vent traversier maximal pour un atterrissage sécurisé mais semblaient s'accrocher à la spécification maximale déterminée sur une piste sèche pour se persuader que l'atterrissage était possible. La législation précise que le pilote a toute latitude pour pousser les manettes des gaz et annuler l'atterrissage (on parle alors de *go-around*) sans avoir à en demander l'autorisation à la tour de contrôle.

II.1.2. Les facteurs psychosociologiques et cognitifs connus poussant à atterrir

Lors du procès destiné à juger la responsabilité de l'équipage du vol AA-1420 de l'accident de Little Rock, une enquête a été commandée au MIT⁵ afin de déterminer si le comportement dangereux de ces pilotes correspondait à une tendance généralisée en aviation. Cette étude, menée par Rhoda et Pawlak (1999), portait sur 2000 approches. Les résultats montrèrent que 2/3 des équipages persévèrent dans leur décision d'atterrir alors que plusieurs paramètres de sécurité minimaux ne sont pas respectés (météo, état de l'aéronef etc.), ce qui nécessite selon la législation une remise de gaz, soit pour effectuer une nouvelle approche, soit pour se détourner vers un aéroport plus sûr. L'étude a montré que cette tendance à vouloir absolument atterrir est d'autant plus fréquemment observée que l'aéronef suit un avion qui vient de se poser, qu'il s'agit d'un vol de nuit, et que le départ est retardé d'au moins un quart d'heure. Il était également montré que ce type d'accidents se produisait notamment lorsque les pilotes étaient absolument décidés à atterrir pour des raisons personnelles ou professionnelles. Par ailleurs, la différence entre le nombre de pénétrations dans un orage dans l'espace aérien en route (*i.e.* en croisière) et l'espace aérien de l'approche est frappante. Les pilotes ne pénètrent à peu près jamais dans des précipitations de niveau dangereux (dit 2+) lorsqu'ils sont en croisière, tandis que des centaines de cas de pénétration sont répertoriés lorsqu'ils sont en approche pour atterrir. La psychosociologie et la psychologie cognitive offrent un éclairage pertinent permettant de rendre compte de la tendance à poursuivre l'atterrissage dans des conditions de sécurité dégradées.

Beauvois et Joules (1999) ont démontré expérimentalement *l'escalade d'engagement*, phénomène qui traduit la tendance que manifestent les individus à s'accrocher à leur première décision, même lorsqu'elle est clairement remise en cause par les faits. Les auteurs postulent notamment que plus le coût (durée, argent, effort physique ou psychologique) de l'engagement est fort, plus il est difficile de renoncer à un objectif que l'on s'est fixé. Des recherches en facteurs humains (FH) appliquées à l'aéronautique ont bien identifié ce type de phénomène qui a été renommé *Sunk Cost Effect* (O'Hare & Smitheram, 1995). Les auteurs ont observé que plus l'incident (panne, météo dégradée) se produit à proximité de l'aéroport, plus il est difficile pour les pilotes de renoncer à atterrir. Par ailleurs, Wiegmann, Goh, et O'Hare (2002)

⁵ Massachusetts Institute of Technology.

précisent que plus l'investissement dans une certaine séquence d'actions de pilotage est grand, plus faibles seront les chances d'abandonner cette séquence d'actions pour réviser les plans.

Un autre facteur explicatif de la persistance dans la décision d'atterrir réside dans le concept de *dissonance cognitive* (Festinger, 1957). Selon cette théorie, l'individu en présence de connaissances, d'opinions, de croyances incompatibles entre elles, sur l'environnement ou sur son propre comportement, éprouve un état de tension désagréable : c'est l'état de *dissonance cognitive*. Cette dissonance peut par exemple se manifester par le conflit entre « arriver avec succès à destination » et « rater mon approche ». L'individu tend à réduire la dissonance possible entre les différents éléments cognitifs présents. Ces stratégies sont appelées *modes de réduction de la dissonance cognitive*. Une de ces stratégies consiste à réfuter ce qui ne cadre pas avec les références antérieures : c'est le processus de *rationalisation*. Dès lors, l'individu mettra en œuvre des stratégies inconscientes visant à restaurer un équilibre cognitif afin de réduire la dissonance. Le pilote se persuadera par exemple que l'atterrissage sera un succès et que les probabilités de crash sont extrêmement minces.

La soumission (Beauvois & Joule, 1999) est un autre facteur psychosociologique bien identifié. En aéronautique, la hiérarchie demeure encore un élément prégnant dans les relations au sein de l'équipage. Le copilote identifie une situation potentiellement dangereuse mais n'ose pas contredire le commandant de bord qui préfère poursuivre l'atterrissage. Ce type de phénomène a été mentionné dans le rapport d'accident du vol 358 (BST, 2005) qui s'est terminé par une sortie de piste sur l'aéroport de Toronto le 2 août 2005 (dans des circonstances très similaires à celles de l'accident de Little Rock). Ce rapport stipule que chez Air France, la décision d'interrompre l'atterrissage revient au seul commandant de bord, quel que soit la personne aux commandes. Selon le document, confier à la fois au commandant de bord et au copilote la responsabilité d'annoncer une approche interrompue peut augmenter la probabilité qu'une situation dangereuse soit reconnue plus tôt et peut diminuer le temps nécessaire pour déclencher la procédure de remise de gaz.

D'autres auteurs proposent un concept connexe aux *Sunk Cost Effect*, le *plan continuation error* ou PCE (Burian, Orasanu, & Hitt, 2000). Selon ce concept, le pilote effectue une série d'actions et conserve la décision d'atterrir même s'il doit pour cela violer un certain nombre de règles de sécurité, simplement parce qu'il possède un plan de vol qu'il veut mener à son terme, ce qui biaise les prises de décision en faveur de la finalisation de l'action initialement programmée. Un autre phénomène proche de *l'effet tunnel* décrit en conduite automobile est depuis peu également évoqué. Des travaux expérimentaux menés en simulateur (Dehais, Tessier, &

Chaudron, 2003; Dehais, Tessier, Christophe, & Reuzeau, 2009) ont permis de mettre en évidence le fait que lorsque des pilotes sont confrontés à des situations difficiles et conflictuelles, ils montrent une tendance à s'attacher à la résolution du problème initial, au détriment de la surveillance des paramètres vitaux de l'appareil, et ce en dépit des alarmes auditives et visuelles présentes dans le cockpit. Par exemple, des pilotes ont pu tourner plusieurs fois par erreur autour d'une balise sans pouvoir l'atteindre jusqu'à épuisement du carburant alors qu'une correction de la trajectoire était nécessaire pour pouvoir atteindre cette balise. Ce comportement consiste à s'enfermer dans une stratégie erronée et à répéter de façon stéréotypée des réponses non pertinentes, en étant incapable d'aller chercher les indices externes qui permettraient de corriger l'erreur et de ramener la situation à la normale.

Des phénomènes proches de celui de l'*effet tunnel* sont également imputables aux effets du stress ressentis par l'équipage durant la phase d'atterrissage. Ceci est d'autant plus vrai lorsque le contexte est défavorable et que l'incertitude est grande. Comme le souligne Waldstein (2005), le stress peut avoir des effets délétères sur le fonctionnement intellectuel et sur la qualité des processus de prise de décision. La décision de persévérer dans l'atterrissage peut résulter d'une altération temporaire des capacités de jugement de l'équipage sous l'effet du stress. Ce type de phénomène a été mentionné, nous l'avons vu, comme facteur participatif à l'accident de Little Rock.

Il est intéressant de noter que les phénomènes de type PCE, ou d'*effet tunnel*, favorisent l'apparition de biais de raisonnement tel que celui de *confirmation*. Ce biais est défini comme la tendance d'une personne à chercher ou à interpréter une information de manière à ce qu'elle confirme ses préconceptions, en l'occurrence mener le plan de vol à son terme (voir Evans, 1972; Wason, 1960). Pour ce faire, un individu va accorder plus de poids aux preuves qui confirment ses hypothèses et va écarter les informations qui pourraient les infirmer. Ce biais permet d'expliquer le fait que l'équipage de Little Rock prend en compte la vitesse maximale de vent traversier sur piste sèche, alors que cette dernière est totalement contaminée.

D'un point de vue psychologique, l'excès de confiance est également une explication avancée. Le pilote a la sensation d'être invulnérable et a déjà réalisé parfaitement la même tâche à de nombreuses reprises. Cette confiance exagérée est favorisée par la très faible probabilité d'accident. On parle alors de *biais d'introspection* où le jugement rétrospectif altère l'objectivité et le raisonnement (Plous, 1993). Une étude de Wiggins & O'Hare (1995) a montré que les pilotes les plus expérimentés sont les plus susceptibles de mener à son terme un atterrissage (que cette décision soit justifiée ou non) plutôt que d'effectuer une remise de gaz. Les pilotes les moins

expérimentés sont très influencés par leur formation initiale, qui encourage généralement à faire demi-tour plutôt que de prendre un risque inutile. Il faut ajouter à cette explication l'influence de l'orgueil : dans le monde aéronautique, la remise de gaz est susceptible d'être vécue comme une défaite et une honte par les pilotes (en particulier en aviation militaire).

La prédominance des accidents au cours de la phase d'atterrissage se retrouve également en AG. Certains mécanismes psychosociaux peuvent pousser les pilotes à poursuivre leur vol pour rejoindre leur destination. Une étude menée par le Bureau Enquêtes-Analyses (BEA, 2000) s'est intéressée à la persistance des pilotes à vouloir atteindre leur destination alors que les conditions ne le permettent pas (autonomie insuffisante, environnement météorologique défavorable, tombée de la nuit). Durant la période étudiée (1991-1996), soixante accidents répondaient à cette typologie d'accident. L'étude a qualifié ce genre de comportement de *fascination de l'objectif*. Dans chacun des accidents analysés, les pilotes étaient déterminés à se rendre à des rendez-vous professionnels ou personnels prévus de longue date. Si l'on rapporte ces valeurs aux événements aériens qui se sont produits en AG durant la même période, les accidents de type *fascination de l'objectif* représentaient 4.5% du total des accidents, mais ont occasionné une proportion énorme de décès : 41.5% du total des accidents (Tableau 2).

Tableau 2 : Nombre/pourcentage d'accidents et de morts totaux et dus à *l'objectif destination*.

1991-1996	Total	Objectif-destination	Pourcentage
Accidents	1325	60	4.5%
Morts	240	100	41.5%

De façon analogue à l'étude de O'Hare (1995), un autre point du rapport mentionne que plus l'incident se passe à proximité de l'aérodrome d'arrivée, plus il est difficile pour les pilotes de renoncer à atteindre la destination (Fig. 6). De plus, en étudiant la période considérée par l'étude, aucune interruption volontaire de vol (atterrissage en campagne, ou « vacher ») n'avait fait de victime. Ce résultat est extrêmement intéressant et souligne le fait que l'interruption du vol au moment opportun augmente considérablement les chances de survie du pilote et des passagers.

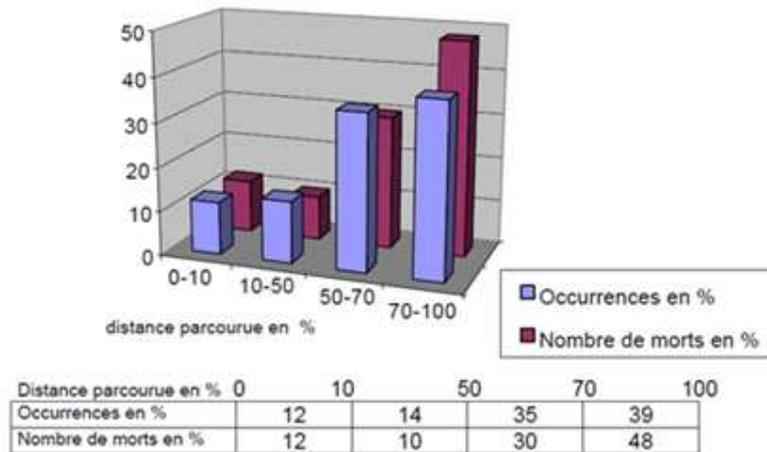


Fig. 6 : Pourcentage d'accidents et nombre de morts en fonction de la distance parcourue pour l'aviation générale. Image tirée du rapport *Objectif : destination* (BEA, 2000).

II.1.3. Facteur sociétaux émergents

Des thèmes sociétaux émergents font leur apparition dans le débat sur la sécurité. Dans le domaine du transport aérien, la raréfaction du pétrole exerce une pression sur les prix du carburant, surcoût que les compagnies répercutent sur le prix des billets. Cependant, cette augmentation des tarifs ne peut pas dépasser certaines limites et les compagnies cherchent des solutions pour réduire leurs coûts d'exploitation. Etant donnée la complexité technique que cela suppose, la consommation en kérosène des appareils ne pourra être réduite notablement avant de nombreuses années. Dans ce contexte difficile, du fait des dépenses imprévues qu'elles engendrent, les remises de gaz sont de moins en moins acceptées par les compagnies (Mefici, 2008). Dans le domaine de l'AG, un autre type de problématique apparaît : le vieillissement de la population des pilotes. Contrairement aux pilotes de lignes, ils ne font l'objet d'aucune limite d'âge. Bien que connue, cette question n'est que peu étudiée, l'immense majorité des études sur ce thème porte sur les pilotes de l'AC. Ces deux problématiques vont prendre très certainement de l'ampleur dans un futur proche et constituent des défis que le monde de la sécurité aéronautique devra relever.

II.1.3.1. La pression économique dans le transport aérien

Récemment, afin de mieux comprendre les facteurs ayant contribué au phénomène de la persévération à atterrir, des chercheurs de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) ont examiné des erreurs de décision dans un échantillon d'accidents aéronautiques sur lesquels le NTSB a fait enquête (Orasanu, Ames, Martin, & Davison, 2001). Les auteurs ont identifié de nombreux cas où l'équipage a persévéré dans le plan d'action initial, alors qu'à l'évidence, ce dernier ne convenait pas. Parmi les facteurs susceptibles de contribuer à de telles erreurs, les pressions de la compagnie furent identifiées. En effet, comme vu précédemment, une remise de gaz coûte extrêmement cher aux compagnies aériennes (kérosène et logistique notamment), surtout lorsqu'elle se poursuit par un déroutement. La culture de la compagnie pèse sur la sécurité : si celle-ci attache une connotation négative aux remises de gaz, elle est un excellent candidat aux accidents à l'atterrissage (Mefici, 2008). Les pilotes annulant un atterrissage, pour tenter une nouvelle approche, ou pour se dérouter, doivent souvent se justifier auprès de leurs supérieurs. Même si dans l'immense majorité des cas les compagnies n'ont pas recours à des sanctions en cas de remise de gaz, dans un climat de concurrence très rude, les marges de manœuvre des compagnies se réduisent. Ces dernières semblent de moins en moins enclines à supporter ce genre de dépenses imprévues⁶.

Ce témoignage d'un commandant de bord (Baron, 2009) à la suite d'une remise de gaz est symptomatique des pressions exercées par certaines compagnies :

« Le jour suivant (la remise de gaz), je reçu un appel de ma compagnie charter me demandant pourquoi j'avais effectué une remise de gaz (en effet, ce sont des événements rares). Je leur donnais les détails et leur expliquais que je pensais avoir pris la bonne décision pour la sécurité de tous. La réponse de la compagnie fût que j'avais dépensé énormément de kérosène et que c'est elle qui devrait en assumer le coût. Personne ne conclût que j'avais pris une sage décision en tant que capitaine de l'appareil. D'un autre côté, je reste persuadé que si j'avais atterri et provoqué un accident, la même compagnie m'aurait demandé comment j'avais pu prendre une si terrible décision (atterrir) dans de telles conditions (si toutefois j'avais été vivant pour en parler...) ».

⁶ Il faut noter que cette pression à atterrir, exercée par la compagnie, possède son pendant pour les décollages, notamment dans le cadre des vols médicaux : on parle alors de « *pressure to fly* » (NEMSPA, 2009).

II.1.3.2. L'âge en aviation générale

L'âge moyen des pilotes de l'AG est en nette augmentation aux USA (Hardy & Parasuraman, 1997) et dans d'autres pays européens telle que la France où 41% des pilotes privés ont plus de cinquante ans (source: BEA, 2008, Fig. 7). Les acteurs de la sécurité aéronautique focalisent leur intérêt sur l'impact que peut avoir le vieillissement sur les performances intellectuelles, et donc sur la capacité à piloter. En effet, chez le pilote âgé, le déclin cognitif est considéré comme étant un facteur de risque bien plus important qu'une incapacité physique soudaine telle qu'une crise cardiaque (Schroeder, Harris, & Broach, 2000).

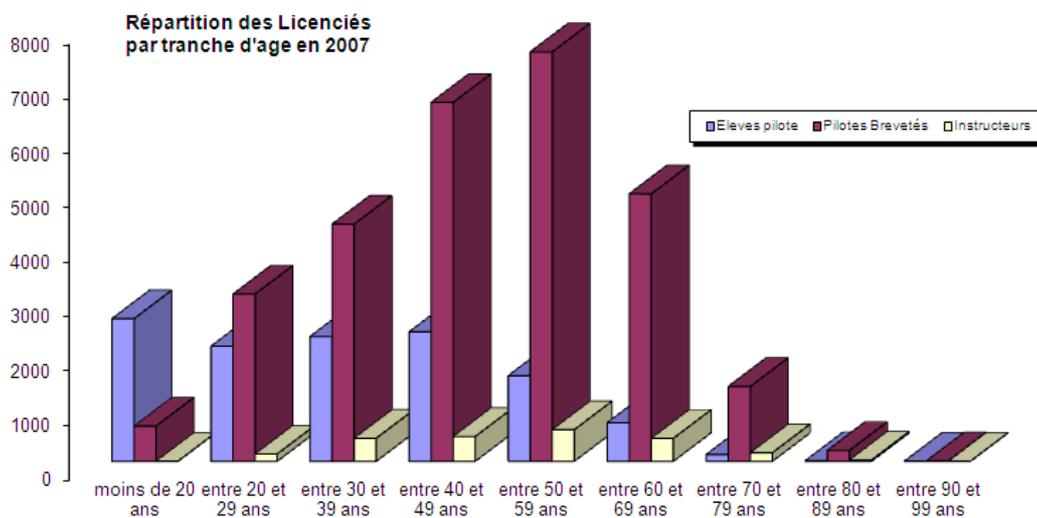


Fig. 7 : Répartition des licenciés de l'aviation générale par tranche d'âge des élèves, pilotes et pilotes instructeurs pour l'année 2007.

Le lien entre fonctions cognitives et pilotage est un thème étudié depuis de nombreuses années en AC. Dans ce domaine, la *Age 60 rule* limitant l'âge des pilotes de ligne à soixante ans fût établie dès 1959 afin de diminuer la part de la contribution humaine aux accidents aériens. Cependant, en 1979, le congrès américain mandata une réévaluation de cette loi. Devant la difficulté à mettre en évidence des preuves irréfutables de la dangerosité des pilotes d'un âge supérieur à soixante ans, le NIA (*National Institute on Aging*, institut national du vieillissement américain) recommanda la mise en œuvre de recherches supplémentaires pour développer des mesures objectives et quantifiables de la performance générale des pilotes.

Aucune limitation d'âge n'existant dans l'AG, le besoin d'évaluer l'état cognitif des pilotes est une préoccupation grandissante. Cependant, la question est complexe et malgré les travaux

réalisés dans le cadre de l'AC, des conclusions définitives sur les liens entre vieillissement et performance de pilotage ne sont toutefois pas encore établies. En effet, un effet significatif de l'âge sur l'occurrence d'accidents aéronautiques est retrouvé par certains auteurs (Booze Jr, 1977; Yesavage, Taylor, Mumenthaler, Noda, & O'Hara, 1999) alors que d'autres études montrent le contraire (Li, Baker, Grabowski, & Rebok, 2001; Li et al., 2003; Li, Baker, Lamb, Grabowski, & Rebok, 2002). Ce manque de consensus dans la littérature pourrait trouver une explication dans la variabilité existante entre les individus au cours du vieillissement normal (Buckner, 2004). Par ailleurs, les pilotes âgés accumulent généralement plus d'expérience, très souvent considérée comme protectrice des effets du vieillissement, ce qui expliquerait au moins en partie la grande difficulté d'obtenir des résultats définitifs sur les effets de l'âge sur la qualité du pilotage ou des prises de décision (Li et al., 2003).

Il existe extrêmement peu d'études portant sur les effets du vieillissement cognitif des pilotes de l'AG, l'immense majorité des recherches focalisent leurs investigations sur la population des pilotes de ligne. Pourtant, le pilotage d'un avion léger est une activité qui diffère sur de nombreux points du pilotage d'un avion de ligne. Les pilotes de l'AG sont très souvent seuls, ne possèdent pas de système d'assistance ou d'aide à la décision et reçoivent beaucoup moins d'information du contrôle aérien. De plus, la gestion de la navigation se fait en temps réel, sans l'aide d'un autopilote et de très nombreuses informations doivent être intégrées et mises à jour en continu telles que l'état du trafic ou l'évolution des conditions météorologiques. Il faut ajouter que contrairement aux pilotes professionnels, les pilotes de l'AG ne bénéficient pas nécessairement d'un entraînement professionnel. En raison de toutes ces spécificités, le vieillissement cognitif des pilotes de l'AG est un élément très important à prendre en compte, et la définition de tests évaluant les fonctions cognitives les plus cruciales à l'activité de pilotage sont un des points clefs de l'amélioration de la sécurité aérienne.

III. Conclusion : de la nécessité de la neuroergonomie

Le secteur aérien mobilise des efforts importants pour assurer un très haut niveau de sécurité. Les FH ont permis de faire des progrès spectaculaires en ce qui concerne la qualité de l'interaction entre le pilote et son aéronef. L'identification des phases de vol critiques permet de cibler efficacement les efforts à fournir, que ce soit dans l'AG ou dans l'AC. Par ailleurs, la prise en considération des facteurs accidentogènes (théories psychosociales, biais de raisonnement, vieillissement des pilotes etc.) offre des pistes intéressantes pour expliquer et prévenir des comportements anormaux observés chez certains équipages. De nombreuses problématiques persistent cependant.

Les erreurs décisionnelles continuent de représenter une large part des facteurs causaux d'accidents. En AC, ces mauvaises décisions s'observent notamment lors de la phase d'approche et d'atterrissage, où certains équipages persistent à vouloir mener le plan de vol à son terme, malgré des conditions de sécurité ne le permettant pas. En AG, les mauvaises prises de décisions provoquent des conséquences analogues, mais impactent également sur la qualité de la navigation durant la phase de croisière. La nature de l'aviation légère (moins de systèmes d'aide, formation moins poussée, absence de copilote etc.) explique en grande partie ce phénomène. Ces problématiques qui relèvent des FH sont extrêmement complexes et généralement décrites en termes comportementaux. Même si des progrès notables ont pu être faits grâce aux FH sur la compréhension des facteurs influençant le processus de prise de décision (ex : PCE), d'autres disciplines, telles que la neuropsychologie et la neuroéconomie, se sont intéressées aux perturbations de la prise de décision sous l'effet du stress, de l'émotion ou de la manipulation de la récompense, et ont montré l'existence de mécanismes fondamentaux (*i.e.* des primitives) à la base de ces perturbations. Nous pensons que l'utilisation des résultats théoriques et pratiques de ces disciplines peut apporter de nouveaux éclairages pour comprendre les mécanismes sous-jacents aux erreurs décisionnelles rencontrées en aéronautique.

Par ailleurs, bien que les différents acteurs de la sécurité aéronautique aient conscience de la problématique posée par le vieillissement cognitif des pilotes de l'AG, très peu de recherches portent sur cette population. Les études réalisées dans le cadre de l'AC ne parviennent pas véritablement à un consensus clair sur les effets délétères du vieillissement normal sur les

performances de pilotage, et donc sur les risques générés par la présence de pilotes âgés aux commandes d'aéronefs.

Notre hypothèse est que l'âge biologique est un critère insuffisant pour déterminer si un pilote est en mesure de continuer à piloter ou non, ceci en raison notamment de la variabilité entre les individus de l'impact du vieillissement sur le fonctionnement cognitif (Buckner, 2004; Schroeder, Harris, & Broach, 1999). Nous pensons que l'évaluation des effets du vieillissement doit être réalisée sur des critères pertinents, et que la définition de ces critères passe par la sélection de tests neuropsychologiques adaptés, évaluant précisément les fonctions cognitives les plus cruciales au pilotage. Cette compréhension fine implique nécessairement une étude en profondeur des effets du vieillissement sur le cerveau et de leurs conséquences sur la performance de pilotage. Nous émettons l'hypothèse que certaines fonctions intellectuelles de haut niveau, les FE, sous-tendues notamment par les lobes préfrontaux, devraient faire l'objet d'une évaluation plus poussée, car elles sont selon nous essentielles à l'activité de pilotage.

Enfin, l'analyse des facteurs causaux des événements aériens permet de comprendre le contexte dans lequel la production d'erreur est apparue, mais ceci n'est possible qu'une fois que la catastrophe s'est déjà produite. Il est parfaitement impossible de prévoir le moment où la concordance d'erreurs actives et latentes va générer une catastrophe (cf. Reason, 2000) ! L'activité de pilotage prend place dans un système extrêmement complexe. La modélisation exhaustive des situations à risque n'est ni possible, ni suffisante car elle ne prend pas en compte l'état du pilote. Cette analyse en temps réel de l'état du pilote, en vue de détecter et prévenir d'éventuels comportements à risque, passe également notamment par une l'observation du fonctionnement cérébral. Bien sûr, pour des raisons techniques, cette mesure *in situ* est extrêmement difficile, mais des solutions existent, par exemple par l'enregistrement de certains paramètres physiologiques (activité du système nerveux autonome, comportement oculaire etc.), indices périphériques de l'activité cérébrale.

Les études en FH décrivent les effets de certaines situations sur le comportement, mais il n'est pas possible de déterminer à l'avance l'ensemble des cas de figures auxquels le pilote va être confronté, ni tous les comportements qu'il est susceptible d'avoir. Quand bien même il serait possible d'établir une nomenclature de toutes les situations potentiellement critiques, cela ne ferait que rajouter une multitude de procédures à suivre dont le nombre même serait source de nouvelles erreurs. Il faut déterminer les invariants responsables des comportements anormaux, invariants qui seront mis en œuvre dans des situations différentes. Ces invariants comportementaux sont en particulier le résultat de mécanismes cérébraux contraints par la

neurophysiologie. C'est là, l'objet de la neuroergonomie (Parasuraman, 2003; Sarter & Sarter, 2003) qui étudie l'homme au travail comme un système biologique, soumis à des contraintes physiologiques, en particulier liées au fonctionnement de son cerveau en interaction avec un autre système, naturel ou artificiel. La neuroergonomie bénéficie d'avancées récentes en neuropsychologie et plus largement en neurosciences. Ces progrès ont été rendus possibles par le développement de nouvelles approches expérimentales et de techniques telles que l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRMf), la psychophysiologie, l'étude de patients cérébrolésés ou encore les batteries de tests neuropsychologiques. C'est l'approche que nous proposons de suivre dans cette thèse pour étudier la problématique des erreurs décisionnelles chez le pilote âgé en AG, ou chez le pilote de ligne lors de l'atterrissage. C'est également dans cette perspective que nous essayons d'opérationnaliser nos résultats en réalisant des mesures oculométriques et psychophysiologiques en vol réel.

Le chapitre II de cette première partie décrira la neuroergonomie, ses objectifs, ses objets d'études et les moyens d'action qu'elle possède pour améliorer la sécurité. Nous évoquerons les acquis de la discipline, par la présentation d'études représentatives. Nous aborderons également les progrès restant à accomplir dans ce domaine. Le chapitre III se focalisera sur les FE, capacités cognitives de haut niveau que nous considérons essentielles à l'activité de pilotage. Les effets délétères du vieillissement et de l'émotion sur les FE seront présentés en détail. Nous finirons ce chapitre en évoquant la neuroéconomie, autre discipline émergente, qui nous a offert un cadre expérimental pour la réalisation de notre étude en neuroimagerie. Les résultats expérimentaux seront présentés en 2^e partie. Le chapitre I traitera de l'influence de l'âge sur les fonctions exécutives et sur la performance de pilotage. Le chapitre II abordera l'influence du facteur émotionnel sur la décision d'atterrir. Le chapitre III présentera les résultats de l'opérationnalisation en vol réel d'études réservées classiquement au laboratoire, par l'emploi de mesures oculométriques.

**« A science of the mind must reduce ...
complexities (of behavior)
to their elements. A science of the brain must
point out the
functions of its elements. A science of the
relations of mind and
brain must show how the elementary
ingredients of the former correspond to the
elementary functions of the latter. »
(William James, 1890).**

Chapitre 2.

La neuroergonomie

I. Définition et champ d'application de la neuroergonomie

La neuroergonomie est l'étude du cerveau et du comportement au travail. Comme son nom l'indique, cette science émergente fusionne deux disciplines elles-mêmes interdisciplinaires : les neurosciences et l'ergonomie (FH est synonyme d'ergonomie aux USA). Les neurosciences étudient le système nerveux, du niveau moléculaire à celui des réseaux fonctionnels d'aires cérébrales. L'ergonomie étudie l'utilisation de technologies par l'homme, dans son travail ou toute autre situation du monde réel. À l'intersection, la neuroergonomie focalise ses investigations sur les bases neuronales qui sous-tendent les fonctions cognitives (prise de décision, mémoire, attention etc.) impliquées dans l'utilisation de technologies (Parasuraman, 1998) ainsi que celles qui sont reliées à la performance physique, l'humain interagissant avec le monde au travers d'une enveloppe corporelle. Dans ce dernier cas on parle de neuroergonomie physique (Karwowski, Siemionow, & Gielo-Perczak, 2003). Les environnements d'étude de la neuroergonomie sont divers, informatique au sens large, conduite automobile ou encore pilotage d'avion. Ses outils sont généralement issus des neurosciences : neuroimagerie, batteries d'évaluations neuropsychologiques, neuropharmacologie etc.

L'ergonomie traditionnelle a prêté peu d'attention aux découvertes récentes des neurosciences modernes. Dans le même temps, les spécialistes des neurosciences n'ont été que très partiellement préoccupés par les avancées concernant l'homme en fonctionnement réel (en opposition au contexte du laboratoire). Dans ce sens, le transfert à la vie réelle des évaluations neuropsychologiques et des méthodes de réhabilitation n'est pas toujours bien évalué. La neuroergonomie est une proposition qui vise à établir un dialogue entre deux disciplines. Son

principe fondamental est de comprendre comment le cerveau accomplit une activité dans le monde réel, et non pas seulement dans un laboratoire. Cette approche apporte des éléments d'intérêt substantiels à l'ergonomie qui peut ainsi raffiner son socle théorique grâce à une meilleure compréhension des mécanismes cérébraux impliqués dans les phénomènes qu'elle observe déjà depuis des années. Un des enjeux est de permettre d'aller au delà des approches basées seulement sur le comportement visible ou sur le ressenti subjectif des opérateurs, parfois très difficiles à obtenir (Parasuraman & Mouloua, 1996). Un des avantages majeurs qu'offre la neuroergonomie dans le cadre de notre travail réside dans le fait qu'elle apporte les outils permettant d'identifier les invariants responsables des comportements anormaux, invariants qui seront mis en œuvre dans des situations différentes et qui découlent des mécanismes cérébraux contraints par la neurophysiologie.

I.1. Les outils de la neuroergonomie

La neuroergonomie s'est approprié les outils de mesure des neurosciences pour les appliquer aux problématiques de l'ergonomie (Fig. 8). Les enjeux en sont divers, l'évaluation et l'ajustement de la charge de travail d'un opérateur avant que les effets d'une surcharge soient observables sur le comportement ou l'évaluation de l'efficacité d'une IHM en sont des exemples. Nous nous proposons de passer en revue ces différentes techniques de mesure dans la section suivante.

I.1.1. Électro-encéphalographie

L'électro-encéphalographie (EEG) est la mesure de l'activité électrique du cerveau par des électrodes placées sur le cuir chevelu. L'activité est généralement matérialisée sous la forme d'un tracé appelé électro-encéphalogramme. Le signal électrique à la base de l'EEG est la résultante de la sommation des potentiels d'action post-synaptiques synchrones issus d'un grand nombre de neurones. L'EEG présente une activité rythmique sur différentes fréquences que l'on peut classifier. Les ondes :

- Delta (jusqu'à 4Hz), retrouvées au cours du sommeil profond ;
- Thêta (4-7 Hz), retrouvées dans la somnolence ;

- Alpha (8-12 Hz), apparaissant pendant la relaxation ou lorsque les yeux sont fermés ;
- Beta (12-30 Hz), retrouvées pendant l'alerte, l'activité intellectuelle, la concentration ou l'anxiété ;
- Gamma (30-100+ Hz), apparaissant au cours d'une intense activité mentale et dans certaines fonctions motrices.

Plusieurs potentiels évoqués (PE) cognitifs ont été associés à des événements particuliers (*Event Related Potential*⁷) et reflètent une activité mentale intervenant au cours de la réalisation de tâches. En fonction de la latence de leur apparition après le stimulus, ils sont considérés comme plus ou moins précoces et reflètent ainsi des traitements de plus ou moins bas niveau. Ils se traduisent par une réponse électrique positive ou négative (notée P ou N). Leur mise en évidence nécessite de nombreuses répétitions pour les faire émerger du bruit électrique ambiant produit par le cerveau. Parmi ces PE on peut citer les principaux :

- La N100, déviation négative dont le pic intervient autour de 100 ms après la présentation d'un stimulus. Elle est retrouvée dans les régions fronto-centrales, le gyrus temporal supérieur ainsi que le gyrus de Heschl (aire auditive). Elle est élicitée par la survenue de stimuli inattendus, en l'absence de consigne (ex : fréquence discordante d'un son dans une série homogène). Survenant tôt dans la chronologie des traitements, elle est considérée comme la manifestation de processus perceptifs pré-attentifs ;
- La P300, réponse de voltage positif apparaissant avec une latence d'environ 300 ms après le stimulus. Elle est classiquement enregistrée dans les régions pariétales et associée au traitement de stimuli pertinents (*i.e.* qui sont les cibles de la tâche accomplie par le sujet) et rares. Sur le plan des PE, l'onde P300 est sensible à la rareté du stimulus cible : elle est d'autant plus ample que sa probabilité est faible (*i.e.* que le stimulus est rare) ;
- La N400, caractérisée par une déviation négative atteignant son pic autours de 400 ms après la présentation du stimulus. On la retrouve fréquemment dans le site pariétal central. Cette composante est couramment retrouvée dans les traitements linguistiques lorsqu'on présente visuellement ou auditivement une phrase se terminant par un mot dont la sémantique est incongrue (Kutas & Hillyard, 1983; Osterhout & Holcomb, 1992) ;
- La P600, réponse de voltage positif apparaissant environ 600 ms après le stimulus. Elle est liée notamment aux traitements linguistiques et apparaît à l'écoute ou à la lecture d'erreurs grammaticales et syntaxiques (Kutas & Hillyard, 1983; Osterhout & Holcomb, 1992). Elle est classiquement enregistrée dans les aires centro-pariétales. Cependant, une

⁷ ERP.

étude récente en magnétoencéphalographie (Service, Helenius, Maury, & Salmelin, 2007) indique que cette composante proviendrait des régions temporales, proche de l'aire de Wernicke (une des aires du langage). Cette composante est également retrouvée en cas d'incongruité sonore au sein d'une mélodie (Besson & Faïta, 1995) ;

- La négativité de discordance (Mismatch negativity, MMN, Näätänen, Paavilainen, Tiitinen, Jiang, & Alho, 1993), onde négative apparaissant vers 100-200 ms. Cette déviation négative est élicitée par la détection involontaire d'un stimulus discordant, par exemple un son déviant sur des caractéristiques telles que la hauteur, la durée ou le volume.
- La variation contingente négative (VCN), onde au voltage négatif observée lors de l'anticipation d'un évènement.
- *L'error-related negativity* (négativité reliée à l'erreur), composante négative et précoce, le pic apparaît autours de 150 ms après avoir réalisé une réponse erronée. Elle est détectée dans les zones fronto-centrales. Ruchow et collaborateurs (2002) ont par exemple montré que cette composante apparaît lorsque le feedback informe le participant qu'il a réalisé un mauvais choix.

Ces PE sont exploités en neuroergonomie pour évaluer la charge mentale, comprendre les bases neuronales de la détection d'erreur et du *monitoring* de la performance, observer la préparation à l'action ou encore étudier les processus automatiques (Fu & Parasuraman, 2006).

I.1.2. l'IRMf

I.1.2.1. L'effet BOLD

La mesure des variations de l'activité des neurones est réalisée par une méthode indirecte : la mesure de variation du débit sanguin cérébral local. Il a en effet été constaté que l'activation des cellules nerveuses est suivie de quelques secondes par une augmentation du débit sanguin dans le réseau de capillaires irriguant la zone activée. Les premières expériences en IRMf faisaient appel à l'injection d'un produit de contraste, en général le gadolinium, qui permettait de recueillir un signal RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) dépendant du flux sanguin. Il est cependant rapidement apparu que le sang contenait un produit de contraste endogène, l'hémoglobine (Kwong et al., 1992; Ogawa et al., 1992). En effet, l'oxyhémoglobine, chargée en oxygène, est diamagnétique : sa sensibilité au champ magnétique est faible et a peu d'influence sur le champ magnétique local. En revanche, la désoxyhémoglobine, qui a cédé son oxygène au tissu environnant, est paramagnétique : placée dans un champ magnétique, elle présente une aimantation qui provoque une perturbation très localisée du champ. Par conséquent, lorsqu'un sujet est placé dans une IRM, le champ magnétique au voisinage de la désoxyhémoglobine diffère de celui près de l'oxyhémoglobine : la désoxyhémoglobine se comporte comme une hétérogénéité magnétique. Cela a pour conséquence une perte du signal RMN, notamment par une augmentation de la vitesse de déphasage des moments magnétiques des noyaux d'hydrogène des molécules d'eau environnante. L'effet produit a été baptisé BOLD (*Blood Oxygenation Level Dependant*), effet dépendant du niveau d'oxygénation du sang. Lors de l'augmentation de l'activité d'une zone considérée, le débit sanguin cérébral local s'accroît et a pour conséquence l'augmentation du rapport oxyhémoglobine/désoxyhémoglobine, cet apport d'oxygène réduit les hétérogénéités dues à la désoxyhémoglobine, le signal RMN s'élève. Le signal BOLD présente une décroissance initiale environ une seconde après l'activation neuronale. Cette décroissance correspond à la mobilisation de l'oxygène local. On observe ensuite l'effet principal, celui auquel les machines d'acquisition s'intéressent, qui se traduit par une augmentation progressive du signal correspondant à l'afflux sanguin jusqu'à un maximum environ quatre à six secondes après une activation ponctuelle des neurones (ce temps dépend notamment de l'aire cérébrale concernée). Le signal décroît ensuite en une demi-douzaine de secondes.

I.1.2.2. Les designs expérimentaux

L'effet BOLD et les séquences EPI (*Echo Planar Imaging*⁸) permettent de recueillir un signal sensible à l'activité cérébrale, mais ce signal est faible et relatif. En effet, l'activation d'une zone cérébrale ne fera varier au mieux le signal RMN que de 2 à 3%. Cette variation peut même souvent être inférieure à 1% en dehors des aires cérébrales primaires. De plus, l'obtention des valeurs absolues du débit sanguin n'est pas envisageable car aucune calibration n'est possible et seules les comparaisons entre deux états peuvent faire apparaître des activations. Il est donc nécessaire de tenir compte de ces contraintes lors de l'élaboration du plan expérimental.

Le plus simple, consiste à alterner des périodes de repos avec des périodes d'activité pendant lesquelles le participant accomplit une tâche donnée. Plusieurs images sont acquises durant chaque période (ou bloc) d'une durée comprise en général entre quinze et trente secondes. La répétition de la tâche (ou du stimulus) pendant le bloc augmente, par sommation, l'activité des zones cérébrales sollicitées. La répétition des acquisitions permet d'établir un décours précis du signal. Il est possible de remplacer l'alternance repos/activité par une succession de blocs présentant un nombre de conditions plus élevé, une série de blocs d'une condition pouvant servir de référence pour la mesure de l'activité pendant une autre série de blocs. Il est ensuite possible d'effectuer un traitement statistique visant à mettre en évidence des zones dont le comportement diffère d'une condition à l'autre. Cette méthode est dite *block design* ou « mode bloqué ».

Une méthode plus récente consiste à délivrer les stimuli un par un, en effectuant plusieurs acquisitions après chacun d'eux. C'est pourquoi elle est nommée *single event* ou événementielle. Son principal intérêt est de permettre une succession aléatoire des stimuli, qui ne sont plus nécessairement disposés en blocs homogènes. Cela permet de reproduire des protocoles neuropsychologiques classiques pour lesquels le sujet doit prendre une décision en fonction de stimuli présentés selon un plan pseudo-aléatoire. Il est alors également possible de comparer statistiquement l'activité cérébrale, en particulier en séparant les échecs des bonnes réponses, ou de comparer les activations en fonction des temps de réponses des participants à une tâche donnée, ce que le mode bloqué ne permet pas. Le mode événementiel est plutôt réservé à des tâches cognitives de haut niveau, ou nécessitant un effort cognitif important, générant des différences d'activité cérébrale plus nettes. Ce type de design requiert généralement plus de répétitions que le mode bloqué, et donc des durées expérimentales plus longues.

⁸ Technique d'acquisition des images dont la vitesse est optimisée.

Les techniques d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ont été traditionnellement exploitées dans le cadre de paradigmes extrêmement contrôlés. De telles approches, aussi importantes soit-elles, n'expliquent pas toujours fidèlement comment le cerveau fonctionne en situation réelle. D'un autre côté, la neuroergonomie exploite les techniques IRMf dans le cadre de protocoles complexes, les plus réalistes possibles, ce qui rend parfois difficile l'analyse et l'exploitation des données issues de tels paradigmes. Cependant, l'intérêt grandissant à produire des protocoles écologiques apporte avec lui la généralisation de nouvelles techniques d'analyses qui ouvrent des possibilités d'exploitation de données issues de telles expérimentations.

I.1.3. L'imagerie spectroscopique en proche infrarouge

L'imagerie spectroscopique en proche infrarouge (*Functional Near-Infrared Imaging* - NIRSI) est une technique très prometteuse. Alors que la gamme du proche infrarouge (entre 700 et 900 nm) peut traverser sur plusieurs centimètres les tissus humains, la molécule d'hémoglobine, en revanche, réfléchit la lumière dans cette gamme et son spectre d'absorption est différent selon qu'elle transporte une molécule d'oxygène (oxyhémoglobine) ou non (désoxyhémoglobine). La consommation d'oxygène d'une région cérébrale active peut donc être observée. Cette technologie possède une meilleure résolution temporelle (et possiblement spatiale) que les techniques d'imagerie de type IRMf (Gratton & Fabiani, 2001; Gratton, Fabiani, Elbert, & Rockstroh, 2003). Elle offre également les avantages d'être transportable et peu coûteuse (entre vingt-mille et deux-cent-mille euros), en comparaison d'une IRMf qui peut largement dépasser le million d'euros. Une des mises en pratiques de la NIRSI en neuroergonomie est l'enregistrement de l'activité cérébrale en temps réel en vue de contrôler des systèmes sans intervention motrice (Ayaz, Shewokis, Bunce, Schultheis, & Onaral, 2009).

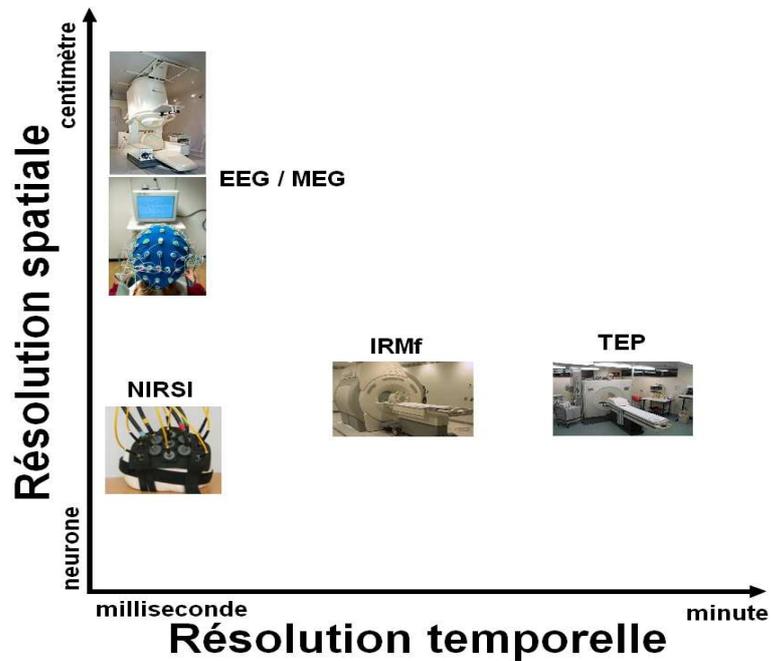


Fig. 8 : Différentes méthodes d’investigation de l’activité cérébrale classées en fonction de leur résolution spatiale et temporelle.

I.1.4. La rTMS

Les techniques d’imagerie peuvent être complétées par des techniques de stimulation comme la rTMS (*Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation* ou Stimulation Magnétique Transcrânienne Répétée). La rTMS, selon sa fréquence de stimulation, peut activer (à partir de 5Hz) ou inhiber (en dessous de 5 Hz) localement et de façon totalement réversible certaines populations de neurones. La rTMS inhibitrice crée ainsi des lésions virtuelles (Pascual-Leone, Bartres-Faz, & Keenan, 1999), ce qui permet d’examiner les conséquences comportementales de l’inactivation de certaines régions cérébrales et donc de tester des hypothèses sur la contribution de ces régions à la performance humaine. Dans le cadre de la neuroergonomie, l’utilisation de ce type d’outil demeure pour l’instant réservée à la recherche fondamentale en laboratoire.

I.1.5. La psychophysiology

Les mesures physiologiques du corps comme le rythme cardiaque, la réponse électrodermale, les catécholamines urinaires ou le diamètre pupillaire ont été employées depuis des années par la psychologie, puis plus récemment par l'ergonomie. Le champ de la psychophysiology s'intéresse à ces mesures en les reliant au fonctionnement psychologique. Il y a quelques années, un groupe nommé *psychophysiology in ergonomics* a été formé précisément dans le but de mieux cerner les apports de ce type d'enregistrement à l'ergonomie (Boucsein & Backs, 2000). L'intérêt de ce type de mesures tient au fait qu'elles offrent des index de l'activité cérébrale reliés aux processus perceptifs, affectifs, cognitifs et moteurs du fonctionnement humain. Ces index peuvent être mesurés dans un environnement de travail par des dispositifs embarquables. Ils permettent d'évaluer comment une fonction cérébrale est reliée à la performance humaine dans un environnement où les moyens lourds de la neuroimagerie sont inutilisables. Concrètement, les enregistrements psychophysiology permettent d'observer les variations de l'activité du système nerveux autonome (SNA), en fonction de la charge mentale, de l'attention ou encore de l'émotion et du stress.

I.1.5.1. Le système nerveux autonome

Le SNA (ou système nerveux végétatif) est constitué de nerfs qui interviennent dans la régulation des fonctions vitales internes. Ils contribuent à l'équilibre de notre milieu intérieur en coordonnant des activités comme la digestion, la respiration, la circulation sanguine, l'excrétion ou la sécrétion d'hormones. Le SNA est à son tour subdivisé en deux catégories : le système nerveux sympathique et le système nerveux parasympathique (Fig. 9).

- L'activation du système nerveux sympathique (ou orthosympathique) prépare l'organisme à l'activité physique ou intellectuelle. Lors d'un stress important, c'est lui qui orchestre la réponse de fuite ou de lutte. Il dilate les bronches, accélère l'activité cardiaque et respiratoire, dilate les pupilles, augmente la sécrétion de la sueur, la tension artérielle, mais diminue l'activité digestive. Il est associé à l'activité de deux neurotransmetteurs : la noradrénaline et l'adrénaline ;

- L'activation du système nerveux parasympathique amène un ralentissement général des fonctions de l'organisme afin d'économiser ses ressources. Ce qui était augmenté, dilaté ou accéléré par le système sympathique est ici diminué, contracté et ralenti. Seules les fonctions digestives et sexuelles sont favorisées par le système parasympathique. Ce dernier est associé à un neurotransmetteur : l'acétylcholine.

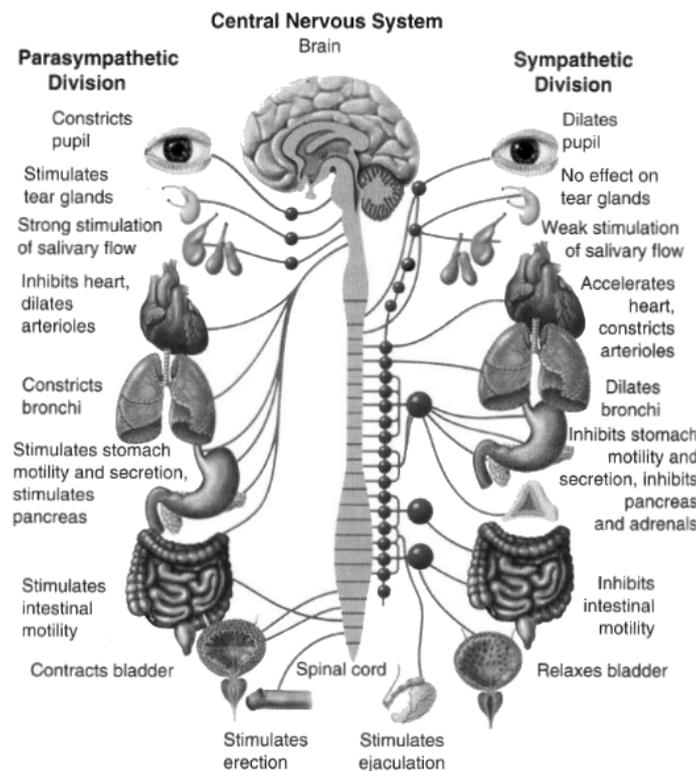


Fig. 9 : Le système nerveux autonome et ses deux subdivisions : sympathique et parasympathique. Image adaptée de *Psychology: An Introduction* de Charles G. Morris (10e Edition, 1998).

I.1.5.2. Mesures du système nerveux autonome

La mise en relation de l'activité du corps avec l'état subjectif d'un individu n'est pas une découverte récente⁹. La question a rapidement été de comprendre les relations de causalité entre expérience subjective et manifestation physique. James (1884) et Lange (1885) avaient suggéré que l'expérience émotionnelle subjective était la conséquence des réponses somatiques du corps.

⁹ « Avicenne conseillait une méthode infallible déjà proposée par Galien pour découvrir de qui on est amoureux : tenir le poignet du souffrant et prononcer moult noms de personnes de l'autre sexe, jusqu'à ce qu'on perçoive à quel nom le rythme du pouls s'accélère... » (Umberto Eco, 1982).

Les émotions pourraient être induites par des changements physiologiques tels que l'augmentation du rythme cardiaque ou la contraction des muscles. Cannon (1927) a par la suite réfuté cette théorie en se basant sur trois principaux arguments :

- La séparation des viscères du système nerveux central chez des animaux de laboratoire n'engendre pas d'extinction du comportement émotionnel ;
- Les changements viscéraux sont trop lents pour être source d'émotions ;
- L'induction de changements viscéraux à un niveau atteint normalement par de fortes émotions n'engendre pas d'expérience subjective.

Les indices les plus couramment employés pour quantifier les variations de l'activité du SNA associées à une activité cognitive ou émotionnelle sont l'électrocardiogramme (ECG), la réponse électrodermale (RED) ou le diamètre pupillaire. À l'aide de ces indices, plusieurs travaux ont tenté de mettre en évidence des modulations de l'activité du SNA en réponse à différents stimuli cognitifs et émotionnels. Ces mesures sont donc modulées à la fois par la demande mentale et par les phénomènes émotionnels. Ainsi Light et Obrist (1983) ont montré que la réponse cardiovasculaire, en réaction à l'accomplissement d'une tâche facile comprenant un enjeu financier, était équivalente à la réponse à une tâche plus difficile mais sans récompense monétaire.

I.1.5.2.1. L'activité cardiaque

Le système cardiovasculaire est innervé par les deux branches du SNA (Venables, 1991) et fait ainsi l'objet d'une régulation complexe : une augmentation de l'activité de la branche sympathique conduit à une accélération du rythme cardiaque, par exemple lors d'émotions positives et négatives (Brosschot & Thayer, 2003; Warner & Strowman, 1995), tandis qu'une augmentation de l'activité de la branche parasympathique se traduit par un ralentissement du rythme cardiaque. La pression artérielle, décomposée en systole et diastole, ou la variabilité du rythme cardiaque, sont également des mesures de la variation de l'activité catabolique au sein du SNA. Sinha (1992) a par exemple montré que la pression diastolique augmentait pendant la colère et que la peur et la joie généraient une augmentation de la pression systolique. L'activité cardiaque est également un indicateur de la demande mentale générée par une tâche (Boutcher & Boutcher, 2006; Sosnowski, Krzywosz-Rynkiewicz, & Roguska, 2004) et peut donner des indications sur la performance : dans ce sens, Hanser (2003) a montré qu'un groupe de sujets présentant une plus grande variabilité cardiaque présentait de meilleures performances en termes de FE.

I.1.5.2.2. L'oculométrie

La variation du diamètre pupillaire intervient la plupart du temps pour moduler la quantité de lumière pénétrant dans l'œil, c'est le myosis (resserrement) et la mydriase (dilatation). Cependant, le diamètre pupillaire peut également être affecté par les deux branches du SNA. Hess (1960; 1965) a émis l'hypothèse d'un continuum de réponses pupillaires aux stimuli émotionnels en fonction de leur valeur affective. Janisse (1974) a suggéré par la suite que le diamètre pupillaire est linéairement modulé par l'intensité émotionnelle des stimuli, large aux pôles extrêmes du continuum et modéré en son centre, pour les faibles intensités. Des résultats plus récents confirment à la fois l'impact de la valence affective (Partala, Jokiniemi, & Surakka, 2000) et de l'intensité (Bradley, Miccoli, Escrig, & Lang, 2008) dans la modification du diamètre pupillaire. Ce dernier dépend également de la charge mentale et de l'effort cognitif (Hess & Polt, 1964; Hoeks, 1995; Hyönä, Tammola, & Alaja, 1995; Iqbal, Zheng, & Bailey, 2004; Kahneman & Beatty, 1966; Moresi et al., 2008; Recarte & Nunes, 2003). Un accroissement du diamètre pupillaire est observé lors de la préparation (Jennings & van der Molen, 2005) ou lors de l'accomplissement (Andreassi, 2000) de différentes activités cognitives, et il dépend de l'augmentation de la difficulté de la tâche. De même, la durée des clignements des yeux (Wilson & Eggemeier, 1991) et les temps de fixations (Backs & Walrath, 1992; O'Donnell & Eggemeier, 1986) tendent à augmenter au cours du pilotage lorsque la charge mentale ou la charge visuelle s'accroissent. Par ailleurs, bien que toute fixation oculaire ne soit pas forcément synonyme de prise d'information (De Waard, 1996), l'enregistrement des directions du regard sont un index des informations visuelles requises par un individu (Hughes & Cole, 1988). Des études en conduite automobile ont par exemple montré les effets néfastes d'une activité concomitante, telle que l'utilisation d'un téléphone portable, sur la qualité des prises d'informations visuelles, la vitesse de détection des événements et la pertinence des prises de décisions (Recarte & Nunes, 2003).

I.1.5.2.3. La réponse électrodermale

Cette technique repose sur la mesure des propriétés électriques de la surface de la peau, fonction de l'activité des glandes sudoripares contrôlée par le SNA (Christie, 1981). Ces changements de l'activité électrodermale sont donc un bon indicateur de l'expérience émotionnelle. L'activité électrodermale possède l'avantage d'offrir un pattern de réponses extrêmement dynamique, avec une latence relativement faible (environ une seconde) et un développement complet relativement rapide (de l'ordre de quelques secondes), ce qui en fait une mesure adaptée pour observer, par exemple, l'impact du traitement successif et rapide d'alarmes dans un simulateur de vol (Fig. 10). Cette technique a été particulièrement utilisée par l'équipe de Bechara (2000) pour mettre en évidence le rôle de l'émotion dans le processus de prise de

décision. La RED présente l'inconvénient d'être relativement insensible à la valence des stimuli : des réponses de grandes amplitudes sont observées à la fois après exposition à des stimuli positifs, comme des photographies érotiques, et négatifs, tels que des photographies de corps mutilés (Codispoti, Bradley, & Lang, 2001; Greenwald, Cook, & Lang, 1989). On dissocie parfois l'activité électrodermale phasique de l'activité tonique bien que la plupart des études en neurosciences focalisent sur la réponse phasique liée à une stimulation courte. Bien que la RED semble intimement liée à l'intensité des processus émotionnels, comme le montre par ailleurs une étude que nous avons réalisé récemment (Causse & Hurter, 2009), quelques travaux pointent la sensibilité de la RED aux variations de la charge mentale (Kramer, 1991).



Fig. 10 : Illustration de l'utilisation de la RED dans une étude menée sur le simulateur de vol de l'ISAE.

I.2. Application des techniques de mesures des neurosciences à l'ergonomie

Un des enjeux de la neuroergonomie est de concilier des protocoles expérimentaux réalisés en situation réalistes avec les contraintes imposées par les techniques des neurosciences. Dans cette partie, nous introduisons quelques travaux où de telles techniques ont été utilisées pour répondre à des problématiques de l'ergonomie.

I.2.1. Mesures en situation

Un des objectifs majeurs des études en ergonomie depuis les années soixante est d'obtenir une estimation du niveau d'occupation d'opérateurs en interaction avec des systèmes complexes, tels que des cockpits d'avions. Les outils précédemment présentés peuvent apporter une contribution pour mieux définir, comprendre, et mesurer le concept de charge de travail. Ainsi, Dussault et collaborateurs (2004) ont réalisé en vol réel des mesures objectives de la charge mentale, par l'association de l'utilisation de l'électroencéphalogramme et de l'électrocardiogramme. Ces mesures intervenaient durant différentes séquences de vol, définies de façon à produire des niveaux de charge mentale distincts. Durant les segments très actifs, l'activité totale des bandes delta et thêta augmentait en comparaison des séquences de vol sans aucune activité. Inversement, l'activité totale dans la bande alpha diminuait durant toutes les séquences de vol en comparaison de l'état de repos au sol. Dans les aires pariétales et occipitales, les fréquences thêta et alpha et le ratio alpha/beta augmentaient durant les phases de vol actives. Concernant les mesures de l'électrocardiogramme, le rythme cardiaque s'accroissait significativement durant les séquences de vol actives par rapport aux séquences de vol passives. Le rythme cardiaque était par ailleurs corrélé à l'intensité des bandes delta et beta dans les aires cérébrales centrales (C3, Cz, C4). Des résultats proches ont été par la suite reproduits par la même équipe en simulateur (Dussault, Jouanin, Philippe, & Guezennec, 2005). Dans cette étude, une comparaison entre pilotes experts et novices avait été réalisée et montrait que l'activité corticale (la somme de l'activité dans toutes les bandes de fréquence) était plus importante chez les novices durant le pilotage. Il en était de même pour le rythme cardiaque, plus élevé chez les

novices. En revanche, contrairement à l'étude précédente, le rythme cardiaque n'était pas significativement différent entre les séquences de vol, en raison très certainement du moindre stress généré par le simulateur par rapport à la situation de pilotage réel.

La *cognition augmentée* est également une thématique faisant l'objet de nombreuses recherches. Elle vise à améliorer l'interaction homme-machine, par exemple en évaluant en temps réel l'état cognitif d'un individu (NIRS, EEG). Cette évaluation est réalisée en vue de moduler le flux d'information, via des systèmes à niveau d'automatisation adaptatif, en fonction de la disponibilité cognitive de l'opérateur. Dans l'état actuel des choses, le niveau d'automatisation des systèmes (ex : pilote automatique d'avion) est défini *a priori* et pose des problèmes de charge de travail : d'un côté ces automatismes « déchargent » l'opérateur humain en l'excluant de la boucle de contrôle, de l'autre côté il est attendu que l'opérateur humain récupère d'urgence des situations anormales qui sont par définition plus complexes et à forte charge de travail (Parasuraman & Riley, 1997; Wiener & Nagel, 1988). Cela suggère qu'une amélioration possible est d'adapter le niveau d'automatisation en fonction de la charge mentale d'un individu pour le soulager ou le stimuler au moment opportun. Des travaux ont montré le bien fondé de cette approche (Parasuraman, Mouloua, & Hilburn, 1999). Une étude de Dixon (2009) réalisée à bord d'un véhicule militaire (Fig. 11) a mis en application ce principe. Deux militaires, un conducteur navigateur et un mitrailleur devaient réaliser deux tâches parallèles. En plus de diriger le véhicule, le conducteur devait écouter des rapports audio et les catégoriser en pressant un des cinq boutons en face de lui. De temps en temps, il devait également prendre un appel et désigner un bouton selon que le message contenait le bon identifiant ou non. De son côté, le mitrailleur devait abattre les cibles adéquates et également déterminer si les appels contenaient ou non le bon identifiant. Parallèlement, des enregistrements EEG étaient réalisés et un système d'algorithme de reconnaissance de patterns indiquait lorsqu'une forte demande cognitive était présente. Lorsque ce système dit de *cognition augmentée* détectait qu'un des opérateurs était en surcharge, la seconde tâche était soit retardée, soit attribuée à l'autre opérateur si celui-ci était davantage disponible. Les résultats ont montré que ce système permettait d'augmenter les performances à la seconde tâche sans altérer la première.



Fig. 11 : Véhicule utilisé pour l'expérience (Mercedes G-Wagon) d'ajustement du flux d'information en fonction du niveau de charge mentale d'opérateurs militaires. Image adaptée de Dixon (2009).

En aviation, un moyen de remédier aux effets néfastes de la somnolence au cours de longs trajets, qui se manifestent y compris lors de la phase critique de l'approche, est de permettre aux deux pilotes de réaliser de courtes périodes de sieste (Neri et al., 2002). La durée de ces siestes doit être adaptée pour chaque individu (environ une vingtaine de minutes) pour ne pas devenir dangereuse pour la sécurité (effets délétères sur la performance cognitive, absence de contact prolongé avec les contrôleurs etc.). Cabon et collaborateurs (2003) ont mis au point un système qui enregistrait en permanence le niveau d'éveil des pilotes grâce à des mesures physiologiques (électroencéphalogramme, électro-oculogramme¹⁰ et électrocardiogramme). Le système a dans une certaine mesure permis de prévenir un niveau d'endormissement trop profond, en réveillant les pilotes en temps opportun, pour maintenir un bon niveau de performance de l'équipage. D'autres types d'études sont menés pour adapter le niveau d'automatisme de l'appareil, en augmentant l'implication du pilote lors des phases calmes pour éviter l'hypovigilance, et en automatisant davantage en cas de surcharge. Ainsi, Haarmann et collaborateurs (2009) déterminaient le niveau de charge des pilotes via des mesures cardiaques et de la résistance électrodermale et adaptaient en retour le niveau d'automatisation du contrôle de l'appareil. Les

¹⁰ Appareil permettant d'enregistrer le potentiel de repos (activité électrique de base, en l'absence de stimulation) de l'œil lors de mouvements oculaires.

résultats ont montré que ces indices physiologiques permettent d'ajuster le niveau d'automatisation de manière à ce que la charge de travail ne soit ni trop peu élevée, ni trop importante.

I.2.2. Mesures en laboratoire

Des études menées plus amont en neuroimagerie apportent également depuis plusieurs années des résultats intéressants. Ainsi Peres (2000) a réalisé une expérience en IRMf sur des pilotes (Fig. 12). Ces derniers devaient accomplir une tâche de pilotage sur un simulateur de vol relativement réaliste. L'objectif était de réaliser un suivi de trajectoire, ce qui requiert une bonne dextérité manuelle ainsi qu'une certaine connaissance des réactions de l'appareil. La tâche présentait deux niveaux de difficultés et les participants ont été divisés en deux groupes : expérimentés et novices. Pour les deux groupes, le gyrus cingulaire antérieur était plus activé durant la tâche difficile. La comparaison des groupes a mis en évidence différents patterns d'activations cérébrales. Les experts montraient des activations de régions antérieures (sous-corticales comme le thalamus, ou corticales comme le cortex préfrontal ventromédian), liées à l'attention sélective, la planification ou la recherche de stratégies en mémoire à long terme. D'un autre côté, les pilotes novices montraient des activations plus diffuses et postérieures (cortex occipital, cortex pariétal), suggérant une réalisation de la tâche basée plutôt sur des stratégies spatiales et visuelles.



Fig. 12 : Tâche de pilotage réalisée en IRMf. À droite, les activations cérébrales montrent les différences observées entre pilotes experts et novices. Les experts présentent des activations plutôt antérieures alors que des patterns plus postérieurs ont été retrouvés chez les novices. Image tirée de Peres (2000).

Calhoun (2002) a mené une étude sensiblement proche de celle de Peres (2000), de part l'aspect écologique et dynamique de la tâche réalisée par les participants. Cette dernière tranchant avec des protocoles plus classiques (événementiels ou bloqués), dans la mesure où les stimuli n'étaient pas statiques (photographie par ex.), et consistaient en de véritables scènes dynamiques de pilotages. Calhoun a isolé certaines structures impliquées dans l'activité de conduite automobile ainsi que le déroulement temporel de leurs contributions en employant des méthodes d'analyse statistique de type analyse en composantes indépendantes (ACI). La méthode employée a permis de mettre au point un protocole complexe et de saisir les nombreux éléments cognitifs (attention sélective et divisée, interprétation visuospatiale, intégration visuomotrice, prise de décision etc.) impliqués dans une activité aussi riche que celle de la conduite automobile. Par la suite, le protocole a été étendu à l'analyse des effets de l'intoxication alcoolique sur le cerveau pendant la conduite automobile (Calhoun, Carvalho, Astur, & Pearlson, 2005; Calhoun, Pekar, & Pearlson, 2004). Les résultats ont par exemple montré que l'alcool affectait les régions orbitofrontales et motrices alors que les régions visuelles et frontales médiales semblaient épargnées. Très récemment, Meda (2009) a réalisé une étude analogue et a montré que l'augmentation de la dose d'alcool provoquait un plus grand nombre de franchissements de bandes blanches ou une vitesse excessive. Ces effets comportementaux étaient prédictifs de l'activité au sein d'un réseau frontal-basal-temporal. Par ailleurs, la dose d'alcool était négativement corrélée à l'activation de régions telles que le cortex orbitofrontal (COF), le cortex cingulaire antérieur (CCA), les aires motrices primaires et supplémentaires, les ganglions de la

base et le cervelet. Ces régions étant impliquées dans la planification motrice, les actions dirigées vers un but, le *monitoring* d'erreur et la mémoire.

Uc et Rizzo (2005) ont tenté de mieux cerner les troubles cognitifs rencontrés dans la maladie d'Alzheimer et leur impact sur la conduite. Cette étude est illustrative de la compénétration des neurosciences et de l'ergonomie et illustre l'intérêt du modèle pathologique dans la compréhension du fonctionnement cérébral en prise avec une activité complexe. En aéronautique, certains équipages adoptent parfois, sous l'effet du stress ou de la fatigue, des comportements semblables à ceux observés chez des patients cérébrolésés. Ces comportements peuvent être par exemple des prises de décisions aberrantes ou l'incapacité de s'extraire d'une stratégie erronée. Ces symptômes sont par exemple observables dans la maladie d'Alzheimer (Pekkala, Albert, Spiro Iii, & Erkinjuntti, 2008).

II. L'hypothèse du continuum cognitif

La neuroergonomie ne se réduit pas à l'utilisation des outils de mesure des neurosciences pour répondre aux problématiques de l'ergonomie. Elle offre également un éclairage théorique pour mieux comprendre certains biais de raisonnement à l'origine d'erreurs décisionnelles, telles que ceux cités au chapitre I. En particulier, des travaux expérimentaux menés en simulateur (Dehais, 2004; Dehais et al., 2003) ont permis de montrer que lorsque des pilotes sont confrontés à des situations difficiles et conflictuelles, ces derniers montrent une tendance à s'attacher à la résolution du problème initial, au détriment de la surveillance des paramètres vitaux de l'appareil et ce, en dépit des alarmes auditives et visuelles présentes dans le cockpit. Ce comportement consiste à s'enfermer dans une stratégie erronée et à répéter de façon stéréotypée des réponses non pertinentes, en étant incapable d'aller chercher les indices externes qui permettraient de corriger l'erreur et ainsi de ramener la situation à la normale. Ce type de comportement identifié en aéronautique sous le terme de *fascination de l'objectif* (BEA, 2000) ou *d'effet tunnel*, est décrit en ergonomie par Keyzer et collaborateurs (1990) sous le terme *d'erreur de fixation*. Les auteurs déclinent ces erreurs selon trois types :

- Type 1 : l'opérateur doit réaliser un objectif mais il est incapable de se décider parmi l'éventail des possibilités. C'est le cas classique en AG où un pilote en panne ne sait sur quel champ il peut se "vacher" (l'un à l'air boueux, l'autre est peut-être trop court...);
- Type 2 : l'opérateur est bloqué sur une stratégie et n'arrive pas à en sortir, il reproduit obstinément les mêmes séquences d'actions sans pouvoir les contrôler;
- Type 3 : l'opérateur est persuadé que sa stratégie est la bonne, il ne tient pas compte des informations qui l'entourent ou n'a pas confiance en elles.

Il est intéressant de noter que de tels symptômes observés chez des pilotes, sous l'effet par exemple du stress ou de la fatigue, s'apparentent singulièrement à des troubles neuropsychologiques habituellement rencontrés chez des patients atteints d'un syndrome dysexécutif¹¹ (Pastor, 1999). Ce syndrome touche les FE. Ces patients présentent généralement des lésions des régions préfrontales et montrent un tableau clinique qui peut se traduire notamment par :

¹¹ Anciennement « syndrome frontal ».

- L'aboulie, symptôme qui se manifeste par une incapacité à exécuter des actes pourtant planifiés, et une grande difficulté à prendre des décisions ;
- La stéréotypie, tendance à conserver la même attitude ou à répéter le même mouvement ou les mêmes paroles ;
- La rigidité mentale ou persévération, symptôme pathologique qui se traduit par un manque de souplesse intellectuelle ou psychique.

L'observation en ergonomie de typologies d'erreurs qui s'apparentent au syndrome dysexécutif, ainsi que les études en laboratoire montrant l'altération temporaire de certaines fonctions cognitives de haut niveau, les FE, sous-tendues notamment par le cortex préfrontal (CPF), sous l'effet de la fatigue, du stress (Waldstein & Katzel, 2005) ou de l'anxiété (Egloff & Hock, 2001), permettent d'avancer l'hypothèse d'un continuum cognitif, entre le sujet sain aux performances optimales et le patient (Fig. 13). L'opérateur stressé ou fatigué étant quelque part entre les deux extrêmes (Pastor, 1999).

Ces mêmes FE peuvent également être perturbées de façon irréversible par les effets de l'âge. Certaines recherches tentent d'en diminuer l'impact. Par exemple, Yesavage (2002) a rapporté l'efficacité des effets d'inhibiteur de l'acétylcholinestérase (donepezil, 5 mg/jour pendant 30 jours), médicament donné dans la maladie d'Alzheimer, à augmenter les capacités d'apprentissage dans le cadre de tâches complexes. Ces tâches étaient réalisées sur simulateur de vol par dix-huit pilotes âgés mais ne présentant pas de troubles neurologiques. Une telle efficacité du traitement sur les performances cognitives est toutefois à tempérer et semble fonctionner seulement à court terme (Mumenthaler, Noda, & Hoblyn, 2008).

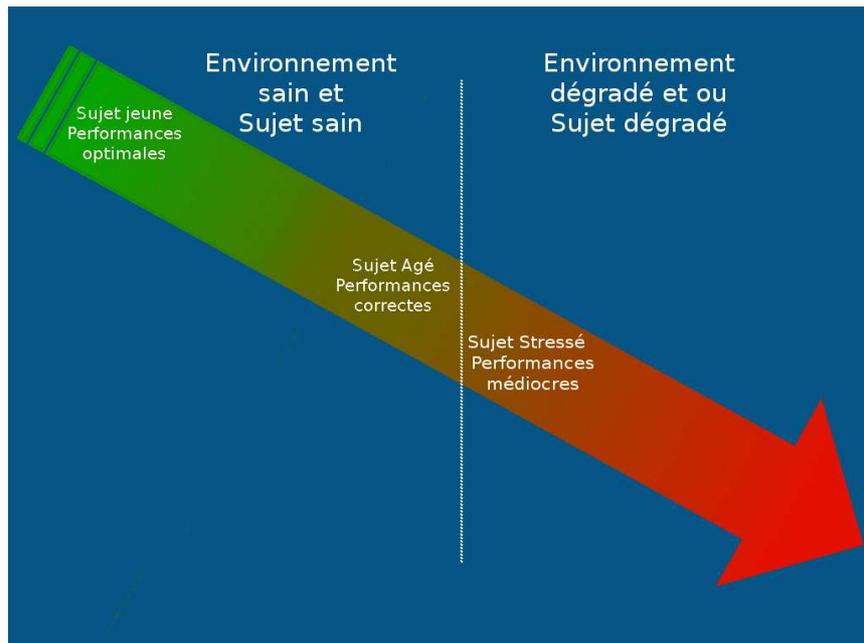


Fig. 13 : Illustration du continuum cognitif, depuis le sujet sain aux performances optimales au sujet stressé aux performances fortement dégradées. Le sujet âgé considéré ici ne présente aucune pathologie, son positionnement sur le continuum est bien entendu très variable.

III. Contre-mesures IHM en neuroergonomie

Différentes méthodes pour concevoir de façon adéquate les IHM des cockpits ont été explorées. Ainsi Previc (2000) a mis en avant l'importance de concevoir des interfaces de contrôle cohérentes avec le système cognitif (« neuropsychologiquement compatible »). Il préconise l'exploitation des réseaux cérébraux impliqués dans la focalisation de l'attention ou dans l'orientation dans l'espace. Les recommandations neuropsychologiques établies visent notamment à améliorer la conscience de la situation (*situation awareness*, Voir Banbury et Tremblay (2004)), utiliser de façon plus efficace et naturelle les capteurs et les effecteurs humains (emplacements mieux adaptés pour les écrans, utilisation des pieds) et réduire le stress psychologique en rendant le traitement de l'information plus efficace grâce à l'adaptation du cockpit à la spécialisation sensorielle humaine. D'autres études mettent l'accent sur l'importance d'adapter la transmission d'informations afin de réduire les traitements cognitifs. Cela peut se faire grâce à la multimodalité (Sarter, 2002) ou à l'augmentation du niveau d'automatisation en cas de surcharge (Dixon et al., 2009).

Un autre type d'approche réside dans l'emploi de contre-mesures cognitives (Dehais et al., 2003) pour contrer les mécanismes de rigidité mentale et lutter contre l'insensibilité des pilotes aux alarmes. Le principe de ces contre-mesures repose sur le fait que l'attention relève de mécanismes antagonistes d'accrochage et de décrochage (Posner, 1975). En tenant compte de l'identification de ces mécanismes, il est possible de postuler que les pilotes qui persévèrent sont incapables de décrocher volontairement leur attention de la tâche qui les accapare pour accrocher de nouveaux stimuli pertinents (ex : alarmes). Les contre-mesures cognitives consistent à retirer momentanément l'information sur laquelle le pilote est excessivement focalisé puis à la remplacer par l'information pertinente. Ainsi, c'est l'interface qui assure le « décrochage » (retrait ciblé d'informations) et l'accrochage attentionnel (envoi d'informations dans le champ visuel). La localisation du champ visuel s'effectue par une connaissance experte sur les zones de prise d'informations spécifiques des pilotes en fonction des phases de vol (ex : modèle d'activité de pilotage), ou en temps réel, par l'utilisation d'un système de détermination de la zone de vision fovéale (ex : *eye tracking*). Ce dernier système peut être couplé à des mesures de l'activité cérébrale comme l'EEG afin de confirmer que la zone faisant actuellement l'objet de fixation est effectivement traitée (Brouwer, Hogervorst, Herman, & Kooi, 2009). L'élaboration de ces contre-mesures cognitives à l'ISAE s'inscrit dans une coopération plus large menée avec Airbus et l'Onera dans le cadre du projet *GHOST* (Dehais, Tessier, Christophe, & Reuzeau, 2009). Ce projet vise à trouver des solutions au problème de la *persévération* chez les pilotes de ligne en proposant notamment un environnement expérimental propice au développement et à l'évaluation de différents types de contre-mesures cognitives.

IV. Conclusion

La neuroergonomie propose d'utiliser un certain nombre d'outils issus des neurosciences pour étudier les fonctions cognitives impliquées dans l'utilisation de technologies par l'homme dans son travail ou toute autre situation du monde réel. Dans ce sens, neuroergonomie et ergonomie (ou FH) sont des approches complémentaires qui partagent le même but : concevoir des systèmes techniques et des environnements plus sûrs et plus efficaces. Des outils de mesures psychophysiologiques sont appliqués à l'ergonomie pour répondre à des problématiques aussi diverses que l'évaluation de la charge cognitive pour adapter le niveau d'automatisation ou l'évaluation des effets de l'alcool sur le cerveau et leurs conséquences sur la conduite automobile

Des progrès restent à réaliser en ce qui concerne l'évaluation de la performance humaine dans la vie réelle, hors du laboratoire. La mesure de la physiologie du cerveau en milieu complexe, à l'aide d'outils de mesures intrusifs, est extrêmement complexe en raison des artefacts environnementaux et biologiques qui viennent se surajouter au signal cérébral recherché. D'autres éléments tels que la question de l'extraction des données pertinentes sont également cruciales. Les protocoles de neuroergonomie sont souvent complexes et produisent énormément d'informations. Enfin, la question de la réutilisation des données pour adapter l'environnement de manière à ce qu'il serve au mieux l'homme dans son activité se pose également. Des études en neuroimagerie sont réalisées dans le but de lier des invariants comportementaux à des mécanismes cérébraux contraints par la neurophysiologie. Cependant, en aéronautique, ce type de recherches appliquées à l'activité de pilotage demeure très confidentiel, et se résume, à notre connaissance, à la seule étude de Peres (2000). Indéniablement, des avancées ont déjà été réalisées, mais comme le souligne Kerick et McDowell (2009) de nombreux progrès sont encore nécessaires et l'approche multidisciplinaire regroupant des scientifiques de la cognition, des neuroscientifiques, des informaticiens ou encore des ingénieurs doit être poursuivie et amplifiée.

Au-delà des outils proposés, la neuroergonomie offre également un éclairage théorique pour mieux analyser certains comportements à l'origine d'erreurs décisionnelles. Ainsi, l'hypothèse du continuum cognitif permet d'exploiter le modèle pathologique pour comprendre certaines erreurs commises et pose la très forte implication des FE au cours de l'activité de pilotage. Les FE sont extrêmement sensibles à différents facteurs, dont l'émotion, et peuvent être altérées temporairement par cette dernière, au point de dégrader très fortement les performances cognitives et les prises de décisions. De même, les FE peuvent être touchées de façon définitive par le vieillissement, en raison de la sensibilité particulière des lobes frontaux à l'âge (Moscovitch & Winocur, 1995). L'altération temporaire ou définitive du fonctionnement exécutif et son effet sur la performance cognitive (ex : *persévération*) constitue un facteur de risque qu'il convient de mieux cerner. Dans le chapitre suivant, nous aborderons précisément ces aspects en présentant de façon détaillée les données de la littérature concernant les effets du vieillissement et du facteur émotionnel sur les FE.

**Les vérités découvertes par
l'intelligence demeurent stériles. Le
cœur est seul capable de féconder ses
rêves. La raison n'a point tant de
vertu. (Anatole France, 1920).**

Chapitre 3. Les fonctions exécutives et leurs perturbations

Le pilotage d'un avion requiert des capacités de raisonnement de haut niveau et sollicite massivement selon nous les FE pour traiter rationnellement les informations, orienter l'attention ou mémoriser les données importantes. Le système limbique (siège des émotions) peut venir stimuler le système « rationnel » préfrontal, substrat principal des FE, afin d'aider la prise de décision, le passage à l'action et la prise en compte d'informations prioritaires (ex : alarme). Pourtant, le stress, facteur utile à l'adaptation (Selye, 1950, 1952) voire essentiel à la survie, devient rapidement, lors de situations critiques ou dégradées, un stress « de haut niveau » (*i.e.* non créé par une menace physique), facteur de dégradation transitoire des mécanismes attentionnels (*effet tunnel*) et également de dégradation temporaire des FE. Ces mêmes FE peuvent également être perturbées de façon irréversible par les effets du vieillissement. En effet, un nombre grandissant d'indices mettent en évidence la détérioration précoce des réseaux préfrontaux en comparaison à d'autres régions corticales (Tisserand & Jolles, 2003) et le fait que cette détérioration est responsable des troubles des FE (Raz, 2000). Pour certains auteurs, ce déclin est tenu pour principal responsable du déficit cognitif au cours du vieillissement normal. Dans une perspective neuroergonomique, nous présentons dans ce chapitre les FE telles qu'elles sont définies en neuropsychologie et en neurosciences, puis l'impact des émotions et du vieillissement sur ces dernières. Nous présentons ensuite les travaux en aéronautique portant sur les effets du stress, de l'émotion et du vieillissement sur la performance de pilotage.

I. Les fonctions exécutives

Depuis de nombreuses années, les FE font l'objet d'études qui visent à mieux en cerner le concept, à en préciser les composantes et à trouver des moyens précis pour les évaluer (Lezak, 1982). Les prémises de l'étude scientifique de ces fonctions sont anciennes. Par exemple, les travaux de thèse de Berg (1946) abordaient déjà le thème de la « flexibilité de la pensée ». Berg élaborait un test basé sur un jeu de carte, baptisé plus tard Wisconsin Card Sorting Test, ou WCST (Berg, 1948; Grant & Berg, 1948), et montra que ce dernier pouvait permettre d'évaluer la flexibilité mentale en demandant aux participants de classer des cartes sur la base d'un feedback (correct ou incorrect) et ce selon une règle évoluant au cours du temps. Plus tard, Luria (1966) insista sur l'importance des lobes frontaux dans des fonctions proches des FE actuellement identifiées. Il avait émis l'hypothèse que toute activité de résolution de problème se déroule en quatre étapes : une analyse de la situation, une élaboration d'un plan d'action, une planification séquentielle et organisée de ce plan et une vérification en comparant l'objectif de départ avec le résultat obtenu. Il définit également trois fonctions : la volition ou la volonté d'agir, la planification des étapes, et le contrôle de l'initiation. Sur le plan théorique, le concept de FE est fortement lié à la notion d'administrateur central, ou AC (*Central Executive*, CE), proposée par Baddeley dans son modèle de la mémoire de travail (Baddeley, Della Sala, Robbins, & Baddeley, 1996; Baddeley & Hitch, 1974). Baddeley compare son AC au système superviseur attentionnel (SAS, *Supervisory Activating System*) de Norman et Shallice (1986). Le SAS serait par ailleurs proche du système de programmation, de régulation et de contrôle de l'activité de Luria (1976).

Actuellement, la définition des FE est large et agrège un grand nombre d'habiletés cognitives considérées de haut niveau (historiquement les « fonctions frontales »), ce qui en fait un concept composite. Les FE sous-tendent les comportements orientés vers un but et l'adaptation à des situations complexes et nouvelles. En particulier, elles permettent l'inhibition de réponses automatiques en faveur d'un comportement contrôlé, lorsque les buts ou les contraintes environnementales ont changé et quand les automatismes ne permettent plus d'avoir un comportement adéquat (Elliott, 2003; Lezak, Howiesson, & Loring, 2004; Royall et al., 2002).

Les FE interagissent avec les processus attentionnels (Barkley, 1997; Faw, 2003; Posner & Rothbart, 2006). Ceci est probablement dû au fait que le CPF, qui joue un rôle déterminant dans le support physique des FE, telles que le raisonnement (Decker, Hill, & Dean, 2007), le contrôle exécutif (Posner, Sheese, Odludas, & Tang, 2006), la flexibilité mentale (Spreen, Risser, & Edgell, 1995), la prise de décision (Sanfey, Hastie, Colvin, & Grafman, 2003), la planification (Koechlin,

Corrado, Pietrini, & Grafman, 2000), la structuration temporelle des actions (Fuster, 2000) ou encore la régulation émotionnelle (Fernandez-Duque, Baird, & Posner, 2000; Gyurak et al., 2009; Philippot, Baeyens, & Douilliez, 2006) est également impliqué dans différents types d'attention : soutenue (Gill, Sarter, & Givens, 2000), divisée (Johannsen et al., 1997), dirigée (Chayer & Freedman, 2001), sélective (Stam et al., 1993) et visuospatiale (Hagler & Sereno, 2006; Small et al., 2003). Dans la multitude de capacités liées aux FE, trois d'entre elles, dites de bas niveau (en comparaison à des fonctions telles que le raisonnement) sont considérées comme distinctes et modérément corrélées par Miyake (2000) : le *set-shifting* (« *shifting* »), la mise à jour (MAJ) et le contrôle du contenu de la mémoire de travail (« *updating* et *monitoring* ») et l'inhibition de réponses dominantes (« inhibition »).

I.1. Localisation cérébrale des FE

L'architecture du CPF et ses liens massifs avec d'autres régions corticales ou sous-corticales (Radanovic, Azambuja, Mansur, Porto, & Scaff, 2003) en font une zone hautement multifonctionnelle et multi-sensorielle (Faw, 2003; Wood & Grafman, 2003) soumise à l'influence de nombreux neurotransmetteurs tels que la sérotonine, l'acétylcholine ou la dopamine. Le CPF constitue une part très importante du cerveau humain : environ 12.5% du volume total (McBride, Arnold, & Gur, 1999) et 29% de la surface du cortex (Fig. 14). Par ailleurs, c'est chez l'homme que cette zone cérébrale s'est le plus développée en comparaison aux autres espèces, ce qui est cohérent avec les performances cognitives supérieures de l'humain. Il n'existe actuellement pas de consensus exact sur le substrat cérébral des FE, encore moins sur une zone unique les supportant. Même si le CPF, en particulier le CPF dorsolatéral (CPF_{DL}), est communément considéré comme étant le principal centre des FE et plus généralement des habiletés cognitives de haut niveau, il est de plus en plus admis que leur fonctionnement est sous-tendu par un réseau plus vaste. La notion de « fonctions du lobe frontal » longtemps synonyme de FE tend donc à disparaître (Mayes & Daum, 1997). Différents types de paradigmes expérimentaux appuient cette vision distribuée du substrat neuronal des FE :

- Les études animales par traceur montrant des boucles connectant CPF et structures sous-corticales, telles que les ganglions de la base, ainsi que leur potentiel fonctionnel dans des fonctions cognitives de haut niveau (Alexander, Crutcher, & DeLong, 1990; Levy & Dubois, 2006; Middleton & Strick, 2000) ;

- Les études avec des patients présentant des lésions en dehors du CPF, telles les lésions hémorragiques sous-corticales au niveau du striatum ou du thalamus, et montrant fréquemment une diminution de leurs capacités exécutives, notamment du *set-shifting* ou de l'inhibition (Kramer, Reed, Mungas, Weiner, & Chui, 2002) ;
- Les études de patients présentant des lésions frontales qui ne montrent pas nécessairement de dysfonctionnement exécutif (Andrés, 2003) ;
- Les études sur des sujets âgés présentant des lésions de la substance blanche, dont la localisation influence le type de FE affectées (Kennedy & Raz, 2009);
- L'observation des effets délétères sur les FE de certaines pathologies créant des lésions pourtant non focalisées sur le CPF : la maladie d'Alzheimer (Allain, Chaudet et al., 2007; McPherson, Fairbanks, Tiken, Cummings, & Back-Madruga, 2002), la maladie de Parkinson (Higginson et al., 2003; Owen, Roberts, Hodges, & Robbins, 1993), ou encore la démence à Corps de Lewy (Geser, Wenning, Poewe, & McKeith, 2005) ;
- Les études en neuroimagerie avec des participants sains réalisant des tâches exécutives qui montrent, qu'en plus de l'activation de régions du CPFDL (Stuss & Alexander, 2000), d'autres aires sont activées telles que les régions occipitales (Carpenter, Just, & Reichle, 2000), pariétales (Collette et al., 2005), le CCA, (Kondo, Osaka, & Osaka, 2004; MacDonald, Cohen, Stenger, & Carter, 2000), le CCA rostral (Dreher & Grafman, 2003) ainsi que des réseaux cortico-sous-corticaux (Heyder, Suchan, & Daum, 2004).

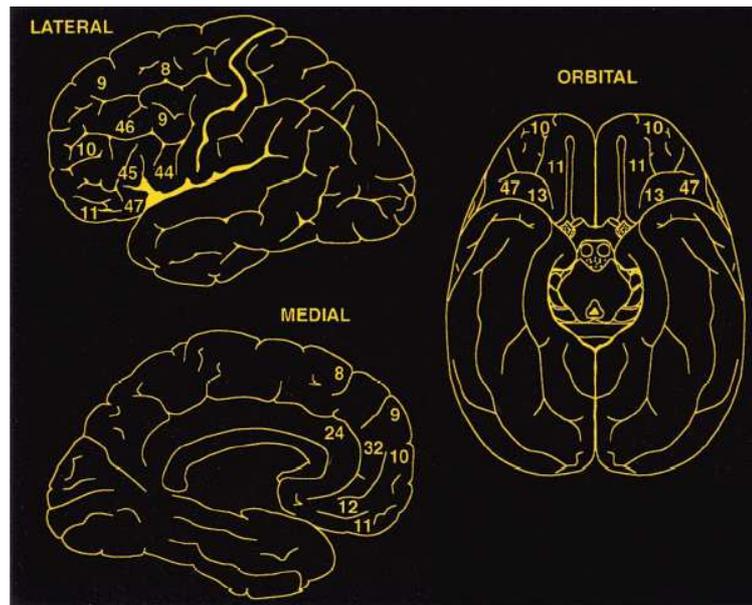


Fig. 14 : Cortex préfrontal humain, les aires sont numérotées suivant la cartographie cytoarchitectonique de Brodman. Image tirée de Fuster (2001).

I.2. Principales FE et leur évaluation

Les différentes FE identifiées à ce jour sont considérées comme distinctes ou séparables. Néanmoins elles convergent vers des buts relativement communs et des études montrent que certaines d'entre elles sont modérément corrélées. C'est le cas par exemple du *set-shifting*, de l'*updating/monitoring* et de l'inhibition (Miyake et al., 2000). Par ailleurs, des capacités telles que la mémoire de travail (MDT) sont fortement corrélées aux performances de raisonnement (Kyllonen & Christal, 1990; Süß, Oberauer, Wittmann, Wilhelm, & Schulze, 2002). Il est important de prendre en compte ces intrications lors de l'évaluation des FE. Dans la partie suivante nous présentons un certain nombre de FE qui nous semblent cruciales à l'activité de pilotage ainsi qu'un certain nombre de tests qui mesurent leur fonctionnement. Nous évoquerons aussi deux processus cognitifs de haut niveau liés aux FE : la mémoire de travail et le raisonnement.

I.2.1. La mémoire de travail

La MDT (Baddeley et al., 1996; Baddeley & Hitch, 1974) tient une place centrale au sein de nombreux thèmes cognitifs tels que la résolution de problème, le langage, la compréhension ou la lecture. Tous ces thèmes cognitifs sont intimement liés aux performances des FE (Lehto, 1996). Il faut distinguer mémoire à court terme (MCT) et MDT. La MCT désigne le maintien passif. Elle nous permet par exemple de retenir un numéro de téléphone quelques secondes le temps de le composer. L'empan mnésique est le nombre maximum d'items pouvant être temporairement maintenus en MCT. Ce nombre est classiquement de 7 ± 2 items en fonction des individus (Miller, 1956). La MDT diffère de la MCT notamment de par son aspect dynamique. Elle sous-tend l'utilisation d'informations nouvelles, la récupération d'informations déjà stockées et leur restitution sous forme transformée. Pour certains auteurs, la MDT est considérée comme étant la partie active de la mémoire à long terme, ou MLT (Cowan, 1993). Plus généralement, la MDT est un système à capacité limitée, qui maintient temporairement des informations et soutient les processus de pensée en fournissant une interface entre perception, MLT et action (Andrade, 2001; Conway, Jarrold, Kane, & Towse, 2007). La MDT de Baddeley est composée d'un système principal, l'AC, qui coordonne les opérations de traitement des informations issues de deux systèmes esclaves : la boucle phonologique et le calepin visuospatial (Baddeley & Hitch, 1974). La boucle phonologique permet le maintien des informations de nature verbale par répétition silencieuse : le *rehearsal*. Le calepin visuo-spatial permet le maintien des informations par « imagerie visuelle ». Récemment, un troisième système esclave a été inclus dans le modèle (Fig. 15) : un tampon épisodique qui constitue une interface entre la MDT épisodique et la MLT (Baddeley, 2000).

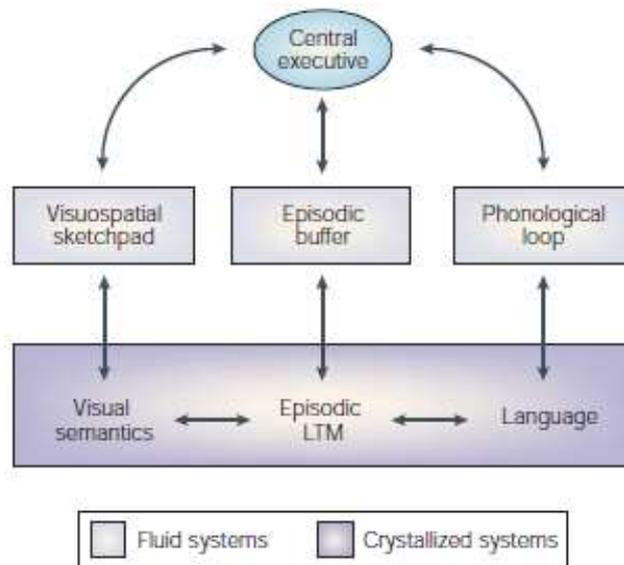


Fig. 15 : Constituants du modèle révisé de la mémoire de travail, les zones en violet sombre représentent les connaissances cristallisées (tiré de Baddeley, 2003).

Etant donné la présence de données contradictoires dans la littérature, notamment sur les effets du vieillissement (Belleville, Rouleau, & Caza, 1998), certains auteurs ont critiqué le caractère trop général des concepts utilisés. Par ailleurs, les fonctions de l'AC sont relativement mal spécifiées à ce jour. L'AC ayant un fonctionnement hautement intégré avec les systèmes esclaves, il est particulièrement difficile de trouver des tâches dans lesquelles les opérations de ces différentes composantes soient clairement isolées.

La mise au point de la tâche du Running Span est une tentative d'évaluer de façon isolée un de ces types d'opérations : la MAJ. La tâche consiste à présenter des séquences de consonnes de tailles différentes sans que les participants ne soient prévenus à l'avance de leur longueur. Ils doivent rappeler dans l'ordre les quatre dernières consonnes de chaque séquence. Quand la séquence est de longueur quatre, il s'agit tout simplement d'un rappel sériel des quatre items présentés. Par contre, quand la séquence se compose de six items ou plus, le participant doit constamment mettre à jour les consonnes pertinentes à mesure que de nouvelles consonnes sont ajoutées dans la séquence. En utilisant cette tâche, Morris et Jones (1990) ont montré que le processus de MAJ nécessite les ressources de l'AC alors que ce n'est pas le cas pour la boucle phonologique. Inversement, le rappel sériel fait appel à la boucle phonologique mais pas à l'AC.

Les FE sont considérées comme étant le fruit de différentes opérations et processus permettant d'accomplir une tâche orientée vers un but, et ce de façon flexible. Le mécanisme responsable de ces opérations coordonnées vers un but précis est nommé *contrôle exécutif*

(Miller & Wallis, 2009; Posner & Dehaene, 1994). L'AC, via sa fonction de *contrôle exécutif* (Funahashi, 2001), présente un lien étroit avec les FE. Ceci permet de mieux comprendre pourquoi une MDT déficitaire, par surcharge mnésique chez le sujet sain (Hester & Garavan, 2005) ou, par exemple, par l'atteinte d'une pathologie (Higginson et al., 2003), peut perturber les FE. Des tests évaluent d'autres composantes exécutives de la MDT telles que les stratégies de recherche en mémoire sémantique. Ce sont les tests de fluence verbale comme que le *Controlled Oral Word Association Test* (COWAT, (Lezak, 1995) ou le *Thurstone Word Fluency Test* (pour revue voir Spreen & Strauss, 1998).

Les études en neuroimagerie ont permis de mieux cerner les mécanismes cérébraux sous-tendant les grandes fonctions cognitives déjà bien identifiées par les spécialistes de la cognition. La MDT est associée au fonctionnement des cortex préfrontaux, en particulier ses parties dorsolatérales (Goldman-Rakic, 1996; Smith & Jonides, 1999). Depuis la mémorisation d'un item jusqu'à son rappel, on considère classiquement trois étapes chronologiques : l'encodage (mémorisation), le maintien et le rappel. Ainsi, différents travaux rapportent que des structures cérébrales distinctes sont impliquées dans l'encodage de nouvelles informations puis dans leur restitution (Carpenter, Just, & Reichle, 2000; Gabrieli, Brewer, Desmond, & Glover, 1997; Nyberg, Cabeza, & Tulving, 1996). Les travaux de Brewer et collaborateurs (1998) réalisés en IRMf ont montré que l'amplitude de l'activation de certaines structures cérébrales au moment de l'encodage était prédictive des performances de rappel ultérieur des participants. Les régions impliquées étaient notamment le CPF et le cortex parahippocampique bilatéral. D'autres études ont permis de déceler les bases physiques limitant la capacité de la MDT, le fameux goulot d'étranglement. Par exemple, Rypma et d'Esposito (2003) ont montré que le CPF ventromédian (CPFVM) est le substrat d'une mémoire tampon à capacité limitée qui permet le maintien de l'information par répétition, tandis que le CPFDL est impliqué à la fois, dans des fonctions d'organisation qui permettent d'aller au-delà des limites de la mémoire-tampon, et dans les performances de récupération. Dans le même domaine, Dux et collaborateurs (2006) ont également montré que le CPF latéral postérieur (et peut-être également le CPF médial supérieur) étaient également responsables du goulot d'étranglement.

Le fonctionnement de la MDT dépend de nombreux processus. La réalisation d'une multiplication complexe, par exemple 315×25 , peut nécessiter de retenir en mémoire le produit d'une première multiplication ($315 \times 20 = 6300$), puis de celui d'une seconde ($315 \times 10 = 3150$), de mémoriser ensuite un quotient ($3150 / 2 = 1575$) puis d'inhiber le deuxième produit et enfin d'additionner le premier produit avec le quotient pour obtenir le résultat final ($6300 + 1575 = 7875$). Les différentes étapes de ce type d'opérations, réalisées en MDT, étaient classiquement

attribuées à l'AC. De part leur variété, il apparaît plus approprié de classer ces processus dans le concept composite de FE. Nous l'avons vu, la MAJ/*monitoring* est une de ces fonctions cruciales au fonctionnement de la MDT (Jonides & Smith, 1997; Lehto, 1996). Elle conditionne par exemple les performances de calcul mental ou de résolution de problème. Cette fonction mnésique va au delà du simple maintien et requiert la manipulation dynamique du contenu de la MDT ainsi que le *monitoring* et le codage d'information afin d'évaluer leur pertinence en regard de la tâche en cours, permettant le cas échéant, de remplacer les anciens items désormais non valides (Morris & Jones, 1990). Alors que le maintien passif est associée avec des aires pré-motrices du cortex frontal ainsi qu'avec les régions pariétales, la fonction de MAJ est associée au fonctionnement du CPFDL (Appolonio et al., 1994). Certains auteurs proposent d'ajouter le séquençement temporel à la composante de MAJ/*monitoring* (Voir Stuss, Eskes, & Foster, 1994 pour review)). Le N-back est un test très utilisé pour évaluer la MAJ (Chen, Mitra, & Schlaghecken, 2008), il sera décrit en détail dans le premier chapitre de la deuxième partie de ce manuscrit.

I.2.2. Le *set-shifting*

Le *set-shifting* (proche de la flexibilité mentale) est une FE de bas niveau. Elle permet de changer un comportement en réponse à une modification du but ou à des contraintes environnementales, et de basculer entre différentes tâches ou opérations mentales (Monsell, 1996). Le modèle SAS (Norman & Shallice, 1986) érige cette habileté comme un aspect extrêmement important du *contrôle exécutif*. Posner et Raichle (1994) ont émis l'hypothèse que les circuits impliqués dans le *shifting* visuo-attentionnel ne sont pas les mêmes que ceux impliqués dans le *shifting* plus « purement » exécutif. Le modèle de Posner (2007; 2006) décompose l'attention en trois réseaux anatomiques responsables de trois processus distincts : l'alerte, l'orientation et le *contrôle exécutif*. Selon ce modèle, le *shifting* visuo-attentionnel, associé à l'orientation, est régulé par les lobes pariétaux, le pulvinar, le colliculus supérieur (*posterior attention network*), le champ oculomoteur frontal (*frontal eye field*) et la jonction temporo-pariétale. D'un autre côté, le *shifting* plus purement exécutif, associé au *contrôle exécutif*, serait géré par le lobe frontal en incluant le CCA et les ganglions de la base (*anterior attention network*).

Le WCST (Berg, 1948) est une des épreuves neuropsychologiques les plus couramment utilisées pour évaluer l'efficacité du *set-shifting*. Le participant doit classer des cartes en fonction

d'une règle qui évolue au cours du temps. La mesure principale du WCST est l'erreur persévérative (Demakis, 2003) : lorsque le participant réalise au moins à deux reprises l'appariement des cartes sur la base de la règle précédente désormais non pertinente. Selon les auteurs, ces erreurs suggèrent notamment une incapacité à inhiber la règle désormais invalide et une difficulté à prendre en compte le feedback informant du changement, ceci conduisant à des difficultés à remplacer l'ancienne règle par une nouvelle. Un test analogue au WCST, l'*Intra-Extra Dimensional Set Shift* (IED), est également inclus dans la *CAmbridge Neuropsychological Test Automated Battery* (CANTAB, Sahakian & Owen, 1992). Dans cette tâche, deux niveaux de *set-shifting* sont manipulés. Deux dimensions différentes de stimuli abstraits sont présentées, des formes pleines et colorées ou des lignes blanches. Comme dans le WCST, le participant doit sélectionner la forme pertinente en fonction du feedback qui lui est fourni. Au départ, il sélectionne simplement le bon item parmi les formes pleines et colorées, c'est le *shifting* intra-dimensionnel, puis ensuite, au huitième changement de règle, le participant doit *switcher* à la seconde dimension, les lignes blanches. Ce *shifting* extra-dimensionnel est considéré comme critique et difficile à réaliser (Scott et al., 2002).

Le *Trail Making Test* (Reitan, 1958) ou test des tracés (Fig. 16), est une épreuve mesurant également le *set-shifting*. La règle est simple, dans un premier temps, le sujet doit relier des chiffres dans l'ordre croissant le plus rapidement possible (1-2-3-4 etc.). Dans un second temps, il doit procéder de la même manière mais en alternant des chiffres et des lettres (1-A-2-B-3-C, etc.). Le « coût » de *set-shifting* est calculé en faisant la différence entre la deuxième et la première tâche.

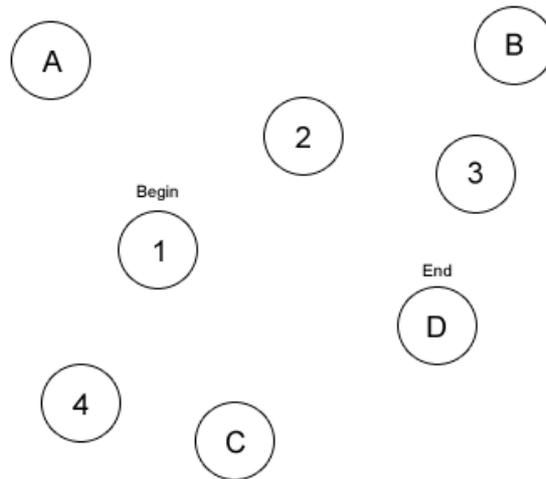


Fig. 16 : Illustration simplifiée du *Trail Making Test*. Le participant doit relier alternativement les chiffres et les lettres, ce qui sollicite le *set-shifting*.

I.2.3. L'inhibition

Depuis une dizaine d'années, un nombre croissant d'auteurs s'intéressent au rôle de l'inhibition dans divers processus cognitifs comme l'attention sélective (Neill, Valdes, & Terry, 1995), la mémoire (Anderson & Spellman, 1995), l'accès au lexique (Simpson & Kang, 1994) ou la compréhension (McDowd, Oseas-Kreger, & Filion, 1995). Le modèle de Miyake (2000) met l'inhibition au cœur des processus de contrôle de l'activité cognitive. L'inhibition y est définie comme un mécanisme qui permet de réduire l'activation de stimuli non pertinents par rapport à la tâche en cours, soit parce qu'ils ont cessé de l'être, soit parce qu'ils lui sont étrangers. Le test de Stroop (Stroop, 1935) et celui du *Hayling* (Burgess & Shallice, 1997) sont les tâches les plus répandues pour évaluer le mécanisme d'inhibition. Dans le test original de Stroop, des paires de mots conflictuelles sont présentées au sujet. Des mots écrits sont présentés, *bleu, vert marron* ou *violet*. L'encre utilisée pour leur impression est une de ces quatre mêmes couleurs, mais n'est jamais la même que celle du sens du mot écrit (ex : le mot bleu n'est jamais écrit en bleu). Par ailleurs, les mêmes mots sont également imprimés en noir, et les mêmes couleurs sont également présentées sous formes de carrés colorés. Stroop a noté que l'interférence causée par une couleur conflictuelle sur la lecture de cent mots provoquait une augmentation non significative de 5.6% du temps de lecture normal, telle qu'observé lors de la lecture des mots écrits en noir. En revanche, l'interférence causée par un mot conflictuel sur la dénomination de cent couleurs, génèrait une augmentation de 74.3% du temps par rapport à celui de la dénomination des couleurs contrôle, celle des carrés colorés. L'incompatibilité entre le sens du mot et la couleur

provoque une interférence qui rend la tâche de dénomination de la couleur difficile. La lecture du mot (ex : bleu) est très complexe à réprimer, ce qui interfère avec la réponse correcte, la dénomination de sa couleur (ex : vert). L'interférence, provoquée par la concurrence du processus automatique sur la tâche demandée peut ainsi être mesurée. Plus le temps de dénomination augmente, plus la personne est considérée sensible à l'interférence, et donc, plus ses capacités d'inhibition sont supposées altérées.

Un grand nombre de recherches se sont appuyées sur les conceptions de Hasher et Zacks (1988) pour évaluer le déficit d'inhibition, cependant, la généralité du déficit a été mise en doute. En effet, plusieurs études ont montré que le déclin des processus d'inhibition, par exemple au cours du vieillissement, n'est pas universel (Connelly & Hasher, 1993; Kramer, Humphrey, Larish, Logan, & Strayer, 1994; Langley, Vivas, Fuentes, & Bagne, 2005; Zacks & Hasher, 1997). Ce déclin semble par ailleurs dépendre du niveau d'éducation (Juhel & Auffray, 1998). En conséquence, un certain nombre d'auteurs ont émis l'hypothèse de l'existence d'une famille de différents processus inhibiteurs (Friedman & Miyake, 2004; Harnishfeger, 1995; Nigg, 2000).

Hasher, Zacks & May (1999) ont été parmi les premiers à distinguer plusieurs processus :

- La fonction de filtrage qui limite l'entrée en MDT aux informations pertinentes ;
- La fonction de suppression qui diminue l'activation en MDT des représentations qui ne sont plus pertinentes ;
- La fonction de restriction qui empêche que les réponses dominantes en MDT ne soient produites avant que d'autres n'aient été envisagées, le but étant de faire en sorte que les réponses dominantes non pertinentes ne prennent pas le dessus.

D'autres auteurs (Andres & Van Der Linden, 2004; Arbuthnott, 1995; Collette, Germain, Hogge, & Van der Linden, 2009) ont également suggéré de distinguer inhibition intentionnelle ou contrôlée et inhibition non intentionnelle ou automatique. L'inhibition intentionnelle ou contrôlée est un processus de suppression conscient et volontaire de l'information pouvant être évalué par le test de Stroop ou par l'oubli dirigé (*directed forgetting task*, tâche durant laquelle des mots doivent être « à retenir » ou « à oublier »). L'inhibition intentionnelle peut également être testée par le *Hayling*, tâche où des sujets doivent terminer une phrase dont la construction suggère fortement le dernier mot, soit avec un mot approprié, soit avec un mot nécessairement sans relation de sens avec le contexte de la phrase.

I.2.4. Le Raisonnement

Le raisonnement est un processus cognitif qui permet de créer de nouveaux résultats ou de vérifier la validité d'un fait en faisant appel à différentes règles inhérentes à leurs domaines d'application. Principalement, il peut être de type déductif (consiste à tirer une hypothèse sur des cas particuliers à partir d'une proposition de portée générale), inductif (consiste à tirer des conclusions générales à partir d'observations particulières) et abductif (permet la formulation d'une nouvelle hypothèse, par exemple au moment de l'examen du résultat d'une recherche). Le raisonnement est considéré comme le cœur de la cognition de haut niveau et représente un bon indice de l'état de fonctionnement exécutif ainsi que de celui du fonctionnement quotidien, en particulier chez les patients cérébrolésés (Goverover, 2004).

Classiquement, la résolution de syllogisme (Kalbfleisch, Van Meter, & Zeffiro, 2007) et le *progressive matrice* de Raven sont employés pour évaluer les capacités de raisonnement et plus généralement le raisonnement fluide, qui apparaît comme un concept très proche de celui du fonctionnement exécutif (Decker et al., 2007). Le savoir cristallisé se différencie du raisonnement fluide, certains problèmes peuvent être solutionnés en faisant uniquement appel au savoir cristallisé, les connaissances contenues dans la MLT (Cattell, 1963). En revanche, les problèmes nouveaux ou complexes nécessitent un raisonnement analytique ou fluide. Le *progressive matrice* de Raven (Raven, 1965) permet d'évaluer le raisonnement fluide (on parle également par extension « d'intelligence fluide »). Snow (1984) considère que le *progressive matrice* de Raven est la meilleure mesure (Fig. 17). Typiquement, il s'agit de matrices 3x3 contenant des figures abstraites (Fig. 18). La troisième case de la troisième ligne est laissée vide. La tâche du sujet est de sélectionner parmi plusieurs figures celle qui correspond à la suite logique de la troisième ligne, en raisonnant à partir des deux premières. La succession des problèmes suit un ordre croissant de difficulté. Ces épreuves sont non verbales et de ce fait non dépendantes des connaissances culturelles.

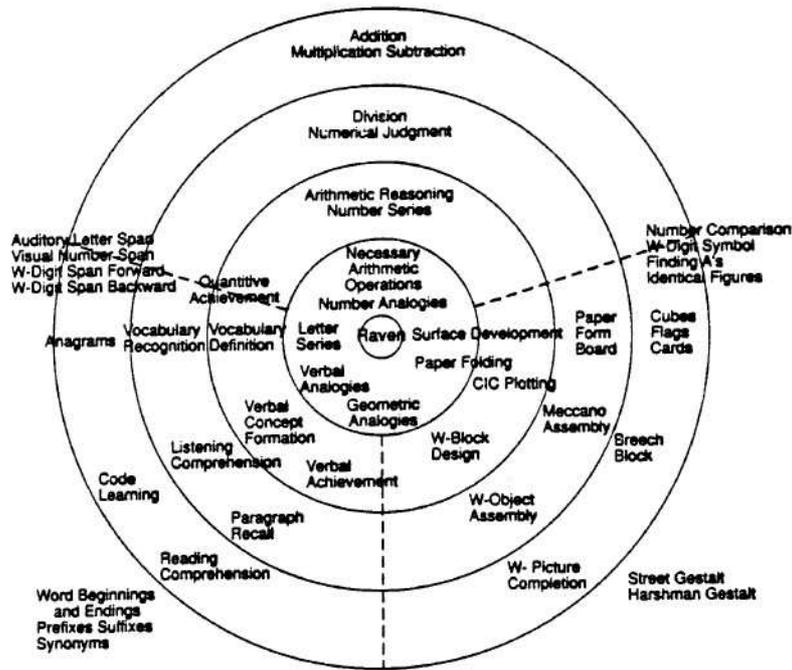


Fig. 17 : Modèle multidimensionnel idéalisé illustrant les inter-corrélations entre différentes habiletés cognitive évaluées par différentes tâches. Le *progressive matrice* de Raven occupe une place centrale indiquant qu'il est, selon Snow, la meilleure mesure de l'intelligence fluide. Image tirée de Snow (1984).

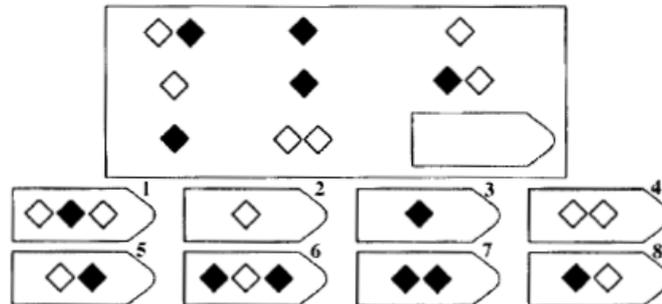


Fig. 18 : Exemple d'une matrice de Raven. Le participant doit sélectionner une des huit propositions disponibles afin de compléter le pattern situé en bas à droite. Image tirée de Prabhakaran (1997).

Prabhakaran (1997) a utilisé le *progressive matrice* de Raven en IRMf. Les résultats ont montré que le raisonnement analytique provoquait des activations bilatérales des régions préfrontales, impliquées classiquement dans la MDT et les FE. Les auteurs postulent que le raisonnement, et plus généralement l'intelligence fluide, dépendent de réseaux communs à ceux de la MDT. Une étude de Salthouse (2005) menée sur deux groupes de sujets (n=328 et n=7000, âge 18-93) pointe la relation extrêmement étroite entre FE et raisonnement. Dans cette expérimentation, les deux groupes de participants ont subi une batterie de tests comprenant une grande variété de fonctions cognitives supposées faire partie des FE (inhibition, *set-shifting*, etc.), ainsi que d'autres tests évaluant des capacités cognitives générales bien établies, en particulier le

raisonnement. Une très grande majorité des FE se sont avérées fortement corrélées au raisonnement. De plus, lorsque le raisonnement était ajouté aux analyses en tant que variable contrôle, très peu de ces FE demeuraient significativement modifiées par un effet unique de l'âge. Au vu des résultats de Prabhakaran (1997) et de Salthouse (2005), il semble qu'il existe une forte intrication entre le raisonnement et les FE.

II. Emotion, récompense et FE

La prise en compte du facteur émotionnel a considérablement apporté aux questions liées au processus de prise de décision, longtemps considéré comme purement rationnel. Pourtant, Daniel Bernoulli avait déjà fait remarquer en 1738, dans sa « Théorie sur la mesure du risque », que les individus ne répondent pas toujours selon une logique d'optimisation des gains, mais que l'aversion au risque pouvait conduire à trancher pour une option moins intéressante mais plus sûre (le paradoxe de St Petersburg). Cette théorie intégrait déjà une composante émotionnelle dans le raisonnement.

II.1. L'hypothèse des marqueurs somatiques

Si l'émotion (Oaksford, Morris, Grainger, & Williams, 1996; Phillips, Bull, Adams, & Fraser, 2002), l'anxiété (Airaksinen, Larsson, & Forsell, 2005; Castaneda, Tuulio-Henriksson, Marttunen, Suvisaari, & Lönnqvist, 2008; Egloff & Hock, 2001) ou un stress important (Porcelli et al., 2008; Qin, Hermans, Marle, Luo, & Fernández, 2009; Scholz et al., 2009; Waldstein & Katzel, 2005) sont potentiellement délétères pour les performances cognitives, notamment les FE, le bon fonctionnement du système émotionnel est pourtant utile à l'efficacité et à la pertinence des prises de décision, notamment lors de situations à forte incertitude. Damasio (1995) pose l'hypothèse de marqueurs somatiques, « stockés » dans le COF. Ils permettraient à un individu de prendre efficacement des décisions grâce à l'association inconsciente d'éléments émotionnels pré-stockés. Ainsi, lorsqu'une décision doit être prise, le COF va permettre d'étiqueter comme appétitif ou aversif les divers choix possibles, via les signaux des marqueurs somatiques, influençant ainsi l'efficacité du traitement de l'information (Bechara, Damasio, Tranel, & Damasio,

1997; Damasio, 2005). Historiquement, l'hypothèse des marqueurs somatiques remonte à la redécouverte du patient Phineas Gage (1823/1860), qui présentait de graves lésions cérébrales à la suite d'une explosion sur un chantier. En dépit d'une intelligence normale, il devint d'humeur changeante, irrévérencieux et supportait difficilement les contraintes. Il s'obstinait parfois de façon persistante et prenait des décisions catastrophiques. L'exhumation de son crâne (1994) permis de localiser précisément sa lésion, située au niveau du COF (régions ventromédianes, voir Fig. 19). La plupart des patients ayant subi des lésions focalisées sur la partie orbitaire du CPF obtiennent des résultats tout à fait normaux au test du Q.I ou à une série d'épreuves neuropsychologiques mais, à l'instar du cas Phinéas Gage, ils présentent de très grandes difficultés à prendre des décisions au cours de la vie quotidienne.

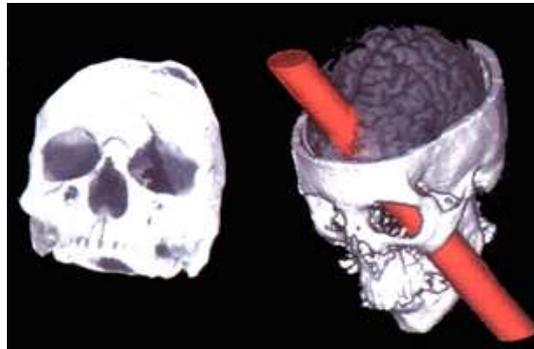


Fig. 19 : Illustration du crane exhumé de Phinéas Gage. Adapté de Damasio et al. (1994).

Une bonne partie de la validation expérimentale de la théorie des marqueurs somatiques repose, outre les observations cliniques de patients, sur les données issues des recherches employant le test de l'*Iowa Gambling Task*, ou IGT (Fig. 20) conçu par Bechara (1997). Dans cette tâche, quatre tas de cartes sont présentés : deux tas apportent des gains et des pertes importantes, mais qui sont au final désavantageux pour le sujet, et deux tas dont les pertes et les gains sont faibles en amplitude mais dont le résultat final est positif. Les sujets normaux commencent par sélectionner le tas offrant des gains et pertes importants (attirés par les fortes sommes remportées au départ), mais finissent par changer de stratégie en prenant conscience du risque beaucoup plus important de perdre. Au contraire, les patients présentant des lésions au niveau du COF persistent à choisir le tas désavantageux malgré une bonne compréhension déclarative des règles. De plus, les sujets normaux génèrent des RED anticipatrices lors du choix des cartes dans les tas risqués, alors que les sujets frontaux présentent de très faibles RED malgré le fait qu'ils savent que leur choix est risqué. Tout se passe comme s'ils n'avaient plus accès aux marqueurs somatiques et aux réactions physiologiques qui les accompagnent. Ces résultats

suggèrent que les connaissances déclaratives ne suffisent pas à prendre des décisions raisonnables et qu'elles doivent s'accompagner de bais émotionnels non conscients. Des critiques ont toutefois été formulées par la suite par Maia et McClelland (2004). Ces auteurs indiquent que les performances à la tâche de l'IGT sont beaucoup plus fonction de connaissances conscientes vis-à-vis de la stratégie à adopter que ce que le prétendait Bechara (1997).

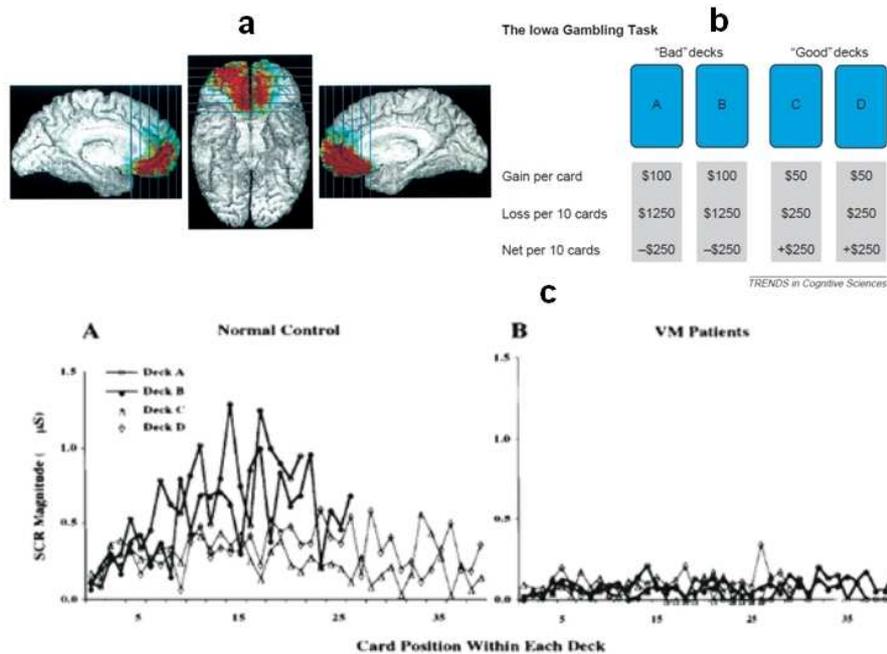


Fig. 20 : A : Lésions du cortex préfrontal ventromédian (très proche du cortex orbitofrontal qui est plus latéral); B : l'*Iowa Gambling Task*; C : réponses électrodermales au cours de la tâche pour les sujets contrôles et les patients. Images A et C adaptées de Bechara (2000) et image B de Bechara (2005).

II.2. Les émotions

Paul Ekman parle dès 1984 d'émotions simples ou primaires. Elles s'accompagnent d'expressions faciales ou gestuelles et sont indépendantes de l'empreinte de l'éducation et de la culture (Fig. 21). Les émotions complexes résulteraient de la combinaison de plusieurs émotions primaires.



Fig. 21 : Les six émotions primaires définies par Ekman : joie, surprise, peur, colère, dégoût, tristesse. Image tirée du livre *Handbook of Cognition and Emotion*, 1999).

Pour Joseph LeDoux (1998), émotion et sentiment se confondent, tandis que Damasio (1999) différencie les manifestations physiques comme celles des hormones et du cœur, des sentiments qui eux, relèvent de la pensée (Damasio, 2001). L'expérience subjective, les réponses physiologiques périphériques et l'expression comportementale sont généralement considérées comme les trois composantes majeures de l'émotion (Scherer, 2000). Cependant, nombreux sont les auteurs qui élargissent la définition de l'émotion pour y inclure notamment des facteurs motivationnels ainsi que les traitements nécessaires à l'évaluation des caractéristiques affectives des stimuli (Buck, 1993; Ohman, Hamm, & Hugdahl, 2000; Robinson, 1998). On peut schématiquement distinguer trois étapes dans le processus émotionnel : 1) l'évaluation et l'identification de la signification émotionnelle du stimulus, 2) la production d'un état affectif spécifique en réponse à ce stimulus, incluant les réponses végétatives, neuroendocriniennes, somato-motrices (faciales, gestuelles, vocales et comportementales) et l'expérience subjective consciente, et 3) la régulation de l'expérience émotionnelle subjective et du comportement émotionnel (Phillips, Drevets, Rauch, & Lane, 2003). Les trois dimensions émotionnelles les plus fréquemment invoquées sont les dimensions de valence d'activation et de dominance (Lang,

1980). La valence tient une place fondamentale dans les modèles (Izard, 1993; LeDoux, 1995) et se réfère à la dimension qualitative, appétitif-aversif ou positif-négatif (Russell & Carroll, 1999). L'activation (*arousal*) renvoie à l'intensité de l'émotion ressentie face au stimulus. Enfin, la dominance est associée au sentiment de contrôle exercé sur l'émotion (Russell, 1980). Cette dernière dimension est moins largement acceptée que la valence et l'activation, qui ont reçus un nombre important de validations expérimentales, notamment au travers de travaux mettant en évidence leur association avec différents indices physiologiques (Bradley, Cuthbert, & Lang, 1996) ou cérébraux (Lane et al., 1997).

Les structures actuellement identifiées comme étant impliquées dans les processus émotionnels représentent un vaste réseau cortico-sous-cortical. Ce réseau a comme relais des structures telles que les noyaux accumbens, l'hippocampe, l'hypothalamus, le thalamus ou les noyaux amygdaliens. Les noyaux amygdaliens jouent un rôle très important dans l'émotion de la peur (LeDoux, 2000) et dans celle du stress. Il existe deux circuits distincts de la peur : un circuit court qui passe directement du thalamus à l'amygdale et un circuit long qui interpose le cortex entre ces deux structures. L'analyse précise par le cortex du stimulus déclencheur de la peur, qu'il soit visuel ou auditif, va maintenir ou freiner l'action de l'amygdale sur les différentes structures responsables de l'expression corporelle de cette émotion telle que l'accélération du rythme cardiaque ou la sudation (Williams et al., 2001). La voie courte "thalamus-amygdale" permet d'assurer des réactions de survie dans un délai très court, mais peut également occasionner des réactions aujourd'hui inadaptées (comme le *freezing* en cas d'un stress trop important, dit alors stress débilissant).

II.3. Le stress, un corrélat de l'émotion

Deux littératures distinctes se sont développées autour du stress et de l'émotion. Pourtant, la présence du stress chez un individu s'accompagne toujours d'une émotion et inversement, y compris lorsque l'émotion éprouvée est positive. En effet, la non spécificité du stress est remise en question depuis longtemps et des auteurs distinguent par exemple l'*eustress*¹², stress bénéfique, et le *distress*, stress nuisible (Selye, 1974). Selon Lazarus (2006), cette séparation des champs d'études du stress et de l'émotion est une absurdité qui reflète la nature fractionnée des neurosciences. Pour Lazarus (1984), le stress ne peut être envisagé par un simple lien de cause à

¹² Ainsi, tomber amoureux peut générer du stress...

effet du type stresser/stress, il implique un phénomène perceptif et cognitif dynamique plus important que la nature du stresser lui-même. Selon la théorie du syndrome général d'adaptation (Selye, 1952), le stress est une réponse de l'organisme à une agression afin de mobiliser des forces physiques et mentales. Le stress moderne n'est plus, la plupart du temps, consécutif à une menace physique telle que celle d'un prédateur. Il peut être issu par exemple « de la perception d'un déséquilibre entre les attentes perçues et l'autoévaluation de ses propres capacités à rencontrer les exigences d'une tâche » (Jacques Larue in Le Scanff & Bertsch, 1995).

La réaction à un stimulus stressant se décompose (Fig. 22) classiquement en trois phases (Selye, 1952) :

- Phase d'alarme, réception sensorielle du stimulus stressant : analyse du stimulus par le couple cortex/système limbique (en particulier amygdale), mise en branle de l'hypothalamus, de la formation réticulée, des médullosurrénales (sécrétion des catécholamines) puis vascularisation des muscles, mydriase, emballement cardiaque etc. Le système orthosympathique domine ;
- Phase de résistance, s'il y a persistance de l'agent stressant : l'amygdale et l'hypothalamus sont toujours activés (libération de corticolibérine). Mise en branle de l'Adénophyse (libération d'ACTH ou Adrenocorticotropie hormone) et libération d'hormones glucocorticoïdes par les glandes corticosurrénales. Les fonctions inutiles sont inhibées et la production de glucose est élevée. Le système orthosympathique continu d'être activé ;
- Phase d'épuisement, si exposition prolongée et ou répétée au stimulus stressant : dérégulation de plusieurs systèmes neuronaux et endocriniens, élévation constante du taux de glucocorticoïdes, pathologies somatiques (maladies cardiovasculaires, diabète, obésité...) et psychiques (indifférence, dépression, anxiété...). Les systèmes orthosympathique et parasymphathique sont conjointement activés.

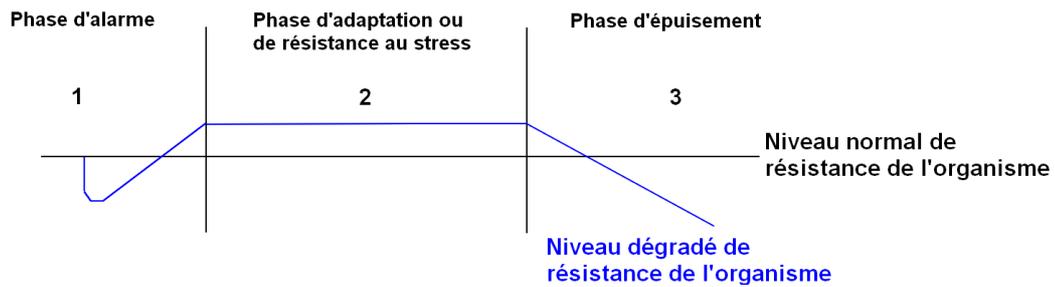


Fig. 22 : Les trois phases du stress de la théorie du syndrome général d'adaptation de Selye (1952). Le niveau de résistance de l'organisme est accru après réception du stimulus stressant puis diminue significativement lors de la phase d'épuisement.

II.4. Influence de l'émotion et de la récompense sur les FE

II.4.1. Emotion/stress et FE, des forces opposées ?

L'intégration de l'émotion dans le champ des neurosciences cognitives est un phénomène récent. Selon Sander et Koenig (Sander & Koenig), ce désintérêt historique pour l'émotion s'explique par la difficulté que représente leur investigation ainsi que par l'influence du modèle cartésien, considérant la cognition comme l'incarnation de la raison. Pourtant, les prémisses de cette intégration sont anciennes. Ainsi, par exemple, MacLean (1962) écrivait : « *L'homme se trouve dans cette situation complexe : la nature l'a dotée essentiellement de trois cerveaux qui, en dépit de grandes différences de structure, doivent fonctionner ensemble et communiquer entre eux* ». Les effets débilissants d'un stress aigu sur le fonctionnement intellectuel font parti depuis longtemps des représentations collectives. La célèbre anecdote du cinéma suffit pour s'en persuader :

Dans un cinéma, un groupe de spectateur regarde un film lorsqu'un incendie se déclare. Quelques personnes se ruent vers les sorties et essayent d'ouvrir les portes en les poussant. Elles demeurent fermées. Pris de panique, les gens poussent plus fort, frappent les portes, se jettent contre elles mais leur efforts sont vains, elles restent résolument fermées. Plus tard un pompier les ouvre facilement, elles n'étaient pas verrouillées mais elles s'ouvraient vers l'intérieur de la salle...

Cet exemple montre clairement l'effet du stress qui perturbe les capacités analytiques et conduisent les personnes à se focaliser sur un seul aspect du problème, sans imaginer de solutions alternatives. Leur seul comportement est de répéter plusieurs fois la même action en

intensifiant de plus en plus la force de celle-ci. Le stress leur a fait perdre leur flexibilité mentale, ce qui peut paraître incongru considérant le fait qu'il s'agit d'une fonction générale d'adaptation. Cependant très peu de données empiriques existaient jusqu'à récemment pour caractériser les sous-bassement neuronaux de tels comportements. Désormais, de nombreuses études mettent en évidence les effets délétères du stress débilisant (Porcelli et al., 2008; Qin et al., 2009; Scholz et al., 2009; Waldstein & Katzel, 2005) et de l'anxiété (Airaksinen et al., 2005; Castaneda et al., 2008; Egloff & Hock, 2001) sur le fonctionnement cognitif et exécutif.

Afin d'observer ses effets, deux types d'induction du stress sont employés classiquement dans les études de laboratoire : le stress psychosocial et le stress physiologique. Les inductions de type psychosociales impliquent généralement la réalisation d'une performance coûteuse en ressources cognitives (ex : calcul arithmétique) dans un contexte social. Le *Trier Social Stress Test* (Kirschbaum, Pirke, & Hellhammer, 1993) est couramment employé dans ce but. Il consiste en un test arithmétique de cinq minutes qui doit être réalisé face à un comité pendant qu'une caméra enregistre la performance. Cet exercice est reconnu comme facteur d'activation du SNA et des études ont montré qu'il provoquait des effets délétères sur les performances de la MDT (Oei, Everaerd, Elzinga, Van Well, & Bermond, 2006) ou sur la réalisation de la tâche de MAJ du N-back (Schoofs, Preuß, & Wolf, 2008). Schoofs (2009) a également employé les inductions de stress physiologique et a montré que l'immersion du bras dominant dans une eau proche de zéro degrés Celsius impactait spécifiquement sur les performances à une tâche de MDT impliquant les FE (empan envers). Ce n'était pas le cas pour une tâche de mémoire ne les impliquant pas (empan endroit, nécessitant seulement la MCT). Par ailleurs, le taux de cortisol, indice fiable de l'état de stress était négativement corrélé avec les performances obtenues à la tâche.

Les relations entre émotion et FE sont complexes. Par exemple, les caractéristiques de certaines épreuves impliquant les FE peuvent générer du stress (Causse, Dehais et al., 2009; Simpson, Snyder, Gusnard, & Raichle, 2001a). Les études visant à montrer le lien entre émotion et cognition s'avèrent bien souvent contradictoires. Alors que des capacités émotionnelles diminuées étaient supposées dégrader la qualité de la prise de décision (Bechara et al., 1997), une étude plus récente (Shiv, Loewenstein, & Bechara, 2005) a montré que dans certaines conditions, le contraire était possible. Par ailleurs, l'émotion positive, censée exercer un rôle bénéfique sur les FE (Isen, 2004), notamment grâce à la dopamine relâchée au sein du CPF (Ashby, Velentin, & Turken, 2002; Isen, 1999), est également considérée comme délétère pour les FE (Oaksford et al., 1996; Phillips et al., 2002). De même, l'émotion négative apporte tantôt une amélioration (Van Strien, Stolk, & Zuiker, 1995) tantôt une dégradation (Hogan, 2003). Nous avons également retrouvé des résultats de ce type dans une étude d'induction d'émotions positives et négatives

par avatars. Ces deux émotions élicitaient des modifications du SNA et avaient toutes deux eues un effet délétère sur les FE par rapport à des avatars émotionnellement neutres (Causse, Pavard, Sénard, Démonet, & Pastor, 2007). Selon une étude de Mitchell et Phillips (2007), les effets néfastes de l'émotion positive et négative sont respectivement dus au rôle de la dopamine et de la sérotonine dans le CPF.

Ces données de la littérature semblent suggérer qu'un équilibre émotionnel et cognitif satisfaisant doit être atteint pour obtenir une bonne performance intellectuelle. Les travaux de Yerkes & Dodson (1908) avaient déjà jeté les bases d'une certaine corrélation entre le niveau d'éveil de l'organisme et la performance cognitive chez la souris. Dans cette étude, des souris recevaient des chocs électriques d'intensités variables lors de chaque erreur dans une tâche de discrimination visuelle. Les résultats montrèrent une relation quadratique négative entre éveil et performance (hypothèse de l'*U inversé*) : une moins bonne performance d'apprentissage était associée aux chocs électriques de faibles ou fortes intensités, les meilleures performances des souris étaient associées à des chocs d'intensités moyennes. De plus, un niveau faible d'éveil semblait optimal pour obtenir de bonnes performances sur une tâche complexe vs. une tâche simple (hypothèse de la difficulté de la tâche). Cette relation en *U inversé* qui prédit que la performance la meilleure sera atteinte par un niveau d'éveil ni trop faible ni trop fort, a été généralisé depuis, avec un certain succès, au stress et à la performance humaine (Fig. 23).

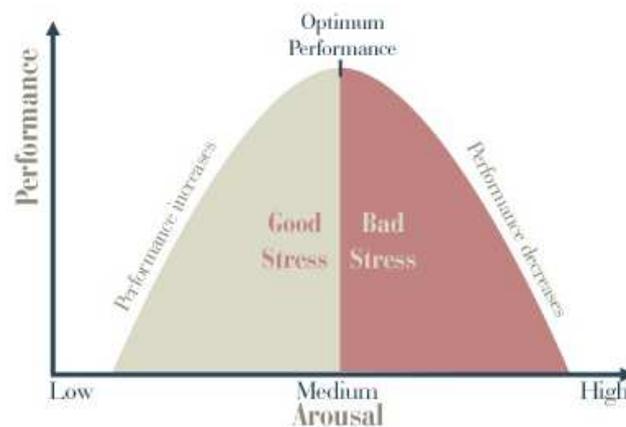


Fig. 23 : Adaptation de l'hypothèse de l'U inversé de Yerkes & Dodson (1908). Les performances augmentent à mesure que le niveau d'éveil de l'organisme s'accroît. Arrivé à un niveau optimum, l'accroissement de l'éveil de l'organisme conduit à une chute des performances.

II.4.2. Emotion et FE, des bases cérébrales duales

Des études permettent de mieux comprendre les relations entre émotion et cognition en mettant en avant les réseaux cérébraux responsables de leurs influences réciproques. Elles montrent notamment les relations étroites entretenues entre les structures préfrontales (siège majeurs des FE) et le système limbique. L'émotion peut moduler la cognition et inversement, l'activité cognitive, en particulier lorsqu'elle implique les FE, peut moduler l'état émotionnel (Blair et al., 2007; Mitchell et al., 2007). Certaines recherches ont déjà mis à jour depuis une dizaine d'années des activations cérébrales cohérentes avec l'hypothèse d'interactions entre émotion et cognition. Drevets & Raichle (1998) ont montré l'existence d'une balance dynamique entre des régions du système limbique (amygdale, cortex postéromédial, CCA ventral) et des régions réputées plus cognitives (CCA dorsal et CPFDL). Pareillement, Mayberg et collaborateurs (1999) ont montré que l'augmentation de l'activité des régions limbiques et paralimbiques (cingulaire subgénéral, insula antérieure) était proportionnelle à la diminution de l'activité des régions néocorticales (CPF droit, cortex pariétal inférieur) lors de l'induction de la tristesse. Ce type d'observation est supporté par une étude récente de Mitchell (2007), qui a démontré que l'activité du CPFDL est inversement proportionnelle à celle du CPFVM. Dans un registre semblable, Bush (2000) a mis en évidence une subdivision cognitive et une subdivision émotionnelle au sein du CCA. L'une serait responsable des traitements émotionnels et l'autre serait en charge de la gestion des traitements cognitifs (Fig. 24).

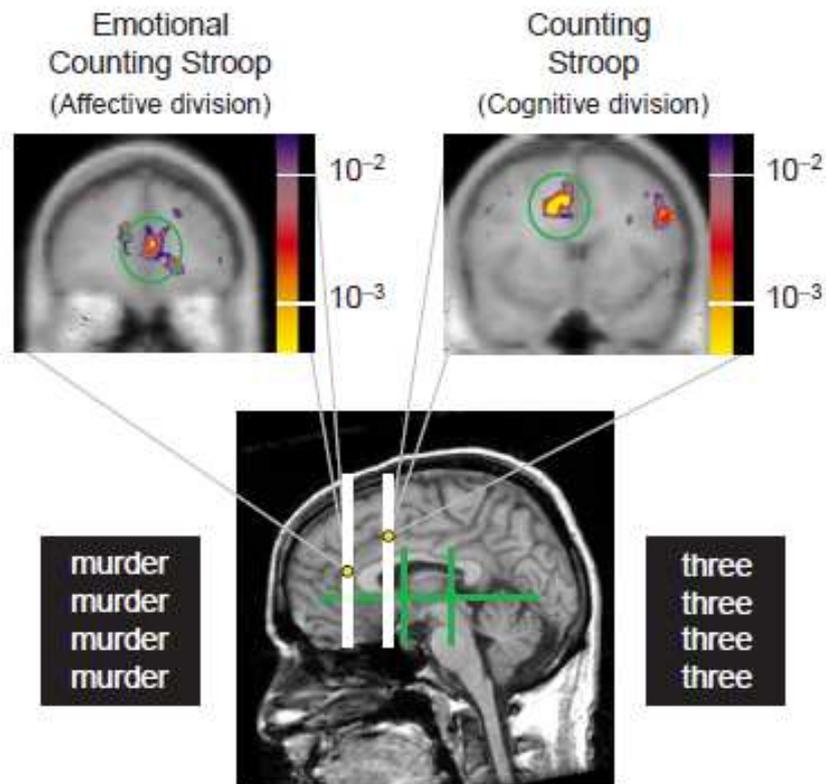


Fig. 24 : Activations du cortex cingulaire antérieur durant deux tâches : le Stroop émotionnel et le Stroop cognitif. Alors que la première tâche active la subdivision émotionnelle du cortex cingulaire antérieur, la seconde recrute sa partie cognitive. Image tirée de Bush (2000).

Goel et Dolan (2003) ont également retrouvé ce type de subdivision émotionnelle et cognitive dans le CPF au cours d'une tâche de résolution de syllogismes. Lorsque les syllogismes présentés n'avaient pas de coloration émotionnelle, des activations du CPFDL étaient retrouvées, en revanche, lorsque les syllogismes étaient émotionnellement connotés, des activations du CPFVM étaient observées (par contre, aucun effet sur la performance de raisonnement n'était retrouvé), voir (Fig. 25).

Reciprocal Activation in LPFC & VMPFC in Response to Cold and Hot Reasoning

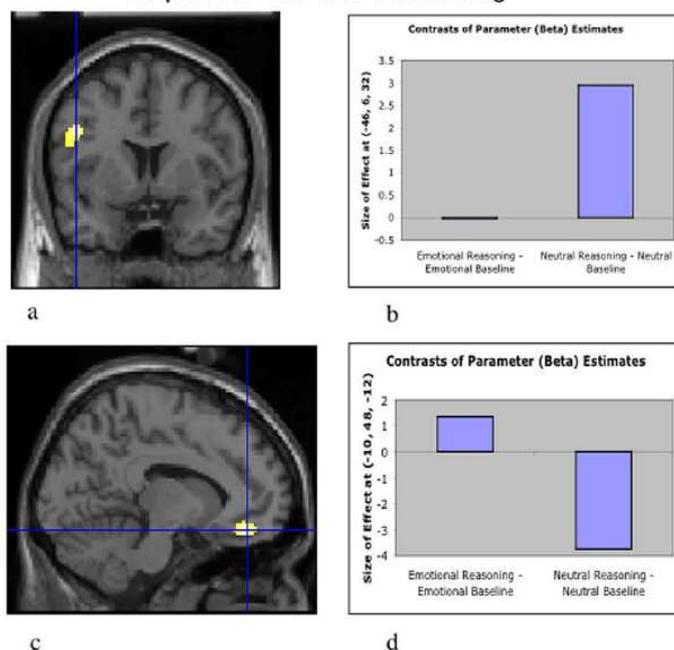


Fig. 25 : Activations du cortex préfrontal dorsolatéral gauche durant la résolution de syllogisme neutres (a,b) et activations bilatérales du cortex préfrontal ventromédian lors de la résolution de syllogismes émotionnels (c,d). Image tirée de Goel et Dolan (2003).

Une étude en TEP¹³ de Simpson (2001a) avait déjà mis en évidence des résultats proches qui illustraient la balance entre émotion et cognition. Il avait montré que des réductions des activations du CPF médian, de l'hypothalamus et du tronc cérébral, intervenaient dès le début d'une tâche de génération de mots. Ces diminutions s'accroissaient au fur et à mesure de l'amélioration des performances et de la baisse du niveau d'anxiété. Dans une seconde étude, Simpson (2001b) montrait une diminution du volume sanguin dans le CPFVM chez des participants ayant le mieux géré l'anxiété provoquée par l'attente d'un choc électrique. Ces activations plus faibles du CPFVM illustraient, selon les auteurs, la dynamique des interactions entre stratégie cognitive (attention focalisée) et anxiété. Il semble que le CPFVM possède un état d'activation tonique voué à la détection et à l'évaluation permanente des stimuli pertinents d'un point de vue motivationnel ou émotionnel, le *default mode*. Ce *default mode*, interrompu lors de tâches cognitives a été richement décrit par Raichle (2001; 2007). D'autres auteurs ont confirmé le lien entre les régions ventromédianes et ce *default mode*, et lui ont associé une activité dynamique de déploiement intéroceptif et extéroceptif de l'attention, corrélée à l'activité du SNA, observée grâce à la réponse électrodermale (Nagai, Critchley, Featherstone, Trimble, & Dolan, 2004).

¹³ Tomographie par émission de positron, technique de neuroimagerie.

L'ensemble de ces travaux montrent qu'il existe des spécialisations fonctionnelles associées aux traitements cognitifs et émotionnels. La dissociation de ces deux grandes habiletés humaines ne semble aujourd'hui plus envisageable. Elles sont toutes deux parties prenantes des processus décisionnels. La neuroéconomie est une discipline qui s'intéresse précisément à cela.

II.4.3. Effets de la récompense sur les FE

La situation de prise de décision sous incertitude est un courant de recherche très actif en économie et en neurosciences. Si durant le dernier siècle, la théorie des choix rationnels a beaucoup apporté au monde stratégique et économique, elle a aussi été souvent remise en question par différents courants révélant que dans bien des situations, l'être humain ne prend pas la meilleure décision attendue par les modèles d'utilité. En tant qu'être émotionnel, il est influencé par un certain nombre de biais bien spécifiques. La neuroéconomie se propose d'étudier l'influence de différents facteurs pesant sur la réalisation des prises de décisions économiques ainsi que les bases neuronales de ces processus. Elle fusionne des disciplines telles que les neurosciences, l'économie ou encore la psychologie et apporte ainsi de nouveaux outils d'investigation. Les protocoles expérimentaux sont souvent complexes, généralement basés sur des systèmes monétaires et impliquent des moyens de neuroimagerie (IRMf le plus souvent). De façon générale, les études en neuroéconomie mettent en avant le fait que les processus de décisions financières réalisés dans un contexte risqué mettent en jeu différentes zones cérébrales impliquées normalement lors d'expériences émotionnelles de la vie quotidienne. Ainsi, les activations neuronales retrouvées, correspondent à des réseaux cérébraux mis en jeu notamment lors de plaisirs intenses ou de fortes souffrances.

Les études sont conçues de façon à analyser tout le processus décisionnel, depuis la prise de décision elle-même jusqu'au traitement de ses conséquences financières. La prise de décision sollicite notamment des régions très cognitives, impliquées dans les FE. Par exemple, Dreher (2006) a mis en évidence des activations du CPFDL et Coricelli (2005) de certaines régions du CCA durant la prise de décision. Cependant, l'implication d'autres régions faisant d'avantage l'interface entre émotion et cognition comme le COF, est également observée. La période d'attente (délai) est étudiée afin de mieux comprendre comment le cerveau se prépare à recevoir une punition ou une récompense. Par exemple, des situations où une récompense ou une punition de forte amplitude est attendue (en opposition à l'attente d'une récompense ou d'une

punition de faible amplitude) génère un fort recrutement du thalamus (Knutson, Adams, Fong, & Hommer, 2001). Enfin, l'analyse par le cerveau des conséquences des décisions (résultat) est également étudiée. Par exemple, Coricelli (2005) a montré que des activations différentielles du striatum intervenaient selon que le sujet se voit offert une récompense vs. une punition (voir Tableau 3 pour illustration).

Tableau 3 : Illustration de différentes régions mentionnées dans quelques études en neuroéconomie. Ces régions sont classées en fonction des trois périodes généralement étudiées : durant la prise de décision, durant le délai avant la récompense/punition et pendant l'obtention du résultat.

Régions	Prise de décision et amorce	Délai	Résultat
CPFDL	Regrets immédiats (Coricelli et al., 2005); Haute probabilité de récompense (Dreher et al., 2006).	Arousal ou éveil SNC (Critchley, Mathias, & Dolan, 2001).	Erreur de prédiction (Dreher, Kohn, & Berman, 2006).
CCA	Minimisation des regrets (Coricelli et al., 2005); Haute probabilité de récompense (Dreher, Kohn, & Berman, 2006).	Niveau d'incertitude de la récompense et arousal (Critchley et al., 2001).	Raisonnement contrefactuel et Regrets - soulagement (Coricelli et al., 2005); Récompense et prédiction réussie (Dreher et al., 2006).
COF	Regrets immédiats et cumuls des regrets (Coricelli et al., 2005); Haute probabilité de récompense (Dreher et al., 2006).	Niveau d'incertitude de la récompense (Critchley et al., 2001).	Raisonnement contrefactuel et Regrets - soulagement (Coricelli et al., 2005); Prédiction réussie (Dreher et al., 2006)
Cortex pariétal	Haute probabilité de récompense (Dreher et al., 2006).	Arousal (Critchley et al., 2001).	Regrets (Coricelli et al., 2005).
Striatum		Niveau d'incertitude de la récompense (Dreher et al., 2006); Attente de récompenses et punitions à forte amplitudes (Knutson et al., 2001).	Perte vs. gain (Coricelli et al., 2005).
Noyaux accumbens		Attente de la récompense (Knutson et al., 2001).	
Thalamus	Regrets cumulés (Coricelli et al., 2005).	Attente de récompense et punition à forte amplitude (Knutson et al., 2001).	
Amygdale limbique	Regrets cumulés (Coricelli et al., 2005).		
Mésencéphale dopaminergique	Minimisation des regrets (Coricelli et al., 2005); Haute probabilité de récompense (Dreher et al., 2006).	Incertitude forte de la récompense, prise d'information sur la récompense « à la Shannon » (Dreher et al., 2006).	Erreur de prédiction (Dreher et al., 2006).

Deux de ces études, celles de Coricelli (2005) et de Taylor (2004), ont particulièrement retenu notre attention et nous ont été utiles dans le cadre de la réalisation de notre protocole IRMf.

La première, de Coricelli (2005), réalisée en IRMf, a mis en évidence des régions cérébrales impliquées dans la prise de décision risquée et dans le traitement des conséquences négatives éventuelles de cette prise de décision. Les stimuli étaient constitués de deux « roues de la fortune » présentant différentes sommes pouvant être remportées ou perdues (Fig. 26). La tâche était réalisée selon deux conditions. Soit le participant était impliqué dans le choix d'une des deux roues, il s'agissait alors de la condition *choose*. Soit le participant était passif et le système sélectionnait lui-même la roue parmi les deux présentées, il s'agissait de la condition *follow*. Ces deux conditions modulaient le niveau d'implication du participant. Ensuite, le feedback, c'est à dire l'affichage du résultat, était également présenté selon deux conditions. Soit seul le résultat de la roue sélectionnée était présenté, le *partial feedback*, soit le résultat des deux roues était présenté, le *complete feedback*. Cette variation de la quantité de feedback repose sur l'idée selon laquelle l'affichage du feedback partiel générera de la déception si le résultat alternatif est positif et que le résultat obtenu est négatif. En revanche, l'affichage du feedback complet générera des regrets, si le résultat qui aurait été obtenu avec un choix différent de celui qui a été réalisé était préférable.

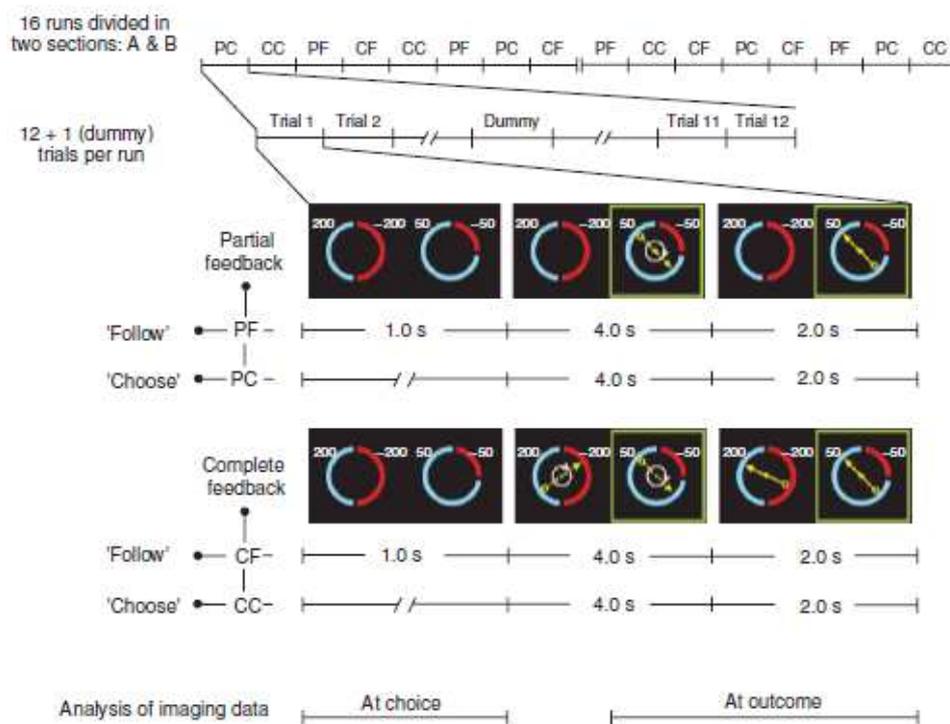


Fig. 26 : Design expérimental, l'analyse des données de neuroimagerie est réalisée durant la prise de décision (*at choice*) ainsi que pendant la présentation du résultat (*at outcome*).

Les résultats ont validé le fait que le niveau d'implication (*choose ou follow*) modulait l'activité cérébrale. En effet, seule la participation active (*choose*) provoquait une hausse de l'activité du striatum ventral durant l'obtention de gains. L'activité de cette même région diminuait lorsque le participant accusait des pertes. Ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse de l'erreur de prédiction de la récompense (Dreher et al., 2006). Selon cette hypothèse, l'erreur de prédiction n'existe que lorsque l'individu est activement impliqué dans le processus de choix. Des mesures physiologiques ont également été réalisées par Coricelli. Le rythme cardiaque était plus élevé durant la condition *choose* que durant la condition *follow*. Par ailleurs, le type de feedback influençait également les activations cérébrales : la déception générait une activité du gyrus temporal médian et de la partie dorsale du tronc cérébral. Cette activité était proportionnelle à la différence entre le résultat obtenu et le résultat alternatif. Les regrets, générés par l'obtention d'un résultat moins intéressant que celui que l'on aurait obtenu en choisissant l'autre roue, élicitaient des activations du COF médial alors que le soulagement, en cas de situation inverse, diminuait l'activité de cette structure.

Les résultats comportementaux ont par ailleurs montré que l'expérimentation répétée des regrets conduisait les participants à avoir une attitude plus conservatrice. Ces derniers évitaient progressivement les décisions risquées ayant déjà entraîné des regrets. Ce comportement était associé à des activations du COF médial et de l'amygdale pendant le processus de prise de décision.

La seconde étude, celle de Taylor (2004), a également mis en évidence certaines modifications des prises de décisions sous l'influence de l'enjeu financier. La tâche réalisée en IRMf, consistait en la présentation successive de trois images cibles qui devaient être maintenues en MCT. Le participant devait décider, lors de la présentation d'une sonde, si oui ou non l'image présentée se trouvait parmi les trois images précédemment présentées. La sollicitation de la MCT se faisait selon deux niveaux de complexité : soit les trois images cibles étaient identiques, soit elles étaient différentes. Le dernier cas de figure rendait la comparaison avec la sonde plus difficile. Par ailleurs, deux niveaux de récompense étaient introduits, faible et élevée. Pour la condition de récompense élevée, la matrice de paiement favorisait les fausses reconnaissances dans la mesure où spécifier à tort que l'image sonde ne correspondait à aucune des trois images mémorisées (faux négatif ou erreur de type 2) coûtait un dollar alors qu'une fausse reconnaissance (faux positif ou erreur de type 1) ne coûtait que dix centimes. Les résultats comportementaux ont mis en évidence une diminution des temps de réactions lorsque la tâche était réalisée dans la condition haute récompense. De plus, les prises de décisions étaient effectivement biaisées de façon conséquente par la matrice de paiement : les participants

montraient une tendance à augmenter le nombre de faux positifs en vue de maximiser les gains. L'effet de la condition haute récompense se traduisait par ailleurs par une augmentation de l'activité du gyrus frontal inférieur et du COF latéral (Fig. 27).

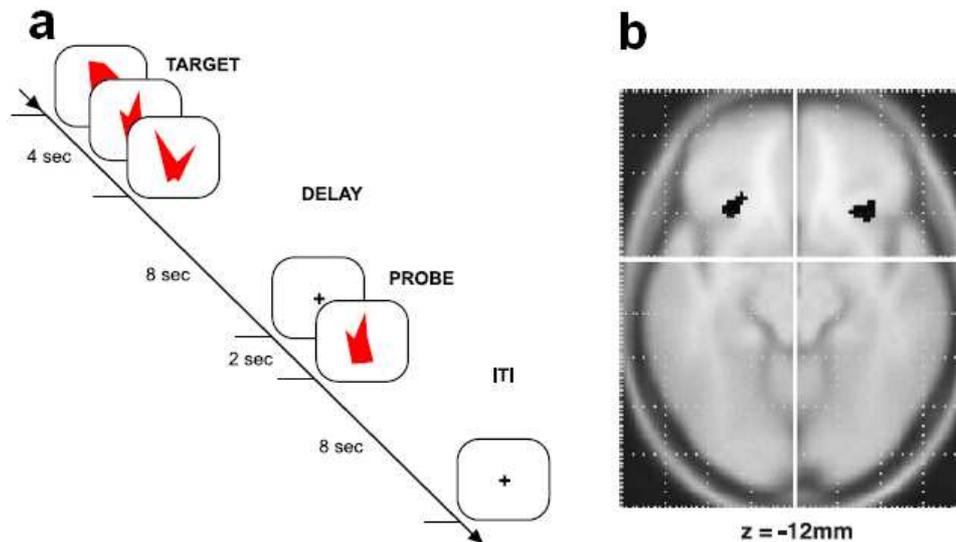


Fig. 27 : A : Design expérimental de la tâche. B : activations durant la récupération en mémoire à court terme associées à la forte motivation financière (high–low reward) : gyrus frontal inférieur et cortex orbitofrontal latéral.

Les paradigmes expérimentaux de ces deux études nous semblent tout à fait pertinents et exploitables dans le cadre de la neuroergonomie en aéronautique. Les systèmes monétaires permettent de reproduire, par analogie, les pressions s'exerçant sur les pilotes (ex : pression financières de la compagnie) et permettent d'en observer les effets comportementaux et cérébraux lors des différentes étapes du processus décisionnel. Nous abordons maintenant le second facteur de dégradation des FE qui nous a intéressé, définitif celui-ci : le vieillissement.

III. Age et FE

Il est maintenant bien établi qu'un certain nombre de fonctions cognitives, notamment les FE, sont altérées au cours du vieillissement normal. La neuroimagerie fonctionnelle a mis en évidence les changements anatomiques et physiologiques qui touchent le cerveau au cours de cette période (Cabeza, 2001, 2002a; Cabeza, Anderson, Locantore, & McIntosh, 2002b; Cherubini, Péran, Caltagirone, Sabatini, & Spalletta, 2009), notamment les modifications du circuit striato-frontal. Un nombre grandissant d'indices montrent la détérioration précoce des réseaux

préfrontaux en comparaison à d'autres régions corticales (Moscovitch & Winocur, 1995; Tisserand & Jolles, 2003). Cette dégradation précoce pourrait être la cause majeure des premiers changements cognitifs en général (West, 2000) et des troubles exécutifs en particuliers (Raz, 2000). Par ailleurs, il semblerait que cette dégradation intervienne majoritairement sur la partie dorsolatérale plutôt que ventromédiane du CPF (MacPherson, Phillips, & Sala, 2002). Ces changements du CPFDL au cours du vieillissement conduisent à des déficits de la MDT, du *set-shifting* ou encore de la résolution de problème (Allain, Chaudet et al., 2007; Allain, Kauffmann, Dubas, Berrut, & Le Gall, 2007; Allain et al., 2005). Il existe une grande hétérogénéité des altérations cognitives au cours du vieillissement, certaines fonctions étant plus précocement touchées que d'autres (Etienne, Marin-Lamellet, & Laurent, 2008). De plus, ce déclin varie considérablement en fonction des individus (Buckner, 2004). Les interactions complexes entre les structures cérébrales sous-tendant les FE ainsi que les facteurs socioculturels et génétiques (Nagel et al., 2008) peuvent expliquer cette hétérogénéité.

Des recherches ont été menées afin de déterminer si les sujets âgés mettaient en jeu des réseaux cérébraux similaires à ceux de sujets jeunes au cours de la réalisation de tâches cognitives. Si la présence d'une diminution de l'activité de certaines régions chez les sujets âgés a été interprétée comme reflétant un niveau de fonctionnement réduit, différentes interprétations ont été proposées pour expliquer le recrutement de régions supplémentaires. En effet, pour certains auteurs (ex : Cabeza, 2002a), ces régions supplémentaires serviraient à compenser l'efficacité réduite d'autres régions également impliquées dans la tâche. Cette hypothèse de compensation est notamment soutenue par l'existence d'un recrutement de régions additionnelles (principalement contralatérales) chez des patients cérébrolésés ayant récupéré certaines fonctions cognitives (Cao, Vikingstad, George, Johnson, & Welch, 1999). Pour d'autres auteurs toutefois, cette implication de régions supplémentaires ne témoignerait pas de phénomènes de compensation mais plutôt d'un processus de « dédifférenciation ». En d'autres termes, le vieillissement serait associé à une diminution de la spécialisation du système nerveux central. Les activités cérébrales supplémentaires reflèteraient une capacité réduite à réaliser des activités focales spécifiques et à supprimer l'activité des régions non pertinentes pour la tâche (Li & Lindenberger, 1999). Une étude de Cabeza (2002b) a tenté de trancher entre dédifférenciation et compensation. Dans cette expérimentation, les participants réalisent deux tâches de mémoire différentes : la condition rappel et la condition contextuelle (*source memory*). Dans les deux conditions, les sujets apprennent une liste d'items avant d'être scannés. La mémorisation est ensuite testée dans le scanner (TEP). Pour la condition de rappel, les participants doivent retenir vingt-quatre paires de mots non liés sémantiquement (ex : avocat-fenêtre). Durant le scan, le

premier mot (ex : avocat) leur est présenté et ils doivent rappeler le second (ex : fenêtre). Pour la condition contextuelle, avant le scan, les participants étudient des listes de douze mots présentées auditivement ou visuellement. Durant le scan, ils lisent chacun de ces mots et doivent spécifier si celui-ci avait été lu ou entendu durant la phase d'apprentissage (rappel du contexte). Les auteurs ont mesuré le débit sanguin cérébral régional de sujets jeunes et âgés lors de la réalisation de l'épreuve de rappel contextuel. Cette épreuve met en jeu des régions préfrontales, uniquement latéralisées à droite. Les sujets âgés ont été subdivisés en deux groupes selon leur performance à cette épreuve (comparable ou inférieure à celle des sujets jeunes). Selon l'hypothèse de compensation, les auteurs s'attendaient à observer une réduction de l'asymétrie au sein des régions préfrontales uniquement chez les sujets âgés présentant une bonne performance. Par contre, selon l'hypothèse de dé-différentiation, cette réduction d'asymétrie devait survenir chez les sujets avec une faible performance. Les résultats obtenus tranchaient clairement en faveur de l'hypothèse de compensation (Fig. 28). En effet, comme attendu, une activité préfrontale latéralisée à droite était observée lors de la réalisation de la tâche chez les sujets jeunes. Mais cette activité était bilatérale chez les sujets âgés présentant une performance comparable à celle des sujets jeunes. En revanche, elle était plus diffuse et localisée à droite uniquement chez les sujets âgés avec une performance faible. Au vu de ces résultats, il apparaît donc que les sujets âgés présentant la moins bonne performance engagent un réseau similaire à celui des sujets jeunes mais utilisent ce réseau de façon moins efficace, tandis que les sujets âgés avec une performance satisfaisante, compensent le déclin neuronal lié à l'âge à travers une réorganisation des réseaux cérébraux.

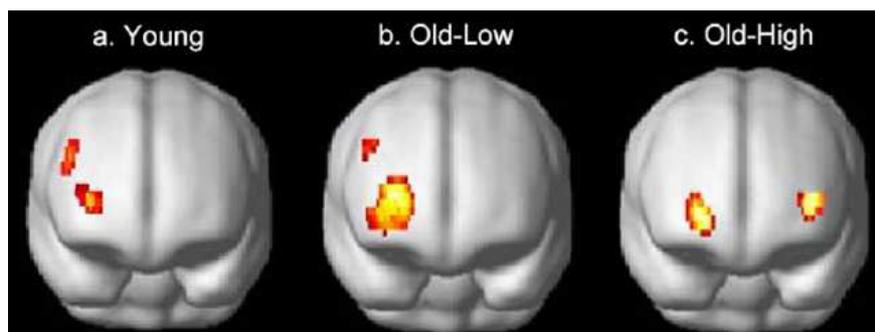


Fig. 28 : Activations préfrontales durant la condition contextuelle : latéralisées à droite pour les participants jeunes (a) et les participants âgés (en plus diffuses) qui présentent de mauvaises performances (b) ; bilatéralisées pour les participants âgés présentant de bonnes performances (c).

III.1. Mémoire de travail et vieillissement normal

Les études montrant les effets du vieillissement sur le fonctionnement de la MDT sont légion. Il apparaît que le vieillissement est lié à une diminution des performances dans les tâches évaluant le fonctionnement de la MDT, qu'il s'agisse d'épreuves d'empan verbal ou visuospatial (ex : Gregoire & Van Der Linden, 1997; Orsini et al., 1986; Verhaeghen, 1993). Les résultats classiques pointent l'extrême importance des régions préfrontales, en particulier dorsolatérales (Cohen et al., 1997), dans les processus liés à la MDT. Des études plus récentes indiquent qu'il existe des subdivisions fonctionnelles au sein du CPF. Ainsi, Rypma & D'Esposito (2003) ont montré que le CPFDL, activé uniquement sous forte charge mnésique, est impliqué dans les processus d'organisation de la mémoire alors que le CPF ventrolatéral, sous tendant vraisemblablement les processus de maintien d'un nombre réduit d'items (vraisemblablement 4 ± 1 , voir Cowan, 2001), serait impliqué dans le stockage et jouerait le rôle de buffer mnésique. Les auteurs ont également mis en évidence une corrélation entre l'activation du CPFDL, observée durant l'encodage, avec le pourcentage de bonnes réponses au cours de la phase de récupération. D'autres études montrent le recrutement d'un large réseau, impliquant la participation des régions liées au *default mode*, régions cérébrales (notamment dorsolatérales et cingulaires) montrant une désactivation lors d'une activité cognitive (*task-induced désactivation*, TID). Cette désactivation est réduite au cours du vieillissement et semble témoigner d'une difficulté à allouer les ressources spécifiques à l'accomplissement de la tâche de MDT (Sambataro et al., 2008). Enfin, des résultats très récents montrent également l'importance de l'intégrité de la matière blanche, déterminée par l'imagerie cérébrale en Tenseur de Diffusion (ITD), sur les performances de MDT au cours du vieillissement (Charlton, Barrick, Lawes, Markus, & Morris, 2009). Ceci est vrai notamment pour les réseaux du lobe pariétal supérieur, le réseau fronto-temporal médian, le faisceau unciné, le faisceau fronto-pariétal et le cingulum.

Van der Linden et collaborateurs (1994) ont utilisé la tâche du *running span* (tâche évaluant la MAJ décrite précédemment) afin d'analyser dans quelle mesure les sujets âgés présentent un déficit de l'AC. Dans une première expérience, ils présentent à des sujets jeunes et âgés des listes de quatre, six, huit, et dix consonnes, au rythme d'une consonne par seconde, et ils leur demandent de rappeler dans un ordre sériel strict les quatre derniers items. Dans cette condition, la performance en rappel des sujets âgés n'est pas différente de celle des sujets jeunes. Par ailleurs, les processus de MAJ sollicités par des listes de plus de quatre mots, ne perturbaient le rappel que modérément. Selon les auteurs, cette absence d'effet d'âge était liée au fait que le

maintien de quatre items en MDT n'exige pas beaucoup de ressources de la part de l'AC, ce qui expliquerait pourquoi le rappel n'est que peu affecté par les processus de MAJ. En conséquence, les auteurs ont réalisé une deuxième expérience dans laquelle ils ont présenté à d'autres sujets jeunes et âgés des listes de six, huit, dix et douze consonnes et leur ont demandé de rappeler les six derniers items : il s'agit d'une charge mnésique qui exige vraisemblablement une contribution plus importante de l'AC. Dans cette condition, les résultats montrent des différences très significatives entre sujets jeunes et âgés dans la performance de rappel. Par ailleurs, ces différences s'accroissaient à mesure que le nombre de mises à jour à effectuer augmentait. Ces résultats suggèrent l'existence d'une diminution des ressources de l'AC chez les sujets âgés, laquelle entrave la réalisation simultanée du maintien en mémoire des consonnes et des opérations de MAJ.

III.2. *Set-shifting* et vieillissement normal

Les données de la littérature révèlent que les trois composantes bas niveaux de Miyake (2000), y compris le *set-shifting*, sont affectées par l'âge (Fisk & Sharp, 2004). Ashendorf (2008) a montré que le déclin du *set-shifting* au cours du vieillissement expliquait la chute des performances au WCST. Il associe également une chute du maintien en mémoire de la règle courante à ce déclin. Les erreurs persévératives au WCST, reflétant notamment ce déclin du *set-shifting*, sont considérées comme étant fortement dépendantes de l'intégrité du fonctionnement exécutif et donc du CPFDL. Les erreurs persévératives sont extensivement explorées dans la littérature portant sur les effets du vieillissement (Voir Rhodes 2004 pour revue). Head (2009) a pointé une multitude de causes explicatives du déclin des performances au WCST chez les individus âgés. Cent-dix-sept participants jeunes et âgés ont exécuté une version informatisée du WCST ainsi que d'autres tests mesurant diverses habiletés cognitives : MDT, inhibition, processus de traitement temporel etc. La vitesse de traitement était également évaluée (*processing speed*). Par ailleurs, des mesures volumétriques cérébrales des participants étaient effectuées en IRM. Les résultats observés suggèrent que l'augmentation des erreurs persévératives au cours du vieillissement est totalement expliquée par le déclin en termes de vitesse de traitement et de traitement temporel (associé à la MAJ et au *monitoring*) ainsi que par la chute des performances de la MDT, conséquence de la diminution du volume préfrontal ainsi que de l'influence indirecte du déclin des capacités d'inhibition via la MDT. Ces résultats vont dans le sens de travaux

antérieurs qui suggéraient déjà que le déclin du *set-shifting* était provoqué par différents facteurs (Ashendorf & McCaffrey, 2008; Fristoe, Salthouse, & Woodard, 1997; Hartman, Bolton, & Fehnel, 2001).

La batterie CANTAB (Robbins et al., 1998) est également utilisée dans le cadre de l'évaluation des FE au cours du vieillissement normal. De Luca (2003) a mesuré la flexibilité mentale de sujets âgés de huit à soixante-quatre ans avec cette batterie et a montré une chute des performances pour le groupe âgé de cinquante à soixante-quatre ans. Plus récemment, une étude de Zahr (2008), menée avec CANTAB, a montré que la concentration en glutamate (dans trois régions cibles des références glutamatergiques du CPF : le striatum, le cervelet et le pont) était corrélée aux performances de *set-shifting*.

III.3. Inhibition et vieillissement normal

Différentes études ont montré que les personnes âgées présentaient une plus grande sensibilité à l'interférence par rapport à de jeunes adultes (Bruyer, Van der Linden, Rectem, & Galvez, 1995; Houx, Jolles, & Vreeling, 1993; West & Baylis, 1998). Le déficit d'inhibition est considéré par certains auteurs comme une des causes majeures de baisse des performances cognitives. L'inhibition, dépendante de l'intégrité des régions frontales (Chao & Knight, 1997), joue un rôle central dans le fonctionnement du système cognitif en gérant le contenu de la MDT (Zacks & Hasher, 1994). Dans les hypothèses ayant trait aux effets du vieillissement sur le déclin des processus d'inhibition, une version forte fait dépendre les changements liés à l'âge à un déficit spécifique des mécanismes d'inhibition, tandis qu'une version faible suppose un lien d'ordre plus général entre certains processus stratégiques de la mémoire et du fonctionnement exécutif (Charlot & Feyereise, 2005). Un déficit du mécanisme d'inhibition a deux conséquences. D'une part, un plus grand nombre d'informations non pertinentes sont activées et prennent place en MDT, d'autre part, des informations qui ont été pertinentes mais qui ont cessé de l'être sont plus difficilement supprimées de la MDT (Bestgen & Van der Linden, 2001). Les travaux de thèse de Charlot (2003), dont les résultats ont été publiés par la suite (Charlot & Feyereise, 2005), ont consisté à comparer chez les mêmes sujets (jeunes et âgés), les effets du vieillissement sur la performance à des tâches engageant les trois formes d'inhibition (filtrage, restriction, suppression). Les résultats ont montré que les performances à des tâches impliquant les trois formes d'inhibition sont faiblement corrélées, indiquant une certaine séparabilité des trois

fonctions inhibitrices. Par ailleurs, les effets du vieillissement étaient moindres dans les tâches de filtrage, et les changements liés à l'âge affectaient plutôt la sélection d'une réponse parmi plusieurs possibles.

La tâche de Stroop est utilisée dans le cadre de l'amorçage négatif (*negative priming*), paradigme permettant d'évaluer les capacités d'inhibition. La couleur écrite (le mot) pour former le premier stimulus est utilisée comme couleur d'encre pour écrire la couleur suivante. C'est par exemple le cas dans la séquence : bleu écrit en vert suivi de rouge écrit en bleu (Fig. 29). Dans la première séquence, la lecture du mot bleu, qui était à inhiber, devient la réponse correcte (la couleur de l'encre) dans la deuxième séquence. De nombreuses études ont montré que le temps de réaction pour dénommer une couleur qui correspond au mot venant d'être inhibé dans la séquence précédente est plus long que pour en dénommer une qui n'a jamais été présentée à l'essai précédent (pour synthèses sur l'amorçage négatif voir Fox, 1995; May, Kane, & Hasher, 1995). La théorie qui rend actuellement le mieux compte de ce phénomène postule la persistance d'un mécanisme d'inhibition qui a affecté le distracteur durant l'essai précédent, ce mécanisme étant d'autant plus fort que les capacités d'inhibition sont efficaces.

Bleu *Rouge* *Vert*

Fig. 29 : L'amorçage négatif, exemple d'utilisation du test de Stroop. La lecture du deuxième item est gênée par l'inhibition précédente exercée sur le premier item (mot bleu à inhiber).

Contrairement à l'interférence classique, le paradigme de l'amorçage négatif pénalise les personnes dont les processus d'inhibition sont les plus performants. McDowd (1995) a par exemple montré qu'un groupe de sujets âgés ne présentaient pas d'effet d'amorçage négatif contrairement à un groupe de jeunes.

III.4. Raisonnement et vieillissement normal

Etant donné sa très forte intrication avec l'intelligence générale, ou fluide, le raisonnement est fortement corrélé à différentes habiletés cognitives. Par exemple, des travaux de Gilinsky (1994) ont montré l'interdépendance des capacités de raisonnement avec les performances de la MDT au cours du vieillissement. Ses résultats ont mis en évidence une diminution des capacités de raisonnement avec l'âge sur une cohorte de deux-cent-soixante-dix-huit sujets (19-96 ans). Cependant, ces diminutions s'atténuent nettement (tout en restant significative) lorsque les capacités individuelles de MDT étaient utilisées en tant que variable contrôle. Ces résultats sont cohérents avec des travaux encore antérieurs de Salthouse (1992) qui avait déjà posé l'hypothèse selon laquelle la MDT jouerait un rôle central dans la chute des capacités de raisonnement avec l'âge. L'hypothèse se basait sur trois constats : la réduction des différences liées à l'âge lorsque la MDT est prise en compte en tant que variable contrôle ; la meilleure préservation des informations en mémoire pendant le processus de raisonnement chez les sujets jeunes ; la similarité des performances de raisonnement entre jeunes et adultes lorsque les jeunes effectuent en plus une tâche parallèle chargeant la MDT. De Neys (2009) a montré que les capacités de raisonnement pouvaient également être liées à celles de l'inhibition. Selon son étude, les performances de raisonnement à une tâche de résolution de syllogismes évoluaient au cours de la vie selon une courbe curvilinéaire. Il a comparé trois groupes de sujets (12, 20 et 65 ans et plus) et a observé une augmentation initiale des capacités de raisonnement entre 12 et 20 ans puis une diminution nette pour le groupe âgé. Cette diminution ne s'observait que lorsque les syllogismes étaient conflictuels, c'est-à-dire lorsque la conclusion était plausible et compatible avec les connaissances générales, pouvant ainsi biaiser le raisonnement. Par exemple, dans le syllogisme : « toutes les choses qui ont un moteur ont besoin d'huile. Les voitures ont besoin d'huile. Les voitures ont un moteur ». La conclusion est invalide sur le plan logique et pourtant elle est plausible sur le plan des connaissances générales. Selon De Neys, la résolution de ce type de syllogisme implique l'inhibition de croyances bien acquises. De ce fait, le groupe âgé ne présente donc pas seulement des déficits de raisonnement mais aussi une diminution de leur capacité à inhiber leurs croyances. Au niveau cérébral, Goel & Dolan (2003) ont montré que le CPFVM (engagé dans les processus affectifs) semble sous-tendre les erreurs de raisonnement déductif générées par ce type de croyances.

Une étude de Treitz (2007) a montré que le raisonnement était plutôt bien préservé dans un groupe de plus de soixante ans. Il apparaît par ailleurs que cette habileté est également

influencée par le niveau d'éducation. Une étude longitudinale accélérée (*growth curve*) de Tucker-Drob (2009) réalisée avec six-cent-quatre-vingt-dix sujets (65 à 89 ans), suggère qu'une meilleure réserve cognitive (dépendante des connaissances déclaratives et du nombre d'années de scolarisation) favorise des capacités de raisonnement supérieures à un âge avancé. En revanche, cette réserve n'a pas d'influence sur la vitesse du déclin cognitif. En d'autres termes, les meilleures performances à un âge avancé, attribuables à l'augmentation du nombre d'années d'éducation, sont la manifestation de la persistance de capacités cognitives déjà supérieures dans le passé, et non pas celle d'un effet neuroprotecteur de l'éducation, qui ralentirait le déclin.

Du fait qu'elles ne sont pas basées sur un matériel langagier, les connaissances déclaratives influent très peu ou pas du tout sur le *progressive matrice* de Raven. Salthouse (1996) a montré que les performances obtenues à ce test chutaient significativement au cours de l'âge. Cependant, l'introduction de la vitesse de traitement, propre à chaque individu en variable contrôle, réduisait fortement cette chute. Selon l'auteur, le déclin des capacités de raisonnement au cours du vieillissement est au moins en partie explicable par une chute de la rapidité du traitement cognitif.

III.5. Vitesse de traitement et vieillissement normal

Le vieillissement cognitif s'accompagne également d'un ralentissement général de la vitesse de traitement. L'allongement des temps de réaction, en lien avec l'efficacité cognitive, est un phénomène étudié depuis les toutes premières études ayant trait à la cognition. James Birren et Jack Botwinick (1955) avaient noté que le ralentissement cognitif n'est pas simplement consécutif à une diminution des capacités perceptives ou sensorielles, mais qu'un effet d'ordre plus général infléchit à la baisse la vitesse de traitement des individus âgés. Dans leur expérimentation, les participants devaient comparer la longueur de deux lignes (déterminer la plus courte) le plus rapidement possible. Les différences de longueur allaient de 1 à 50%. Bien que les différences de temps de traitement entre les jeunes et les âgés étaient plus importantes pour les lignes différentes de seulement 1% de leur longueur (+0.47 sec), les sujets âgés continuaient d'être significativement plus lents (+0.18 sec) pour les lignes différentes de 50% de leur longueur. Ces résultats laissent transparaître la contribution de difficultés perceptives au rallongement des temps de traitement entre les jeunes et les âgés puisque la différence de rapidité de traitement était réduite pour les lignes de longueurs bien distinctes. Cependant, ces données mettent

également en avant l'existence d'un ralentissement résiduel, non lié aux traitements sensoriels de bas niveau puisqu'un rallongement résiduel du traitement reste observé pour les lignes bien distinctes chez les sujets âgés. Par ailleurs, les auteurs considèrent que ce ralentissement est péjoratif au fonctionnement cognitif. Dès lors, le ralentissement devient une variable indépendante ou causale et non plus une variable dépendante, symptôme de la diminution de diverses capacités cognitives. Selon Salthouse (1991), les premières hypothèses visant à considérer la vitesse de traitement comme une variable causale s'appuyaient sur l'argument suivant : la qualité de l'intelligence dépend du nombre de connexions mais aussi de la vitesse à laquelle ces connexions s'effectuent. Les centres nerveux (ex : aires associatives) ne peuvent demeurer excités indéfiniment à leur intensité maximale. Ainsi, une personne dont les connexions nerveuses s'établissent lentement verra le premier centre nerveux excité se désactiver avant que le dernier centre du réseau concerné ne soit excité à son tour, ce qui limitera le nombre de centres nerveux coopérant en même temps. Inversement, une personne formant rapidement des connexions entre les différents centres disposera d'un plus grand nombre de centres nerveux coopérant à la fois. La rapidité à laquelle les liaisons s'effectuent étant fonction de la vitesse à laquelle l'influx nerveux circule de centre en centre au travers des synapses (Lemmon, 1927). Selon Travis et Hunter (1928), une propagation rapide de l'influx nerveux dans un grand nombre de systèmes associatifs est probablement la base neurophysiologique d'une réponse intelligente à une situation complexe.

Une réduction de la vitesse avec laquelle différentes opérations cognitives peuvent être réalisées est suspectée comme étant un facteur très important du déclin cognitif observé au cours du vieillissement (Salthouse, 1980). En compatibilité complète avec les explications neurophysiologiques précédentes, Salthouse (1996) postule l'existence de deux mécanismes responsables de la relation entre vitesse de traitement et capacité cognitive.

- Le *mécanisme de temps limité* : il intervient dans la mesure où les opérations cognitives sont exécutées trop lentement pour être réalisées correctement dans le temps imparti ;
- Le *mécanisme de simultanéité* : il proviendrait du fait que des opérations trop lentes réduisent la quantité d'informations disponibles pour effectuer des traitements de haut niveau.

Ces hypothèses sont également appuyées par l'atténuation très importante des effets de l'âge sur les performances cognitives consécutives au contrôle de la vitesse de traitement. Il est clairement établi que la vitesse de traitement module les autres capacités cognitives comme par exemple la mémoire (Salthouse & Coon, 1993) ou les habiletés spatiales (Finkel, Reynolds,

McArdle, & Pedersen, 2007). Les modulation de la vitesse de traitement semblent être dues notamment à une dégradation de la substance blanche des régions antérieures du cerveau (Kennedy & Raz, 2009) et sont par ailleurs suspectées d'être liées à des sources de variation génétiques (Finkel, Reynolds, McArdle, & Pedersen, 2005).

IV. FE et aéronautique

Bien que ne focalisant pas spécifiquement sur les FE, l'étude des fonctions cognitives et leur mise en lien avec la performance de pilotage intéresse depuis de nombreuses années les chercheurs du domaine aéronautique. Différentes fonctions cognitives identifiées comme étant cruciales au pilotage ont été mises à jour. On peut citer par exemple les capacités d'allocation et de partage des ressources (Tsang & Shaner, 1998), l'attention (Knapp & Johnson, 1996), la résolution de problème (O'Hare, Wiggins, Batt, & Morrison, 1994) ou encore le raisonnement déductif (Wiggins & O'Hare, 1995). Les différentes études réalisées ont abouties à la définition de batterie de tests évaluant un très grand panel d'habiletés cognitives, telles que *Cogscreen-AE* (Horst & Kay, 1991) ou le *Wombat*¹⁴. La batterie *Cogscreen-AE* figure parmi les plus utilisées. Son développement a été sponsorisé par la FAA. Il témoigne de la reconnaissance par cette dernière de la nécessité d'évaluer l'état cognitif des pilotes licenciés, en particulier les pilotes âgés (Banich, Elledge, & Stokes, 1989). Cette batterie était initialement développée pour mesurer les processus perceptifs et cognitifs associés au pilotage et fournir un outil offrant une bonne détection des troubles neurologiques ou psychiatriques des pilotes afin de procéder, le cas échéant, à leur reclassement. Elle comporte des tests neuropsychologiques semblables à ceux employés en pratique clinique. Par exemple un test d'empan envers (*Backward Digit Span*), un test visuo-attentionnel où des séries de lettres et de mots présentées brièvement et simultanément doivent être comparés (*Visual Sequence Comparison*), un test de rotation mentale dans lequel la forme correspondante à celle présentée initialement doit être reconnue (*Manikin*), ou encore deux tests très proches de ceux du WCST (*Shifting Attention*) et du *Trail Making Test (Pathfinder)*. Les premières recherches ont montré que cette batterie dissociait avec fiabilité les individus cognitivement intacts des individus ayant des troubles neurologiques (Kay, 1995). Par la suite, des études ont été menées dans le but de mettre en lien des variations plus subtiles des

¹⁴ Le test du WOMBAT a été développé dans l'objectif d'évaluer la capacité à rechercher les informations pertinentes et maintenir une bonne performance en dépit du stress. (O'Hare, 1997).

performances cognitives avec celles de pilotage. Ainsi Yakimovich et collaborateurs (1994) ont corrélé les déviations à la trajectoire optimale (obtenues grâce aux boîtes noires) de pilotes de ligne russes avec certains indices mesurés par la batterie *Cogscreen-AE*. Ces déviations à la trajectoire optimale sont considérées comme étant un indicateur intéressant de la performance de pilotage.

Hardy et Parasuraman (1997) ont développé un modèle qui prend en compte les savoirs domaine-dépendants (ex : habiletés procédurales) mais aussi les savoirs domaine-indépendants (ex : fonctions cognitives). Ce modèle inclut également des facteurs susceptibles d'influencer la performance de pilotage, tels que la personnalité (Harss, Kastner, & Beerman, 1991; Hormann & Maschke, 1996; Siem & Murray, 1997) ou les différents stressseurs (Froom, Caine, Shochat, & Ribak, 1993; Reardon, Smythe, Omer, Helms, & Estrada, 1997; Sloan & Cooper, 1986). Ce modèle descriptif tente de rendre compte de façon exhaustive des différents facteurs modulant la performance de pilotage. Il établit également des liens dynamiques entre ces derniers. Ainsi la personnalité peut venir influencer la gestion des stressseurs, ce qui module en retour les performances en termes de savoir domaine-indépendant, puis impacte enfin sur la performance de pilotage. Ce modèle considère que le stress n'a qu'une influence limitée sur la performance de pilotage, en revanche, le stress vient également moduler la performance via son effet sur le fonctionnement cognitif, habileté domaine-indépendant (Fig. 30).

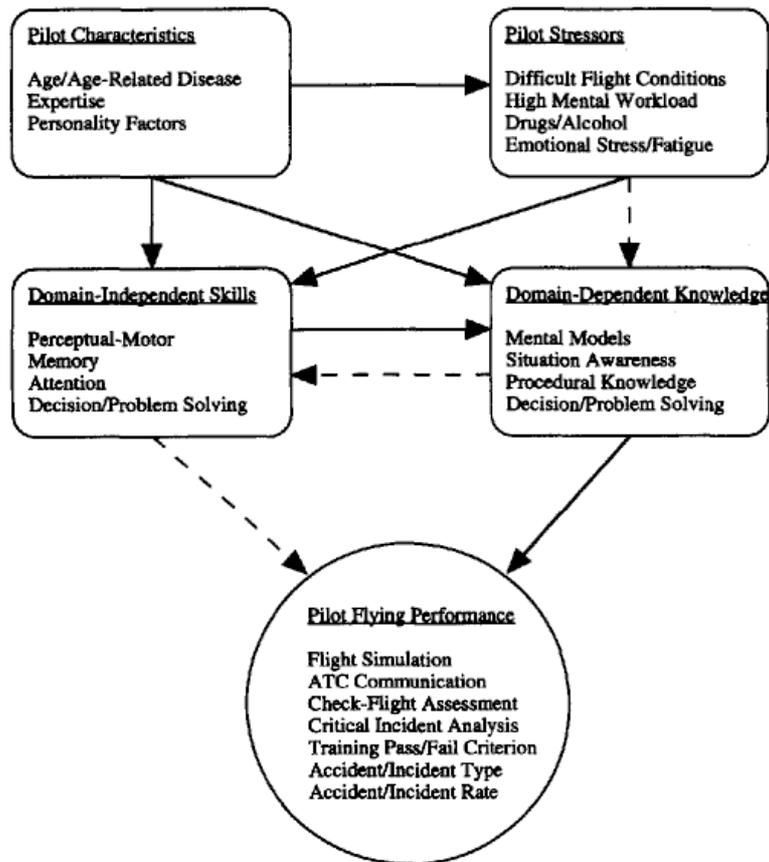


Fig. 30 : Modèle de la performance du pilote tiré de Hardy et Parasuraman (1997). Une flèche implique un facteur causal ou une corrélation. Une ligne en pointillé signifie que la relation entre les deux éléments est faible.

IV.1. Emotion, FE et pilotage

Le rôle du stress sur la performance de pilotage est un thème classique en aéronautique (Roscoe, 1978; Sloan & Cooper, 1986; Stokes & Kite, 1994). Les relations entre stress, focalisation attentionnelle et dégradation de la performance sont désormais reconnues (Flin, Strub, Salas & Martin, 1997). Des travaux de recherche en simulateur de vol menés sur la base d'analyses d'événements aériens ont montré que l'apparition de conflits dans la gestion du vol (ex : conflits pilote/copilote, pilote/pilote automatique..), générateurs de stress, provoquent des troubles du comportement proches du syndrome dysexécutif (cf. partie I, chapitre II). Dans le domaine aéronautique, les études abordent souvent la question de la charge de travail sans employer spécifiquement le terme de stress. Elles abordent encore plus rarement le concept de l'émotion. Ainsi, des recherches intégrant des enregistrements psychophysologiques sont réalisées dans le but de déterminer les phases de vol les plus complexes (Veltman & Gaillard, 1996), génératrices

d'une forte « demande mentale » (Wilson, 2002). Lee (2003) a par exemple montré que la mesure du rythme cardiaque était un indicateur fiable de la demande mentale et du niveau de stress ressenti lors du pilotage d'un simulateur de Boeing 747-400. En effet, durant le décollage et l'atterrissage, le rythme cardiaque était significativement plus élevé par rapport à toutes les autres phases de vol, par exemple la phase de croisière, réputée plus calme (Fig. 31).

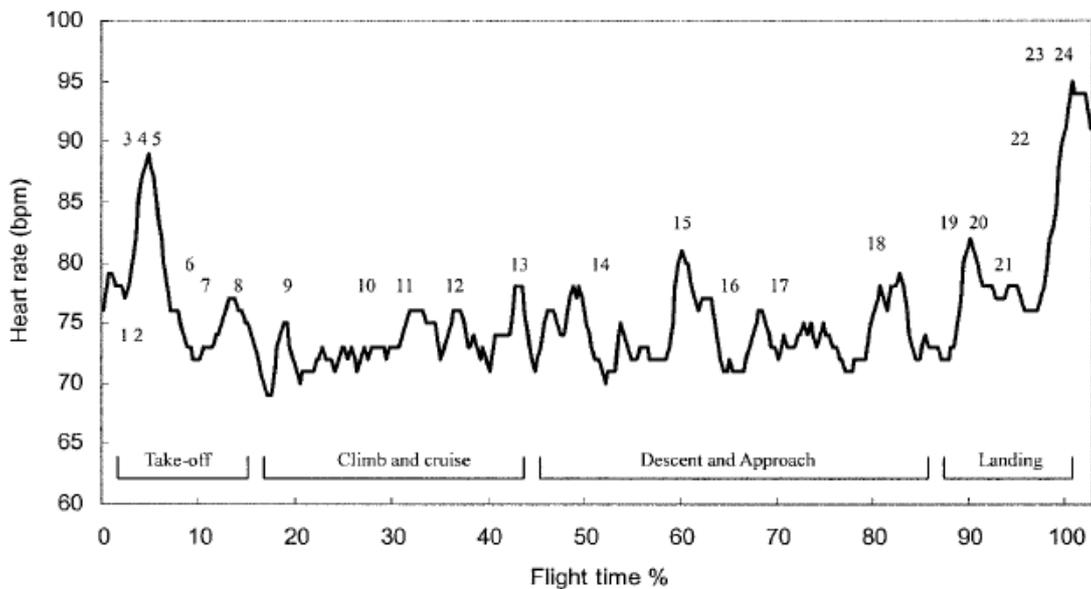


Fig. 31 : Illustration du rythme cardiaque pour un pilote durant les quatre différentes phases de vol : décollage, montée/croisière, descente/approche et atterrissage.

Les auteurs de cette étude insistent sur l'importance d'améliorer la gestion du stress chez les pilotes. A l'instar du domaine militaire (Delahaij, Gaillard, & Soeters, 2006), des méthodes sont employées afin de mieux en gérer les effets néfastes (Campbell & O'Connor, 2009). Parmi les moyens disponibles, l'entraînement CRM (*Crew Resource Management*), gestion des ressources de l'équipage, est très important. Ces formations CRM ont été initialement développées pour aider l'équipage à mieux communiquer et éviter les conflits entre le commandant de bord, son copilote et le contrôleur aérien. En effet, ces conflits ont été à l'origine de nombreuses catastrophes aériennes. La réactualisation de cette formation (Byrnes & Black, 1993), puis la cinquième génération de CRM, aborde clairement la question des effets délétères des stressseurs, comme la fatigue ou la surcharge mentale, sur la performance de pilotage (Helmreich, 1997) et vise notamment à sensibiliser les pilotes à cette problématique. Selon Helmreich (1999), une grande partie des pilotes considère encore à tort que leur capacité à prendre des décisions reste parfaite, même en cas de situation d'urgence et de stress. Selon l'auteur ce sentiment d'invulnérabilité est une composante négative de la culture aéronautique que le CRM permettrait

de réduire en montrant que le stress peut affecter la performance de tout individu, favorisant ainsi des attitudes plus prudentes et réalistes. Dans un registre proche, des travaux récents de Fornette (2007) et de Lefrançois (2009) ont montré l'effet positif d'un autre type de formation. Cette dernière conduit les participants à modifier leur manière de traiter l'information par la gestion des modes mentaux (Fradin & Aalberse, 2008). Les résultats indiquent que le niveau de stress et la performance des élèves-pilotes de l'armée de l'air s'améliore.

L'ergonomie classique s'intéresse également depuis peu au rôle de l'émotion sur l'efficacité de l'homme au travail (Grosjean & Ribert-Van De Weerd, 2005). En aéronautique, les études portant sur le sujet sont extrêmement rares. On peut cependant citer Brown et Moren (2003) qui ont mis en évidence le rôle de la honte chez les pilotes devant prendre une décision importante. Orasanu (2001) a également mis en évidence l'impact des pressions exercées par certaines compagnies sur les prises de décision, notamment lors des phases d'approche et d'atterrissage.

IV.2. Vieillesse, FE et pilotage

Plusieurs études ont souligné les effets de l'âge sur la performance de pilotage (Booze Jr, 1977; Harkey, 1996; Kay et al., 1994; Kay, 2001; Taylor, Kennedy, Noda, & Yesavage, 2007; Yesavage et al., 1999) et sur la capacité à s'adapter aux nouvelles générations d'aéronefs (Pelegri, Maho, & Amalberti, 1995). Cependant, ces résultats sont souvent décriés. Par exemple, Kay (2001) concède qu'il existe un effet des groupes d'âge sur la performance de pilotage, mais a montré que des pilotes de plus de soixante ans ne présentaient pas le pattern de dégradations cognitives attendu et que certains sujets âgés avaient de meilleures performances de pilotage que certains sujets jeunes. D'autres auteurs remettent en question la réalité même des effets délétères de l'âge (Li et al., 2003; Li, Baker, Lamb, Grabowski, & Rebok, 2002) sur l'aptitude à piloter au moins jusqu'à soixante-cinq ans, considérant notamment que l'expérience acquise joue un rôle bénéfique et compensateur.

Afin de mieux cerner les effets de l'âge sur le pilotage, un grand nombre d'études ont été menées pour évaluer les modifications cognitives au cours du vieillissement. Ainsi, Taylor et collaborateurs (2007; 2000) ou encore Yesavage et collaborateurs (1994), ont mis en évidence un déclin des habiletés psychomotrices, de la MDT ou de la résolution de problèmes chez les pilotes plus âgés. D'autres études pointent également une diminution des capacités attentionnelles

(Tsang & Shaner, 1995), des capacités d'allocation et de partage des ressources (Tsang & Shaner, 1998), de la vitesse de traitement (Hardy et al., 1998) ou encore de l'inhibition (Hardy, Satz, D Elia, & Uchiyama, 2007). La batterie *Cogsreen-AE* est couramment employée dans le domaine du vieillissement chez les pilotes. Une étude de Taylor et al. (2000) a montré que l'agrégation de quatre prédictors de *Cogsreen-AE* en un seul (vitesse de traitement/MDT, mémoire visuelle et coordination motrice/suivi de cible) permettait de prédire 45% de la variance de la performance de pilotage sur simulateur. Ces résultats ont été obtenus sur une cohorte de cent pilotes âgés de cinquante à soixante-neuf ans. Par ailleurs, l'âge de ces derniers permettait d'améliorer la significativité des quatre prédictors lorsqu'il était introduit en co-variable. D'autres études ont montré l'efficacité de cette batterie à prédire la capacité de pilotes à suivre les instructions du contrôle aérien. Taylor et collaborateurs (2005) ont mis en évidence une corrélation très forte entre les capacités de MDT et l'habileté à réaliser des communications radio ou à spécifier des fréquences radio pour entrer en communication avec les contrôleurs. Par ailleurs, il a été largement démontré que l'âge et l'expérience modulent la demande en termes de MDT et la capacité à rappeler des textes liés à l'aviation (Morrow, Leirer, & Altieri, 1992) et des messages issus du contrôle aérien (Morrow, Menard et al., 2003; Morrow, Menard, Stine-Morrow, Teller, & Bryant, 2001; Morrow, Ridolfo et al., 2003) ou encore la capacité à les exécuter (Taylor et al., 2007).

En AG, où le taux d'accident est environ quatre-vingt-dix-fois supérieur à celui du transport aérien (Li, Baker, Qiang, Grabowski, & McCarthy, 2005), les effets du vieillissement sont une question particulièrement sensible. Nous l'avons vu, aucune limite d'âge n'est fixée. Pourtant, une étude de Li (2005) portant sur une base de données de plus de trois-cent-mille pilotes de l'AG, a montré que le risque d'accident progresse dès l'âge de trente-cinq ans chez les populations possédant peu d'expérience. Une autre étude de Taylor (2007) s'est attachée à étudier spécifiquement les effets du vieillissement sur la population de pilotes de l'AG tout en tenant compte de l'expérience. Contrairement aux études trans-sectionnelles classiques, cette recherche longitudinale a permis de suivre une cohorte de cent-dix-huit pilotes (40-69 ans) sur trois ans afin d'observer les effets du vieillissement au sein d'une même population. La mesure de la performance était basée sur la communication avec le contrôle aérien, l'évitement du trafic des autres aéronefs, le *monitoring* des instruments du cockpit, la réalisation d'un atterrissage ainsi qu'un score composite sommant toutes ces variables. Les résultats ont montré que les pilotes ayant la plus grande expertise, définie selon le niveau de qualification (VFR¹⁵, IFR¹⁶ Instructeur...),

¹⁵ *Visual Flight Rules*, qualification pour piloter à vue sans les instruments, ce qui nécessite notamment des conditions météorologiques correctes.

réalisaient un meilleur score composite que ceux moins expérimentés. Des analyses plus poussées ont montré que le déclin des performances s'observait particulièrement au niveau de la capacité à réaliser des communications. Les pilotes les plus expérimentés présentaient un déclin moins rapide des performances au cours des trois années de l'étude. Cependant, en contradiction avec certaines recherches (Morrow, Leirer, Altieri, & Fitzsimmons, 1994; Morrow, Ridolfo et al., 2003; Tsang & Shaner, 1998), mais en accord avec d'autres (Morrow, Ridolfo et al., 2003; Taylor et al., 2005), l'expertise ne s'est pas avérée être protectrice des effets de l'âge. Les auteurs avancent que le nombre de participants présentant un âge et un niveau d'expertise extrême était trop faible pour permettre une puissance statistique suffisante (par exemple respectivement seulement cinq et six pilotes qualifiés VFR étaient présents dans les groupes 40-49 et 60-69), ce qui aurait permis un design en groupes extrêmes (McClelland & Judd, 1993). Pour finir, un résultat surprenant a montré que, même si au départ, les pilotes âgés montraient des performances inférieures aux jeunes, le déclin de leur performance était inférieur à ceux des jeunes au cours du temps. Plus étonnant encore, les pilotes les plus âgés s'amélioraient (excepté les pilotes les moins expérimentés). Les auteurs avancent plusieurs explications. Les pilotes les plus âgés atteindraient un niveau plancher, au-delà duquel les performances se dégradent moins. Ils auraient également bénéficié de l'entraînement en acquérant des stratégies de recherches visuelles et de *Switching* de tâche.

V. Conclusion

Les FE recouvrent des habiletés cognitives aussi diverses que le raisonnement (Decker et al., 2007), le *contrôle exécutif* (Posner et al., 2006), la flexibilité mentale (Spreeen et al., 1995), la prise de décision (Sanfey et al., 2003), la planification (Koechlin et al., 2000), la structuration temporelle des actions (Fuster, 2000) ou la régulation émotionnelle (Fernandez-Duque et al., 2000; Gyurak et al., 2009; Philippot et al., 2006). Elles sont au cœur de la cognition de haut niveau mais n'en demeurent pas moins extrêmement sensibles. Elles sont particulièrement vulnérables aux effets de l'émotion, du stress (Porcelli et al., 2008; Qin et al., 2009; Scholz et al., 2009; Waldstein & Katzel, 2005) et de l'anxiété (Airaksinen et al., 2005; Castaneda et al., 2008; Egloff & Hock, 2001), qui peuvent venir altérer temporairement leur fonctionnement au point de conduire des individus à avoir un comportement proche de celui de patients cérébrolésés. D'autre part, ce sont les

¹⁶ *Instrument Flight Rules*, qualification pour piloter aux instruments.

habiletés les plus précocement impactées par les effets irréversibles du vieillissement (Raz, 2000). En effet, la mémoire (Gregoire & Van Der Linden, 1997; Orsini et al., 1986; Verhaeghen, 1993), le *set-shifting* (Voir Rhodes 2004 pour revue), l'inhibition (Bruyer et al., 1995; Houx et al., 1993; West & Baylis, 1998), la MAJ (Van der Linden et al., 1994) ou encore le raisonnement (De Neys & Van Gelder, 2009) subissent clairement les effets néfastes de l'âge.

L'activité de pilotage prend place au sein d'un environnement complexe, changeant et dynamique où de nombreuses informations doivent être intégrées en continu. Elle sollicite de fait très fortement les fonctions cognitives de haut niveau, et particulièrement les FE. Les acteurs de la sécurité aéronautique, en particulier les spécialistes des FH, ont pris conscience depuis de nombreuses années de l'importance d'évaluer certains aspects du fonctionnement cognitif (Braune & Wickens, 1984; Gerathewohl, 1977, 1978, 1978; Imhoff & Levine, 1981; North & Gopher, 1976). Plus récemment, sous l'impulsion de la FAA, les études ont permis de développer des batteries d'évaluation cognitive complètes, telles que Cogscreen-AE (Horst & Kay, 1991). Ces batteries sont capables d'évaluer l'état neurologique des pilotes (Kay, 1995) et de mettre en lien cet état avec la performance de pilotage chez le sujet vieillissant (Yakimovich et al., 1994), thème très sensible en AG, où la population ne cesse de vieillir (BEA, 2008). Cependant, dans ce domaine, les résultats demeurent encore contradictoires (Li et al., 2003; Li et al., 2002). Le rôle protecteur de l'expérience de pilotage n'est pas toujours considéré et le lien entre état cognitif et activité de pilotage n'est que rarement exploré au sein d'une même recherche, sur une même population. De plus, les études s'intéressent souvent à d'autres aspects connexes de la sécurité comme la gestion des communications (Morrow, Menard et al., 2003; Morrow et al., 2001; Morrow, Ridolfo et al., 2003) et focalisent peu sur l'AG. Par ailleurs, les FE ne font pas l'objet d'une d'évaluation systématique, les batteries d'évaluation sont généralement très généralistes et négligent cet aspect. Pourtant, ce sont ces fonctions qui sont sollicitées au premier chef en cas de problème, afin de raisonner, s'adapter et trouver des solutions rapidement. Il est d'autant plus troublant qu'elles ne soient pas davantage examinées, du fait que ce sont les fonctions les plus vulnérables aux effets de l'émotion ou de l'âge.

Les thèmes du stress, et dans une moindre mesure de l'émotion, sont connus en aéronautique. Leur impact sur la sécurité est désormais bien établi (Orasanu et al., 2001). Certains moyens comme les formations CRM sont mis en œuvre pour tenter de réduire leurs effets. Cependant comme le souligne Campbell (2009), il existe un réel besoin de développer des méthodes standardisées pour mesurer et traiter le stress afin d'améliorer la performance humaine en aviation. En effet, il n'existe pas d'étude qui tente de comprendre véritablement les effets du stress et de l'émotion sur le cerveau durant l'activité de pilotage et encore moins

d'étude qui vise à corriger ces effets en ligne. Le facteur émotionnel n'est d'ailleurs que très rarement abordé, pourtant des outils existent désormais pour en comprendre précisément les effets. La neuroéconomie fournit les moyens de recréer certaines pressions émotionnelles existantes dans la vie réelle (ex : pressions de la compagnie), via des enjeux monétaires, et rend possible l'observation de leur impact sur l'engagement de certains réseaux cérébraux au cours des processus de prise de décision.

Nous nous proposons de présenter les résultats expérimentaux issus de l'approche neuroergonomique que nous avons abordée dans la deuxième partie de cette thèse. Dans un premier temps, nous avons focalisé sur l'évaluation neuropsychologique du fonctionnement exécutif d'une population de pilotes de l'AG, afin de tenter de la mettre en lien avec la performance de pilotage. Ensuite, la question de l'émotion et de son impact sur la prise de décision au cours de la phase d'atterrissage sera abordée. Le protocole IRMf mis au point en s'inspirant d'études en neuroéconomie sera détaillé et les résultats préliminaires seront évoqués. Les données issues de cette même étude, répliquées hors IRMf, avec des mesures psychophysiologiques (ECG, RED, Eye tracking) seront également exposées. Pour finir, la présentation du travail d'opérationnalisation en vol réel de mesures oculométriques (*Eye tracking*) conclura cette partie expérimentale. La discussion générale des résultats viendra ensuite clore ce manuscrit.

2^e Partie :

Résultats expérimentaux

Good medicine does not consist in the indiscriminate application of laboratory examinations to a patient, but rather in having so clear a comprehension of the probabilities and possibilities of a case as to know what tests may be expected to give information of value (Francis Peabody, 1922).

Chapitre 1.

Performances de pilotage et vieillissement normal

I. Résumé

Contexte : Le pilotage prend place au sein d'un environnement changeant et dynamique où de nombreuses informations nouvelles doivent être intégrées et mises à jour en continu. Selon nous, il repose nécessairement sur le fonctionnement des FE. Le vieillissement des pilotes de l'AG et la difficulté à estimer son impact sur la sécurité aéronautique, pose la question d'évaluer spécifiquement les FE, fonctions cognitives réputées parmi les plus sensibles aux effets de l'âge.

Méthodes : 24 pilotes issus de l'AG ont participé à l'expérimentation. Ils ont passé une batterie de tests neuropsychologiques afin de mesurer les effets du vieillissement sur un grand panel de FE : la MAJ en MDT, le *set-shifting*, l'inhibition, l'estimation des durées et la planification. Le raisonnement, la vitesse psychomotrice et certaines caractéristiques comme la personnalité ou l'expérience ont également été examinées. La performance de pilotage était dérivée de deux indices : l'écart par rapport à la trajectoire optimale définie par le plan de vol et la qualité d'une prise de décision liée aux conditions météorologiques.

Résultats : L'évaluation neuropsychologique a mis en évidence les effets de l'âge sur la MAJ en MDT, la rapidité psychomotrice et l'inhibition. Dans une moindre mesure, l'âge impactait également sur le *set-shifting*. Les capacités de raisonnement, de MAJ en MDT et l'expérience de vol étaient prédictives de l'amplitude de l'écart de trajectoire. De plus, la pertinence de la prise de décision, liée aux conditions météorologiques, pouvait être prédite par les capacités de MAJ en MDT, l'expérience de pilotage ainsi que par le niveau d'impulsivité.

Discussion : Les résultats témoignent de la réalité des effets subtils et précoces du vieillissement sur les FE chez une population de pilotes de loisirs présentant pourtant un haut niveau de scolarisation. Contrairement à « l'âge chronologique », « l'âge cognitif », dérivé de l'évaluation des FE, s'est avéré être un prédicteur pertinent des performances de pilotage et de la prise de décision.

II. Introduction

L'activité de pilotage prend place au sein d'un environnement changeant et dynamique où de nombreuses informations doivent être intégrées et mises à jour en continu. Piloter un appareil léger, dénué de tout automatisme et sans autopilote, implique la surveillance des paramètres moteur, la gestion des communications avec la tour, la planification de la navigation, une bonne conscience de la situation, l'adaptation aux changements environnementaux, la prise de décisions pertinentes en inhibant les réponses désormais non valides et l'anticipation constante des évolutions de l'environnement, tout ceci en pilotant l'appareil. Toutes ces activités inhérentes au pilotage impliquent nécessairement une forte sollicitation des FE, capacités intellectuelles de haut niveau qui sous-tendent les comportements orientés vers un but et l'adaptation aux situations nouvelles et complexes (Elliott, 2003; Royall et al., 2002). Ces FE sont par ailleurs particulièrement sollicitées en cas de situation dégradée, non routinière et potentiellement dangereuse. La proportion de pilotes vieillissant en AG, où aucune limite d'âge n'est définie, devient telle que la sélection de tests appropriés évaluant les FE devient un point critique de l'amélioration de la sécurité. En effet, les FE sont les capacités intellectuelles les plus vulnérables aux effets de l'âge chez l'humain et semblent, de fait, de bons indices candidats, pour prédire la performance de pilotage. La prise en compte de leur fonctionnement est indispensable, la simple considération de l'âge réel (« âge chronologique ») du pilote paraît bien insuffisante, ne serait-ce qu'en regard à la variabilité interindividuelle de l'impact du vieillissement sur les performances intellectuelles (Buckner, 2004; Schroeder et al., 1999). Certes, l'expérience protège dans une certaine mesure contre les effets du vieillissement, en fournissant des patterns de réactions appropriés aux situations rencontrées, mais en cas d'événements inattendus, il est probable qu'aucun schéma d'action connu et maîtrisé ne soit disponible : dans ces cas précis, un fonctionnement exécutif performant est essentiel. Le but de cette étude est d'observer, sur une population de pilotes de l'AG, l'impact de l'âge sur les FE et son influence sur la performance de pilotage sur un simulateur de vol. Une littérature importante s'intéresse à l'examen de l'état cognitif de pilotes, via des batteries d'évaluation telles que Cogscreen-AE ou le Wombat. Cependant, peu de recherches tentent de relier ces performances cognitives à celles obtenues sur simulateur de vol. La plupart des études portent plutôt leur attention sur des aspects de la sécurité tels que les communications (Morrow, Menard et al., 2003; Morrow et al., 2001; Morrow, Ridolfo et al., 2003), ou la prise de décision au moment de l'atterrissage (Wiggins & O'Hare, 1995), mais sur des situations de pilotage très simplifiées. De plus, l'immense majorité des recherches se focalisent

sur l'AC. L'expérimentation que nous proposons s'inspire des méthodes employées par Taylor (2000) qui tente d'établir un lien direct entre état cognitif et performance de pilotage sur avion de ligne. Cependant, contrairement à Taylor qui emploie Cogscreen-AE, une batterie de tests généraliste en termes de fonctions cognitives explorées, nous nous proposons de nous concentrer fortement sur les composantes exécutives du système cognitif. Le scénario de vol proposé requiert l'utilisation du système de radionavigation afin de passer par différents points géographiques et est enrichi d'un certain nombre de tâches secondaires (détection de panne, calcul de vitesse etc.), ceci afin de se rapprocher autant que possible de la demande mentale générée par un vol réel. Par ailleurs, nous avons également tenté d'établir un lien entre le fonctionnement exécutif et la qualité d'une prise de décision liée aux conditions météorologiques. Le protocole expérimental vise à répondre à deux objectifs principaux :

- Evaluer l'impact de l'âge sur le fonctionnement exécutif de pilotes de l'AG ;
- Déterminer les facteurs les plus prédictifs de la performance de pilotage sur simulateur, notamment entre « âge chronologique » et « âge cognitif », tout en contrôlant des caractéristiques telles que l'expérience de pilotage ou certains traits de personnalité.

III. Méthodes

III.1. Participants

Vingt quatre pilotes privés (43.3 ± 13.6), qualifiés pour le vol VFR¹⁷, ont participé à l'expérimentation. Les critères d'inclusion définis supposaient la participation d'hommes droitiers (la latéralité était évaluée par l'Edinburgh Inventory d'Oldfield (1971)), de langue française et de niveau baccalauréat minimum. Ils devaient être âgés de dix huit ans au moins et soixante dix ans au plus. Les critères d'exclusion supposaient qu'aucun participant ne devait avoir de trouble sensoriel, neurologique et/ou psychiatrique et/ou être sous l'influence d'une substance capable de modifier le fonctionnement du système nerveux central. Par ailleurs, les participants ne devaient en aucun cas être experts dans le domaine de la logique afin de ne pas biaiser les résultats de la tâche de raisonnement. Tous ces paramètres étaient vérifiés au cours d'un

¹⁷ Visual Flight Rules, qualification pour piloter à vue sans les instruments, ce qui nécessite notamment des conditions météorologiques correctes pour pouvoir voler.

entretien précédant l'expérimentation proprement dite. Etant donné que l'expérience de vol peut modérer les effets du vieillissement sur le pilotage (Morrow et al., 2001), nous avons tenté d'obtenir une distribution équilibrée du niveau d'expérience en fonction de l'âge de nos participants lors du recrutement.

III.2. Scénario de vol

III.2.1. Tâche de navigation

Afin de se familiariser avec le simulateur de vol (Microsoft Flight Simulator 2004, voir Fig. 32 pour illustration) et de minimiser les effets d'apprentissage, chaque participant réalisait une session d'entraînement. Un briefing sur le fonctionnement des organes de commandes (ex : contrôle du palonnier, des volets hypersustentateurs, du compensateur de profondeur¹⁸ etc.) et de l'interface de pilotage, était réalisé et suivi d'un vol d'essai (décollage, exercices de maniabilité, atterrissage). Différentes informations techniques relatives à l'appareil leur étaient également fournies. À la suite de cet entraînement, les participants recevaient les instructions concernant le vol à réaliser ainsi qu'une carte et un log de navigation (Fig. 33 et Tableau 4).

Le scénario de vol a été mis au point en collaboration avec des pilotes instructeurs, de manière à se rapprocher d'une situation la plus écologique possible. Il consistait en une tâche de navigation : décollage de l'aéroport de Montauban (LFBD, piste 32 en service) pour relier la balise VOR TOU (fréquence 117.70) à une altitude de 3000 pieds et se poser ensuite sur l'aéroport de Franczal (LFBF, piste 12 en service). Les participants devaient voler dans des conditions dites « d'auto-information » en l'absence de contrôle aérien : ils disposaient d'un bulletin d'information automatique sur les aérodromes de départ et d'arrivée (ex : pression barométrique du jour).

Afin de rendre le pilotage plus complexe, des tâches secondaires devaient être réalisées en parallèle de l'activité de pilotage. Ces tâches secondaires consistaient à utiliser convenablement les volets hypersustentateurs (en position 1 lors du décollage, en position 2 lors de l'éventuel atterrissage), à réussir un calcul de vitesse réelle (en utilisant le chronomètre embarqué dans

¹⁸ Système aérodynamique ou mécanique qui permet de contrôler l'appareil sur l'axe de tangage (réglage en piqué ou en cabré).

l'appareil) et enfin, à percevoir puis à signaler une panne du conservateur de cap. Les pilotes étaient informés avant le vol qu'une telle panne pouvait survenir, cette dernière se produisait sept minutes après le décollage, ensuite, les pilotes devaient recourir au compas magnétique, qui présente la caractéristique d'être complexe à utiliser car anti-directionnel (*i.e.* sens de rotation inverse de celui du conservateur de cap).

Le scénario de vol durait approximativement quarante-cinq minutes et la performance de pilotage était mesurée uniquement par la capacité à conserver la route calculée par l'écart entre le cap théorique et le cap du pilote sur la portion située entre l'axe reliant la piste de décollage et la balise VOR TOU. Cet écart par rapport au cap optimal, utilisé par exemple par Yakimovich et collaborateurs (1994), est un bon indice pour évaluer à la fois les performances primaires (psychomotrices) de tenue de la machine et celles liées à l'aptitude à naviguer, dépendante de fonctions cognitives de plus haut niveau (surveillance des paramètres de vol, utilisation de la radionavigation etc.).



Fig. 32 : Illustration de l'interface du simulateur de vol. L'appareil piloté durant l'expérimentation est un Cessna C172 skyhawk, avion léger très répandu dans l'AG.

TABLETTE ÉLECTRONIQUE

Log DE NAVIGATION

Distance : 29.9 mn

Durée du vol : 0:15

Points de cheminement	Route	Alt (pieds)	Cap	Distance	VS	Arrivée
				Étape	(kts)	
				29.9	Rée	ATE
Vor 1	-D->	3000	190	21.1	110	0:11
				8.8		
Piste d'atterrissage 12	-D->	535	163	8.8	120	0:04
				0.0		

Pas pour utilisation opérationnelle

Fig. 33 : Log de navigation mis à disposition des pilotes. Il précise notamment la durée et la distance à parcourir pour ce vol. Les caps de la balise et de la piste d'atterrissage sont également mentionnés. Les pilotes possédaient également une carte de la région concernée (non représentée ici) spécifiant la route à suivre.

Tableau 4 : Liste des caractéristiques techniques de l'appareil mise à disposition des pilotes avant le début de l'accomplissement du scénario de vol.

Vitesse de décrochage (volets rentrés)	48 nœuds
Vitesse de décrochage (volets sortis)	40 nœuds
Assiette de décollage	10°
Vitesse décollage	60 nœuds
Assiette de palier	0°
Régime de croisière	2400 Tours minutes
Vent traversier max	15 nœuds

III.2.2. La décision d'atterrir

En fin de parcours, une prise de décision devait être réalisée par le pilote en approchant de la piste d'atterrissage : il avait à déterminer si les conditions aérologiques fournies par le système d'information de Franczal permettaient d'atterrir ou devaient au contraire conduire à un déroutement. Ainsi, les pilotes évaluaient la composante du vent traversier en utilisant une formule couramment utilisée¹⁹. Le résultat du calcul dépassait de plus de six nœuds la vitesse autorisée pour leur appareil. La variable mesurée était la prise de décision, catégorisée comme

¹⁹ Vent traversier (en nœuds) = vent effectif (en nœuds) * sin(angle entre vent réel et axe de la piste).

correcte lorsque le pilote décidait de se dérouter avant le seuil de piste et erronée lorsqu'il poursuivait son approche jusqu'à ce dernier.

III.3. Tests neuropsychologiques

Afin de déterminer « l'âge cognitif » des participants et son impact sur la performance de pilotage, une batterie de tests évaluant une grande variété de FE leur a été soumise. Les capacités de raisonnement et la vitesse de traitement psychomoteur étaient également mesurées.

III.3.3. Poursuite de cible

Le test de la poursuite de cible fournit un bon indice de la rapidité psychomotrice (Loubinoux et al., 2005). Il est relativement proche de la tâche MOT de CANTAB. La tâche consiste à cliquer le plus rapidement possible avec la souris sur une cible apparaissant au hasard à l'écran (Fig. 34). La mesure de la performance est déterminée par un indice de vélocité qui tient compte de la loi de Fitts²⁰ (Fitts, 1954). Cet indice est le ratio moyen du logarithme en base dix de la distance en pixels entre deux cibles divisé par le temps en secondes pour aller d'une cible à la suivante.

²⁰ Très synthétiquement, la loi de Fitts stipule que le temps pour atteindre une cible est fonction de sa taille et de la distance à franchir pour atteindre cette dernière.



Fig. 34 : La tâche de poursuite de cible. Le participant doit cliquer le plus vite possible sur la cible rouge qui réapparaîtra ensuite aléatoirement à un autre endroit de l'écran.

III.3.4. Le test du n-back

Utilisé notamment dans les domaines de l'électrophysiologie et de la neuroimagerie (Owen, McMillan, Laird, & Bullmore, 2005; Smith & Jonides, 1997), le test du N-back vise à évaluer la MDT, en particulier ses composantes de MAJ et de stockage (Chen, Mitra, & Schlaghecken, 2008). Durant cette tâche, les participants observent un flux continu de stimuli et doivent déterminer si le stimulus actuellement présenté correspond, sur une dimension spécifique (ex : nom, forme...), au Nième stimulus en amont dans la séquence ($n > 0$), ou à un stimulus cible fixe ($n = 0$). Nous avons utilisé les $N = 0, 1$ et 2 et la caractéristique *forme* comme dimension de correspondance (Fig. 35). Pour la condition 0-back, le sujet devait simplement retenir un item durant toute la tâche (une flèche) et spécifier si l'item présenté correspondait à cette forme ou non. En termes de maintien d'information, le 0-back et le 1-back sont identiques mais diffèrent par le fait que le 1-back met en œuvre l'habileté de MAJ. Le 2-back implique une plus forte charge que le 1-back : il génère le maintien de deux items ainsi que leur ordre de présentation. Il induit également une plus forte composante de MAJ. Pour chaque condition, le pourcentage de réponses correctes était enregistré ainsi que les temps de réactions (TR) moyen.

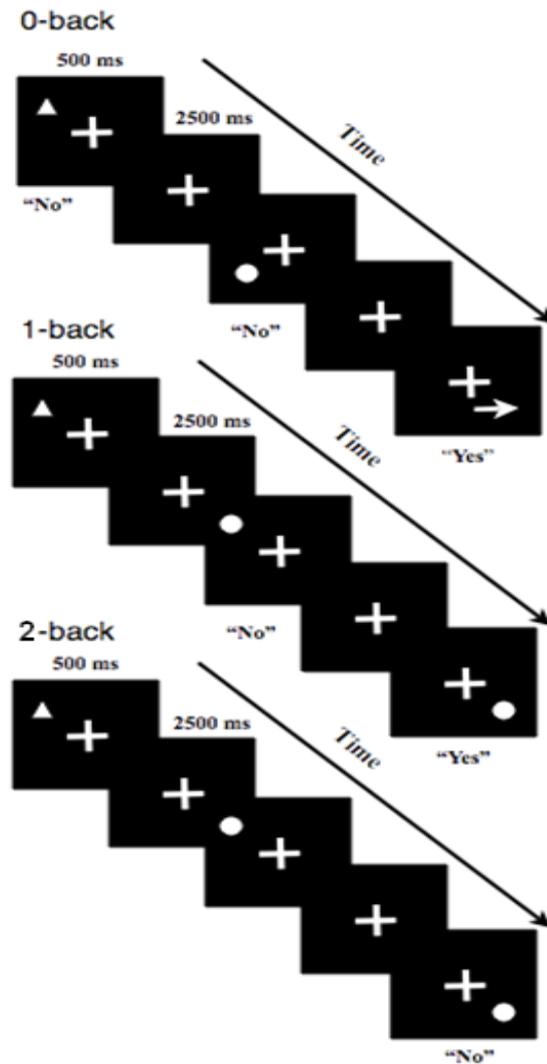


Fig. 35 : Illustration de la tâche du N-back. Les trois conditions employées sont représentées : 0-back, 1-back et 2-back. Le participant détermine si l’item présenté correspond à la forme cible à l’aide du boîtier de réponse.

III.3.5. Raisonnement déductif

Selon Braine (1990), il existe une logique humaine ou « naturelle », définie par un ensemble de règles très simples et automatiques, considérées comme universelles et dépendantes du niveau d’éducation. En revanche, un second niveau de raisonnement logique est modulé par l’apprentissage et implique des processus de raisonnement analytiques de plus haut niveau. La tâche de logique que nous employons sollicite ce deuxième niveau. Elle est inspirée de Natsopoulos et collaborateurs (1997) et a déjà été utilisée au cours d’une étude précédente afin d’évaluer le fonctionnement exécutif et ses corrélats psychophysiques (Causse, Sénard,

Démonet, & Pastor, 2009). Le but de la tâche est de résoudre des syllogismes en choisissant parmi trois solutions proposées, celle qui permet de conclure logiquement (Fig. 36). Les syllogismes sont basés sur un argument logique dans lequel une proposition (la conclusion) est inférée d'une règle (prémisse majeure) et d'une autre proposition (prémisse mineure). Nous avons employé quatre formes de syllogismes :

Raisonnements valides :

- $p \Rightarrow q$, p VRAI : Modus Ponendo Ponens (MPP), l'affirmation de l'antécédent de la majeure dans la mineure permet l'affirmation du conséquent de la majeure dans la conclusion ;
- $p \Rightarrow q$, q FAUX : Modus Tollendo Tollens (MTT), la négation du conséquent de la majeure dans la mineure permet la négation de l'antécédent de la majeure dans la conclusion.

Sophismes (raisonnement erroné) :

- $p \Rightarrow q$, p FAUX : Sophisme de l'affirmation du conséquent (SAC), l'affirmation du conséquent de la majeure dans la mineure ne permet pas l'affirmation de l'antécédent de la majeure dans la conclusion ;
- $p \Rightarrow q$, q VRAI : Sophisme de la négation de l'antécédent (SNA), la négation de l'antécédent de la majeure dans la mineure ne permet pas la négation du conséquent de la majeure dans la conclusion.

Chaque participant devait répondre à vingt-quatre syllogismes affichés selon un ordre aléatoire. Les mesures étaient le pourcentage de bonnes réponses et les TR pour les réponses correctes.

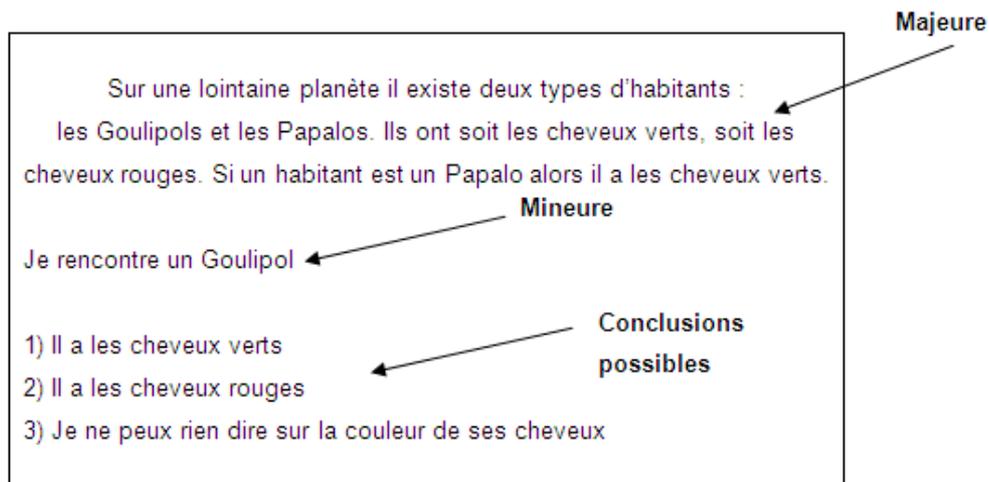


Fig. 36 : Illustration d'un syllogisme. Le participant doit sélectionner à l'aide du boîtier de réponse la conclusion pertinente parmi les trois proposées.

III.3.6. Le Wisconsin Card Sorting test version informatique

Le WCST (Berg, 1948) est utilisé pour obtenir des informations sur les capacités d'un individu à raisonner dans l'abstrait, discriminer, apprendre, et donne également des indices pertinents sur le fonctionnement exécutif, en particulier le *set-shifting* (Eling, Derckx, & Maes, 2008; Royall et al., 2002). La version informatisée que nous avons utilisé (Fig. 37) est très similaire à celle employée dans le cadre de la pratique clinique (Heaton, Chelune, Talley, Kay, & Curtiss, 1993), excepté le fait que les cartes étaient randomisées dans les tas. La couleur était choisie comme catégorie arbitraire initiale. Le test se terminait lorsque le participant réussissait à classer avec succès dix fois les cartes pour six catégories (couleur, forme, nombre, couleur, forme, nombre) ou lorsque les cent-vingt-huit cartes du jeu étaient tirées. Le nombre de règles atteintes, le nombre d'erreurs, le nombre d'erreurs persévératives (il existe une distinction entre erreur persévérative et réponse persévérative, une erreur persévérative est une erreur non ambiguë qui est répétée au moins deux fois (voir Raz, Gunning-Dixon, Head, Dupuis, & Acker, 1998) ainsi que les TR moyens constituaient les variables mesurant la performance.

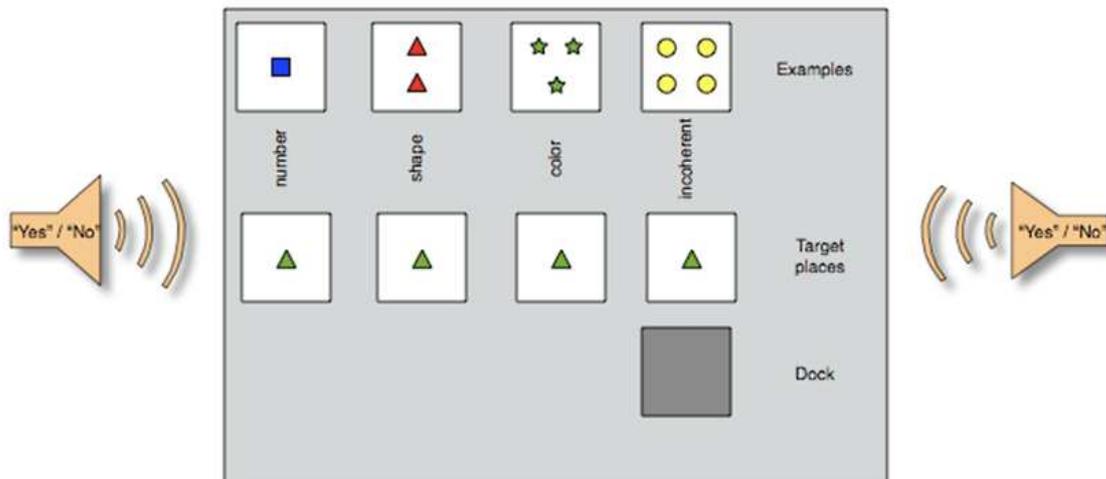


Fig. 37 : Illustration de la version informatique du WCST. Le participant classe les cartes tirées dans le paquet à l'aide de la souris. Un feedback audio informe de la justesse du classement (oui/non).

III.3.7. Le Stroop spatial

Le Stroop spatial mesure l'interférence causée par l'incompatibilité du sens d'un mot, par exemple *gauche*, et sa localisation à l'écran, par exemple à droite. Cette interférence conduirait à l'activation simultanée des cortex moteurs gauche et droite (DeSoto, Fabiani, Geary, & Gratton, 2001; Lu & Proctor, 1995; MacLeod, 1991). Le Stroop spatial utilisé dans le cadre de cette étude était constitué de quatre conditions (Fig. 38) :

- Le Stroop neutre mot (SNM) : les mots gauche/droite étaient affichés au centre de l'écran, le participant devait simplement répondre en appuyant sur le bouton gauche ou droite du boîtier de réponse en fonction du sens du mot ;
- Le Stroop neutre position (SNP) : des patterns de xxxx étaient affichés à gauche ou à droite de l'écran, le participant devait spécifier la position du pattern en appuyant sur le bouton gauche ou droite du boîtier de réponse ;
- Le Stroop mot incompatible/compatible (SMI/SMC) : des séries de mots gauche/droite étaient affichées selon deux modalités. La modalité congruente, signifiant que la localisation et le sens du mot étaient compatibles (ex : mot gauche affiché à gauche de l'écran) et la modalité incongruente, signifiant que le sens du mot et sa localisation étaient incompatibles (mot gauche affiché à droite de l'écran). La réponse motrice était

donnée dans ce cas en fonction du sens du mot, sa position faisant interférence lors de la modalité incongruente.

Les mesures de la performance pour cette tâche étaient multiples : les TR moyens des réponses correctes au SNM nous donnaient un indicateur de vélocité supplémentaire à celui de la poursuite de cible ; les TR moyens des réponses correctes au SMI offraient un indice sur l'effet d'incompatibilité entre la position et le sens du mot. Enfin, l'effet d'interférence était calculé pour évaluer de façon « pure » l'inhibition en contrôlant les effets de lecture et de localisation à l'écran. La première étape du calcul consistait à calculer un score-T :

$$T = \frac{SNP * SNM}{SNP + SNM}$$

On obtenait enfin l'effet d'interférence qui est égal au SMI – T-score.

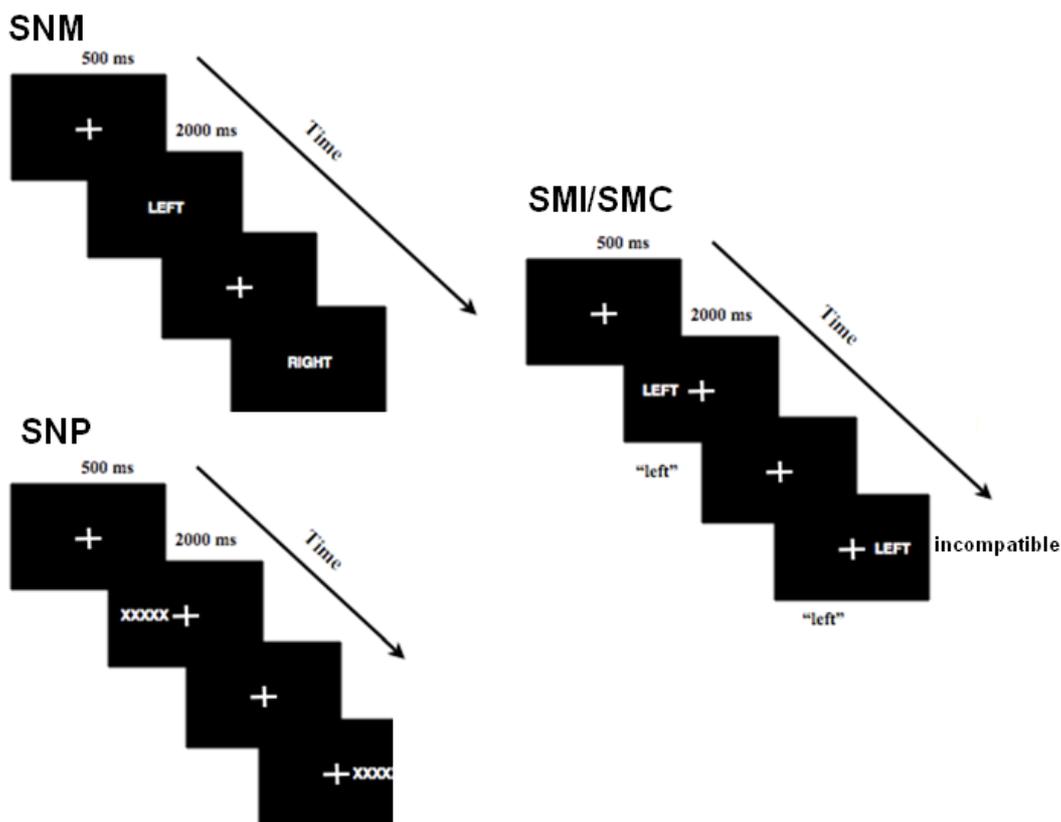


Fig. 38 : Illustration des quatre conditions du Stroop spatial. À gauche : SNM, le participant appuie sur le bouton gauche/droite du boîtier de réponse en fonction du sens du mot affiché ; SNP, le participant appuie sur le bouton gauche/droite du en fonction de la position à l'écran du pattern de XXXX. À droite : SMC et SMI, le participant appuie sur le bouton gauche/droite en fonction du sens du mot affiché, compatible ou incompatible avec sa position à l'écran.

III.3.8. L'estimation des durées

Ce test mesure l'habileté des participants à évaluer et à comparer des durées. Ces derniers étaient informés qu'ils devaient effectuer ce type de comparaison, ce qui en fait une tâche de jugement prospectif. Selon Brown (1997), ce type de jugement est associé à une consommation des ressources du contrôle exécutif de la MDT, et implique de ce fait les FE. Deux stimuli étaient successivement présentés avec des durées de présentation variées (de 1000 à 5000 ms), le participant devait simplement estimer si la durée durant laquelle le 2^e stimulus était affichée était plus courte, égale ou plus longue au temps d'affichage du premier. Le pourcentage des bonnes réponses était collecté ainsi que les temps TR moyens pour les réponses correctes.

III.3.9. La tâche du micro-monde

Mise au point à l'Inserm U825 (Pastor, 1999; Pastor, Agniel, & Celsis, 1998), fondée sur l'hypothèse du continuum cognitif, la tâche du micro-monde (Fig. 39) ou *Earth*© (Evaluation Artificielle du Raisonnement Temporel Humain) est aussi bien destinée à détecter précocement un syndrome dysexécutif difficile à objectiver chez des patients (ex : malade d'Alzheimer à un stade préclinique, traumatisés crâniens légers), que les effets cognitifs de certaines molécules (antidépresseurs, amphétamines etc.) ou à mettre en évidence des situations dans lesquelles des opérateurs de domaines de haute technicité vont se trouver en difficulté et vont voir leurs performances dégradées. Dans cette tâche, le participant doit contrôler un micro-monde, environnement virtuel, représentant un réseau de cuves et de tuyaux dans lequel un liquide s'écoule par gravité. Deux cuves de capacités identiques jouent un rôle particulier : la cuve initiale qui est pleine en début de session, et la cuve finale qui doit être pleine en fin de session. La tâche assignée au participant consistait à remplir la cuve finale le plus vite possible, en perdant le moins de liquide possible (en faisant déborder au minimum les cuves intermédiaires). Il pouvait pour cela agir sur des vannes ON/OFF placées sur certains tuyaux (« ON », la vanne est verte, « OFF », la vanne est rouge). Les mesures recueillies comprenaient le pourcentage d'eau perdue, le temps mis pour accomplir la tâche, et la prise de risque. Celle-ci est résumée par quatre indices calculés en fonction du niveau moyen des cuves autour des vannes actionnées. L'indice Close Up (CU) est le niveau moyen de l'eau dans la ou les cuves situées directement en amont de la vanne, au

temps d'échantillonnage avant sa fermeture. Close Down (CD) est le niveau moyen de la hauteur d'eau dans la ou les cuves directement en aval de la vanne au temps d'échantillonnage précédent la fermeture. On définit Open Up (OU) et Open Down (OD) de la même manière pour les ouvertures.

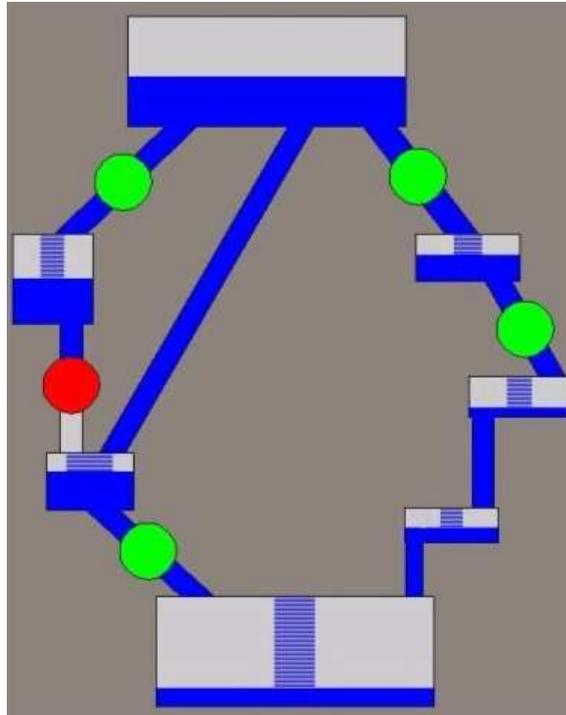


Fig. 39 : La tâche du Micro-monde. Afin d'éviter les débordements, le participant doit ouvrir et fermer les vannes à l'aide de la souris pour gérer le liquide qui s'écoule par gravité (la cuve devient jaune). Chaque vanne est représentée par un rond. Il est vert quand elle est ouverte, le liquide peut s'écouler. Il est rouge quand elle est fermée, le liquide est alors retenu en amont de la valve.

III.4. Caractéristiques des pilotes

Certaines caractéristiques personnelles étaient collectées afin d'évaluer leur évolution au cours de l'âge ainsi que leurs effets éventuels sur nos variables dépendantes de pilotage (écart au cap et décision lors de l'atterrissage). Ainsi, nous avons collecté le niveau d'éducation, l'expérience de vol totale (en heures), l'expérience de vol récente (en heures pour les deux dernières années) ainsi que l'ancienneté de l'obtention du brevet de pilotage (PPL). Par ailleurs, certains traits de personnalité ont également été mesurés.

III.4.10. Tests de personnalité

Du fait que des traits de personnalité comme l'anxiété (Airaksinen et al., 2005; Castaneda et al., 2008; Miu, Heilman, & Houser, 2007; Tucker & Derryberry, 1992) et l'impulsivité (Hinson, Jameson, & Whitney, 2003; Keilp, Sackeim, & Mann, 2005; Pietrzak, Sprague, & Snyder, 2008) peuvent perturber les FE et favoriser des prises de décision risquées (Martin & Potts, 2009), nous avons intégré ces paramètres dans les analyses.

III.4.10.1. L'anxiété trait

Le niveau d'anxiété trait a été évalué grâce à la version française du Spielberger trait anxiety inventory (STAI Y-B, Bruchon-Schweitzer & Paulhan, 1993). Le STAI Y-B est composé d'une série de vingt items qui devaient être cotés par les participants. Le score allant de vingt à quatre-vingt, donne un indice sur la propension habituelle d'un individu à être anxieux. Le STAI Y-A, mesurant l'anxiété état (anxiété passagère) n'a pas été utilisé dans cette expérience.

III.4.10.2. L'impulsivité

L'impulsivité a été mesurée par la version française du Barratt Impulsiveness Scale (BIS-10, Bayle et al., 2000). Ce test constitué de trente-quatre items cotés par les participants donne trois sous-scores : impulsivité cognitive (prise de décision rapide, 11 items), impulsivité motrice (action sans réflexion, 11 items) et impulsivité « non-planning » (orientation dans le présent, manque de projection et de clairvoyance, 12 items). Un score d'impulsivité total est également calculable par l'addition des trois sous-scores.

III.5. Analyses statistiques

Toutes les analyses ont été réalisées avec le logiciel Statistica 7.1 (© StatSoft). Exception faite de la performance de pilotage et de la qualité de la prise de décision, des corrélations linéaires de Bravais-Pearson ont été employées pour déterminer s'il existait des liens entre l'âge et les autres variables qui nous intéressaient (ex : effets de l'âge sur les résultats aux tests neuropsychologiques). Etant donné la grande quantité de variables impliquées dans les comparaisons multiples, la probabilité d'observer de fausses corrélations était relativement importante. Nous avons en conséquence corrigé les analyses avec la formule de Bonferroni-Holm (Holm, 1979). Nous prenions toutefois également en compte les analyses significatives avant cette correction. La prédictibilité de la liste complète des variables sur la performance de pilotage (écart au cap) a été évaluée par des régressions linéaires pas à pas ascendantes. La prédictibilité d'un plus petit groupe de variables sur cette mesure de pilotage a également été testée via des régressions linéaires exhaustives. Ce type de régression permet d'obtenir le meilleur modèle explicatif en explorant toutes les combinaisons.

La décision d'atterrir (ou non) étant une mesure booléenne, nous avons réalisé des analyses discriminantes, plus adaptées pour le traitement de variables binaires que les régressions linéaires. Des analyses discriminantes pas à pas ascendantes ont été menées sur l'intégralité des variables puis la prédictibilité d'un groupe de variables plus restreint a été examinée via des analyses discriminantes exhaustives.

IV. Résultats

Le Tableau 5 présente l'ensemble des corrélations réalisées en lien avec l'évaluation des effets de l'âge sur les tests neuropsychologiques et les caractéristiques des pilotes. Les résultats exposés comprennent le p réel, le p corrigé ainsi que le coefficient de corrélation r .

Nous présentons dans un premier temps les résultats issus des corrélations significatives après la correction de Bonferroni-Holm puis nous aborderons dans un second temps les résultats qui n'étaient significatifs qu'en l'absence de cette correction.

IV.1. Caractéristiques générales de la population

Le niveau d'étude moyen de notre population était élevé (15.45 années \pm 2.06, correspondant à un niveau moyen proche de Bac+4) et ne différait pas significativement en fonction de l'âge ($p=.110$; $r=-.32$). Etant donné que l'expérience de vol est supposée protéger des effets délétères de l'âge sur le pilotage, nous avons contrôlé ce paramètre lors du recrutement. De ce fait, ni l'expérience de vol récente (186.75 \pm 95) calculée sur les deux dernières années, ni le nombre total d'heures de vol (1676 \pm 2992) n'étaient significativement corrélés à l'âge des pilotes ($p=.123$, $r=+.39$), et ce en dépit de trois pilotes de plus de cinquante-cinq ans possédant une très forte expérience (voir Fig. 40). Seule l'ancienneté du PPL (15.45 ans \pm 12.76) était proche d'être significativement liée à l'âge ($p=.053$, $r=+.60$).

Les scores au STAI Y-B et au Barrat n'évoluaient pas significativement avec l'âge non plus. Le score moyen au STAI Y-B était de 36.5 (\pm 7.95) et celui au Barrat de 41.85 (\pm 8.89). Ces chiffres sont remarquablement faibles par rapport à ceux de la population masculine générale qui sont respectivement de 42.60 (\pm 10.98) pour le STAI Y-B et de 54 (\pm 17) pour le Barrat. Les chiffres pour le STAI Y-B proviennent d'une étude de Gauthier et Bouchard (1993) menée sur quatre-vingt-trois étudiants et ceux du Barrat sont issus de la validation canadienne-française de la BIS-10 (Bayle et al., 2000).

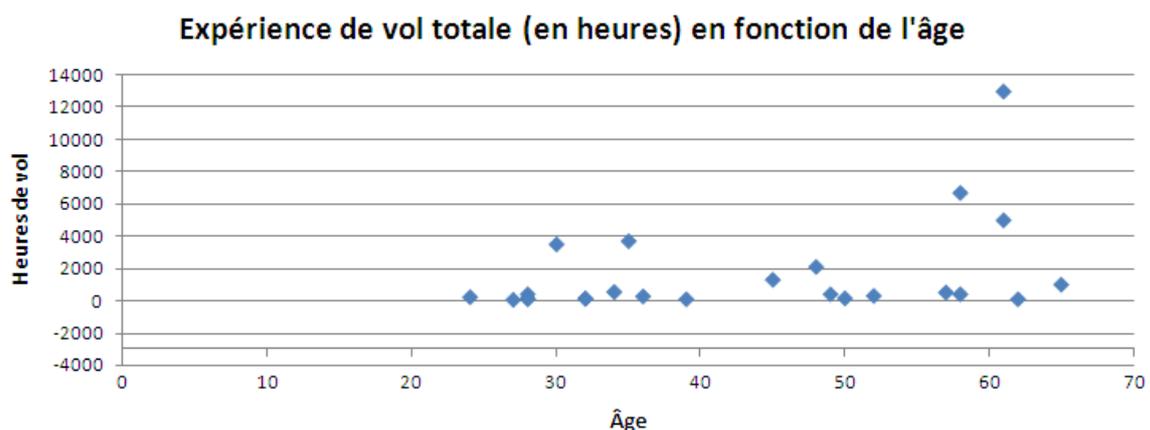


Fig. 40 : Nuage de points représentant l'expérience de vol totale en fonction de l'âge. Trois pilotes âgés de plus de cinquante-cinq ans présentaient une forte expérience de vol. Cependant, la corrélation âge/expérience n'était pas significative.

IV.2. Age et tests neuropsychologiques

Plusieurs effets significatifs de l'âge ont été retrouvés sur les tests après la correction de Bonferroni-Holm.

Le pourcentage de réponses correctes moyen au test du 2-back diminuait significativement avec l'augmentation de l'âge ($p=.0016$, $r=-.73$). Cette chute des performances au 2-back met en évidence un déclin des composantes de MAJ et de maintien en MDT (voir Fig. 41). On peut constater qu'à partir de cinquante-cinq ans, six participants sur sept obtiennent moins de 70% de bonnes réponses. Aucun autre participant plus jeune n'obtenait un score aussi faible.

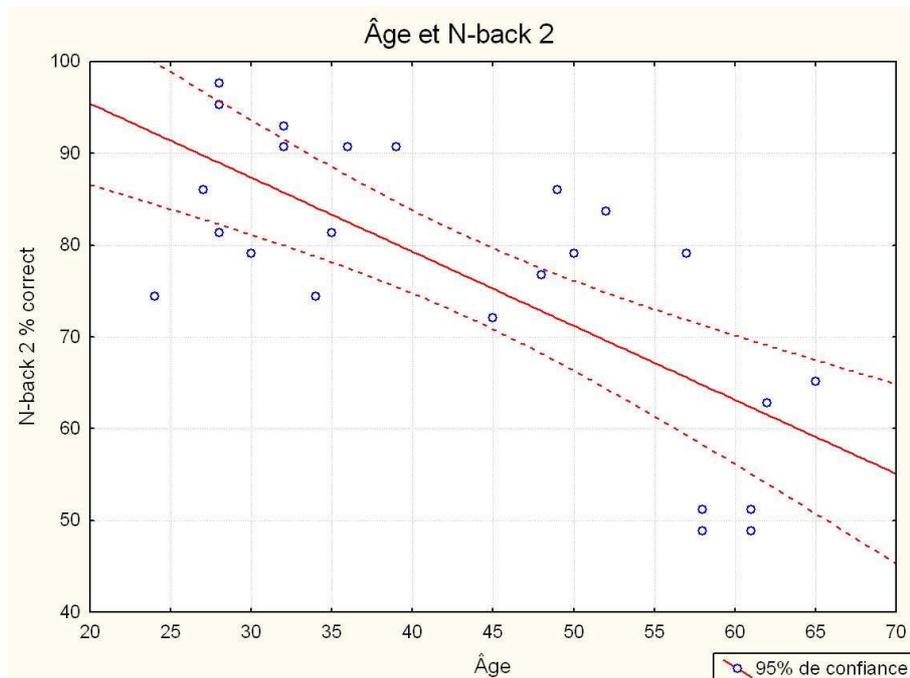


Fig. 41 : Corrélation négative entre l'âge et les performances au 2-Back (pourcentage de réponses correctes). Après cinquante-cinq ans, six participants sur sept présentent un score inférieur à 70 pourcents de réponse justes.

La vitesse psychomotrice se réduisait significativement avec l'augmentation de l'âge ($p=.0030$, $r=-.71$). Ces résultats sont très classiques et soulignent un ralentissement général, à la fois perceptif et moteur (Fig. 42).

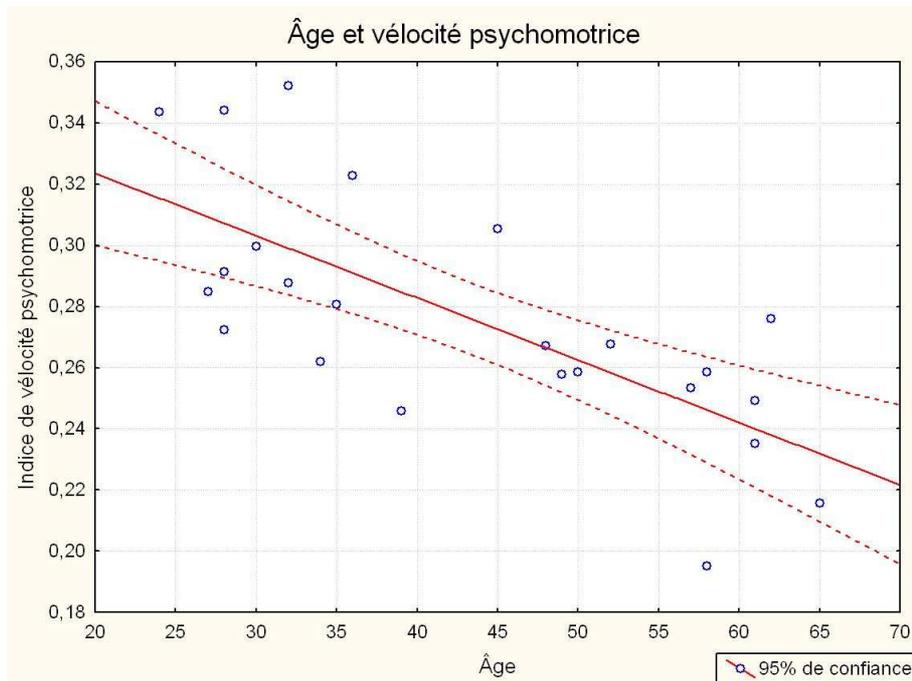


Fig. 42 : Corrélation négative entre l'âge et la vitesse psychomotrice telle qu'évaluée par la tâche de poursuite de cible.

Les TR moyens au SMI s'allongeaient significativement avec le vieillissement ($p=.0339$, $r=+.63$), traduisant à la fois un ralentissement cognitif et une moindre résistance à l'interférence (Fig. 43).

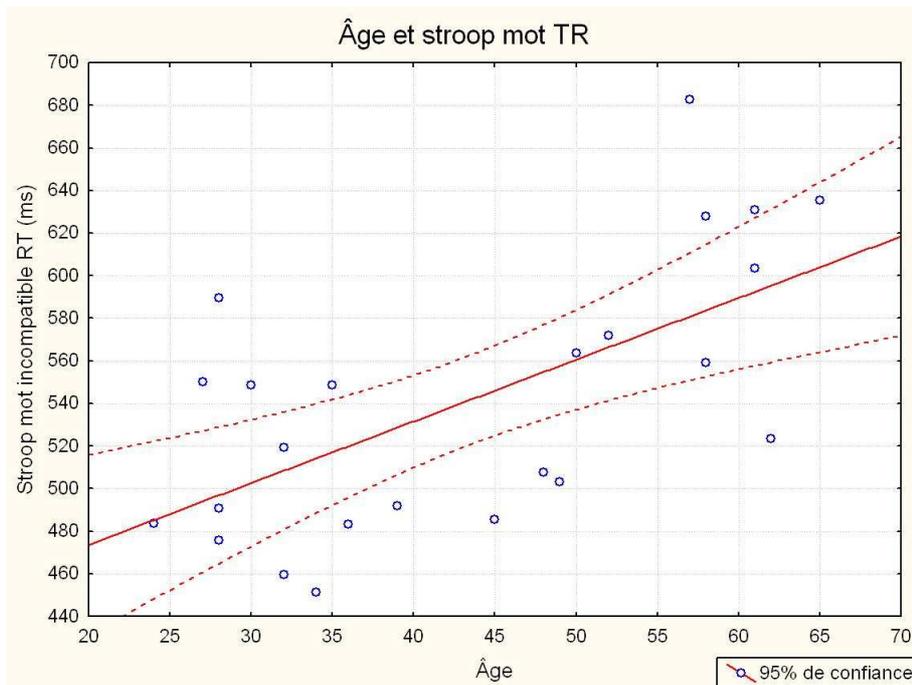


Fig. 43 : Corrélation positive entre l'âge et le temps de réactions moyens au Stroop mot incompatible.

Même si les effets sont vraisemblablement moins robustes, nous prenons également en compte les corrélations significatives avant la correction de Bonferroni-Holm. Il faut ainsi ajouter plusieurs variables significativement modifiées par l'âge à la liste de celles retrouvées précédemment.

Il a été observé une diminution du pourcentage de réponses correctes au 1-back ($p=.0028$, $r=-.58$), tâche liée à la MAJ et au maintien en MDT. L'indice du niveau d'interférence au Stroop s'est également accru, reflétant une plus grande sensibilité à l'interférence et de fait une diminution des capacités d'inhibition « pures » ($p=.0037$, $r=+.57$). On peut noter qu'à partir de cinquante-cinq ans, cinq pilotes sur sept ont un niveau d'interférence plus élevé que tous les autres, voir Fig. 44. Nous avons également retrouvé une augmentation des TR moyens au SMC ($p=.0091$, $r=+.52$), qui reflète un ralentissement cognitif général (pouvant toutefois être modulé par la rapidité de lecture). En ce qui concerne le WCST, nous avons observé une augmentation des TR moyens pour les réponses correctes ($p=.0055$, $r=+.55$), du nombre total de cartes tirées ($p=.0073$, $r=+.53$), du temps total mis pour réaliser la tâche ($p=.0074$, $r=+.53$), du nombre d'erreurs persévératives ($p=.01717$, $r=+.58$) et non persévératives ($p=.01976$, $r=+.47$) et une diminution du nombre de règles atteintes ($p=.0295$, $r=-.44$). Ces résultats sont à associer à de moins bonnes performances de maintien de la règle en mémoire et à un déclin du *set-shifting*. Le temps mis pour résoudre les syllogismes était également plus élevé chez les participants plus âgés

($p=.0092$, $r=+.52$). Le pourcentage de réponses correctes moyen pour cette tâche avait également tendance à diminuer ($p=.0663$, $r=-.38$). Enfin, le temps mis pour réaliser la 1^e action dans la tâche du micro-monde augmentait également avec l'âge ($p=.0497$, $r=+.40$), dénotant une élévation du temps consacré à l'analyse et à la planification de la réalisation de cette tâche.

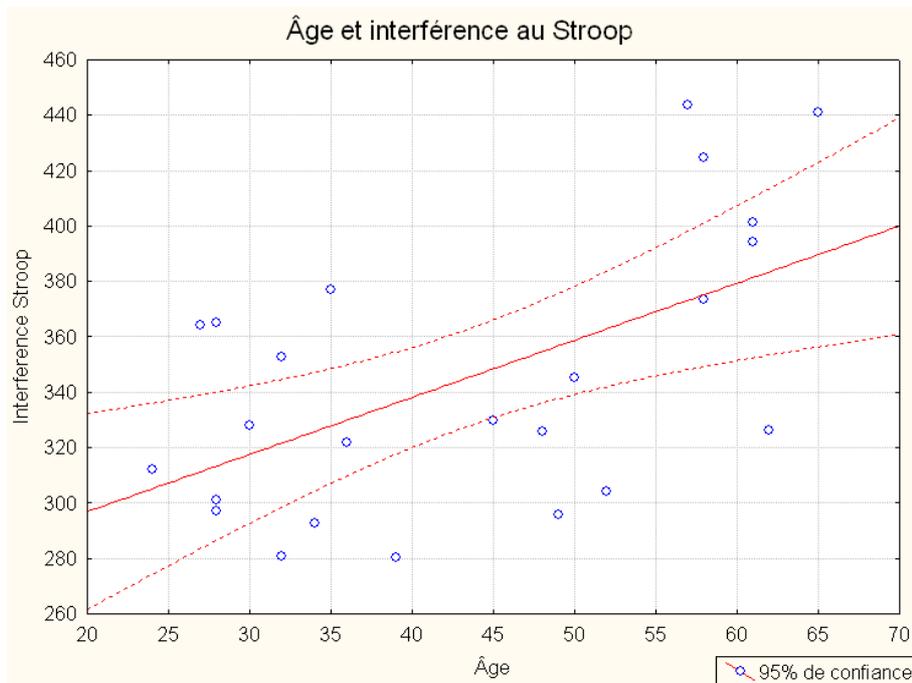


Fig. 44 : Corrélation positive entre l'âge et l'amplitude de l'effet d'interférence. On peut remarquer que cinq participants de plus de cinquante-cinq ans ont un score d'interférence plus élevé que tous les autres. Ce résultat signale de moins bonnes performances en termes d'inhibition.

Nous avons également réalisé des corrélations sur un nombre plus restreint de variables uniquement neuropsychologiques (Tableau 6). L'analyse des effets de l'âge sur ce petit groupe de variables permet de se focaliser sur certaines mesures et offre une correction de Bonferroni-Holm moins sévère. Si l'on considère ces données-ci, on retrouve un effet significatif de l'âge sur la MAJ et le maintien en MDT, tel qu'évalué par le 1-back et le 2-back (respectivement $p=.0025$ et $p=.0001$), la vitesse de traitement ($p<.0001$), l'inhibition ($p<.0037$) et le *Set-shifting* ($p<.0171$). Encore une fois, l'altération de l'âge sur les performances de raisonnement en termes de pourcentages de réponses correctes n'est pas significative ($p=.0663$).

Tableau 5 : Résumé des résultats des corrélations avec la variable âge. Le *p* corrigé résulte de la correction de Bonferroni-Holm. NB0%C, NB1%C NB2%C = pourcentage de réponses correctes au 0,1 et 2-back (RTC concerne les temps de réaction corrects) ; vélocité = indice de vélocité de la tâche de poursuite de cible ; SNMRT SMCRT, SMIRT = temps de réactions au Stroop neutre mot, Stroop mot compatible et Stroop mot incompatible ; interférence = score d'inhibition ; WRTC, WTrials, WTT, WEP, WENP, Wregles = temps de réactions corrects, nombre d'essais totaux, temps total, nombre d'erreurs persévératives, nombre d'erreurs non persévératives et nombre de règles totales réussies pour le Wisconsin ; DRCT, D%C = temps de réactions et pourcentage de bonne réponses à la tâche déductive ; MWFAT, MWT, MWA, MWL, CU, CD, OU, OD = temps mis pour réaliser la 1^e action, temps total, nombre total d'actions et pourcentage de liquide perdu pour la tâche du micro-monde. Les 4 autres variables sont les indices de prise de risque (close up, close down, open up et open down) ; BR -, BR+ et BR= = pourcentage de bonnes réponses à la tâche d'estimation des durées en condition moins égal ou plus long ; Imotr, InonPlan et Icog = les trois variables d'impulsivité ; STAI = l'indice d'anxiété ; HVT et HV2 ans = variables d'expérience totale et récente ; AnnéePPL = nombre d'années depuis l'obtention du PPL.

Variables	<i>p</i> réel	<i>r</i>	<i>p</i> corrigé	Variables	<i>p</i> réel	<i>r</i>	<i>p</i> corrigé
NB2%C	0,000045389	-.73	0,0016794	NB1RTC	0,15104335	+.30	2,71878037
vélocité	0,000084208	-.71	0,00303149	SNMRT	0,18132328	+.28	3,08249579
SMIRT	0,000969119	+.63	0,03391917	Imotr	0,19876423	-.30	3,1802276
AnneePPL	0,001580489	+.60	0,05373663	InonPlan	0,20300173	-.29	3,04502591
NB1%C	0,002854971	-.58	0,09421404	BR+	0,29822714	+.22	4,17517999
Interférence	0,003732515	+.57	0,11944047	BR-	0,31492861	+.21	4,09407198
WRTC	0,005505569	+.55	0,17067264	NB0RTC	0,34034743	+.20	4,0841692
Wtrials	0,00730098	+.53	0,2190294	MWT	0,3971858	+.18	4,3690438
WTT	0,007432877	+.53	0,21555343	NB0%C	0,41902794	+.17	4,19027936
SMCRT	0,009181633	+.52	0,25708572	HV2ans	0,51040757	-.14	4,59366811
DRCT	0,009252477	+.52	0,24981688	OU	0,76627352	-.06	6,13018816
WEP	0,017172348	+.48	0,44648105	Icog	0,82788837	-.05	5,7952186
WENP	0,019766464	+.47	0,4941616	MWA	0,86146293	-.03	5,16877758
Wregles	0,029564597	-.44	0,70955033	OD	0,88767297	-.03	4,43836483
MWFAT	0,049795845	+.40	1,14530444	CD	0,89419432	-.03	3,57677726
HVT	0,05619376	+.39	1,23626272	MWL	0,90191192	+.02	2,70573575
D%C	0,06632347	-.38	1,39279287	STAI	0,96162697	+.01	1,92325393
CU	0,097367357	-.35	1,94734714	NB2%RTC	0,96702624	-.01	0,96702624
BR=	0,115833578	-.33	2,20083798				

Tableau 6 : Résumé des résultats des corrélations avec la variable âge sur un groupe sélectionné de variables neuropsychologiques. Le p corrigé résulte de la correction de Bonferroni-Holm. NB1%C, NB2%C = pourcentage de réponses correctes au 1 et 2-back ; vélocité = indice de vélocité de la tâche de poursuite de cible ; interférence = score d'inhibition ; WEP = nombre d'erreurs persévératives ; D%C = pourcentage de bonnes réponses à la tâche déductive

Variables	p réel	r	p corrigé
NB2%C	0,0000453893000	-.73	0,00027234
velocite	0,0000842081000	-.71	0,00042104
NB1%C	0,0028549710000	-.58	0,01141988
Interférence	0,0037325147996	+.57	0,01119754
WEP	0,0171723480000	+.48	0,0343447
D%C	0,0663234700000	-.38	0,06632347

IV.3. Facteurs prédictifs de la performance de pilotage

IV.3.1. L'écart au cap

L'enregistrement des paramètres de vol d'un participant n'a pu être réalisé pour des raisons techniques, les analyses statistiques pour cette variable portent en conséquence sur vingt-trois pilotes.

Les régressions linéaires pas à pas ascendantes ont révélé que l'amplitude de l'écart au cap optimal était prédite par le pourcentage de bonnes réponses obtenu à la tâche de raisonnement logique ($p=.0109$, $F(1,18)=8.05$, $t=-2.83$), voir Tableau 12 en annexes pour synthèse de la régression pas à pas ascendante. Afin d'estimer la qualité du modèle, nous avons retenu le r^2 ajusté. Le coefficient de détermination ajusté tient compte du nombre de variables. En effet, le principal défaut du r^2 est de croître mécaniquement avec le nombre de variables explicatives. Le r^2 ajusté montrait que le résultat obtenu à la tâche de raisonnement explique à lui seul 27.07% de la performance de pilotage.

Une régression linéaire exhaustive a également été réalisée sur une sélection de cinq variables neuropsychologiques que nous estimons particulièrement critiques au pilotage : la

rapidité psychomotrice, les performances de raisonnement (pourcentage de bonnes réponses) et les trois FE de bas niveau (Miyake et al., 2000) évaluées par le pourcentage de bonnes réponses au 2-back (MAJ+maintien en MDT), les erreurs persévératives au Wisconsin (*set-shifting*) et le score d'interférence (inhibition). Nous avons également ajouté l'âge et l'expérience totale à cette liste de variable. Cette régression exhaustive a mis en évidence trois variables prédictives de la performance de pilotage. L'expérience de vol totale ($p=.0275$, $F(1,15)=5.95$, $t=-2.44$) et le nombre de réponses correctes au 2-Back ($p=.0395$, $F(1,15)=5.08$, $t=-2.25$) sont venus s'ajouter aux performances en termes de capacité de raisonnement déjà observées précédemment ($p=.0083$, $F(1,15)=9.20$, $t=-3.03$), voir Fig. 45. En d'autres termes, l'amplitude de l'écart au cap était d'autant plus faible que l'expérience de vol était grande et que les performances de MAJ et de maintien en MDT et de raisonnement étaient bonnes. Le coefficient de détermination ajusté montre que ce modèle explique 44.51% de la variation de la performance de pilotage. Voir Tableau 13 en annexes pour synthèse. La Fig. 46 illustre la trajectoire de deux pilotes ainsi que leurs performances à la tâche de raisonnement.

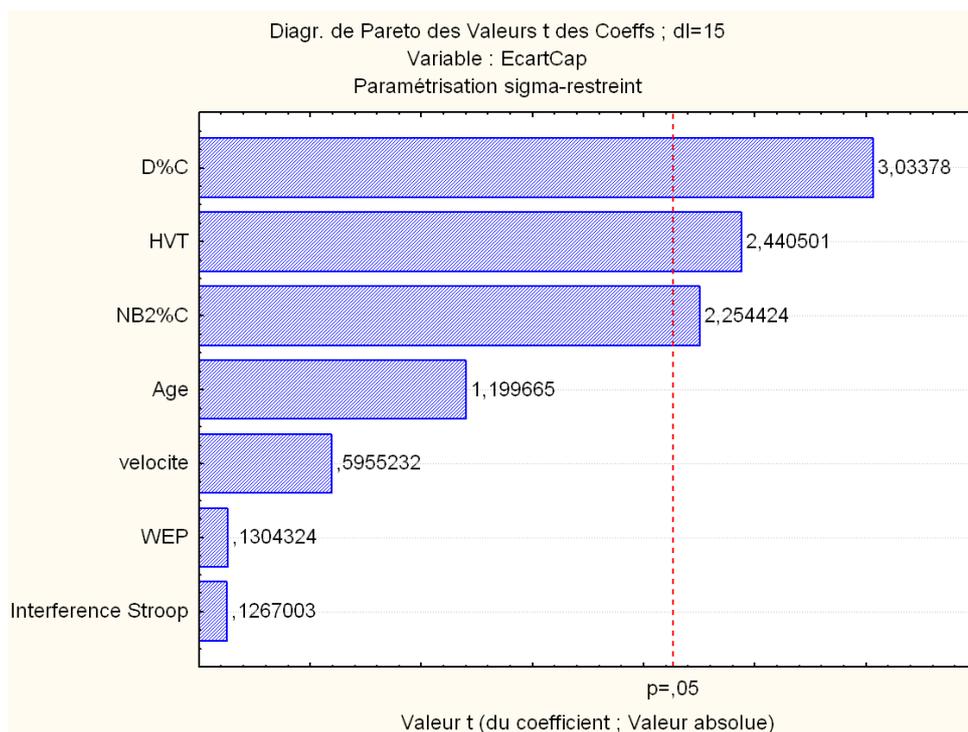


Fig. 45 : Diagramme de Pareto pour la performance de pilotage. Les variables significativement prédictives sont le pourcentage de réponses correctes moyen à la tâche de raisonnement (D%C), le nombre total d'heures de vol (HVT) et le pourcentage de réponses correctes moyen au 2-Back (NB2%C).

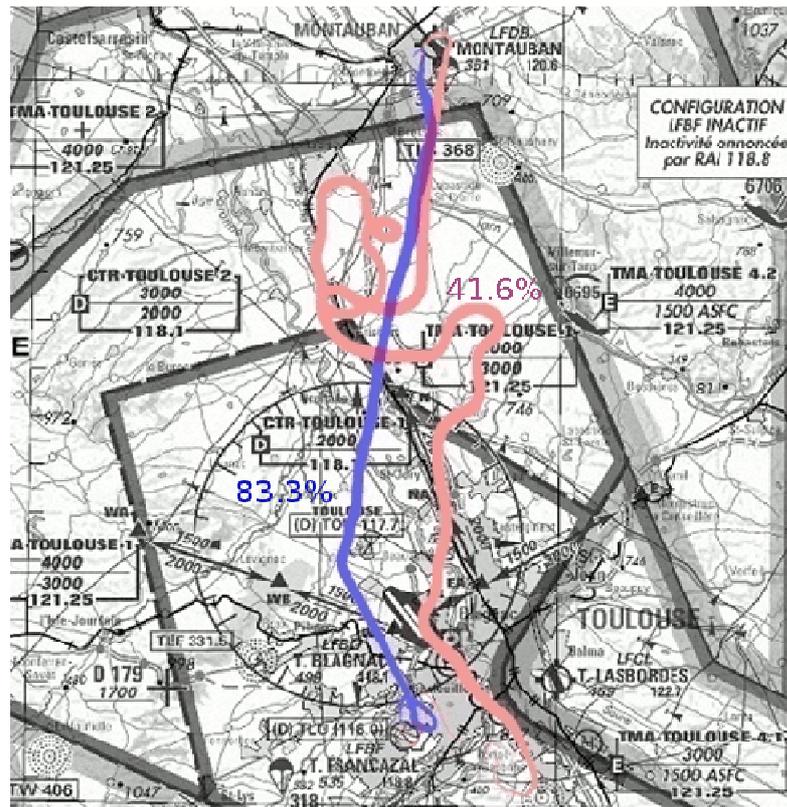


Fig. 46 : Exemple de deux navigations. En bleu, un pilote ayant réalisé une très bonne performance, en rose un pilote s'étant perdu et ayant survolé l'aéroport de Blagnac par erreur. Les performances (en pourcentages de réponses correctes) réalisées à la tâche de raisonnement pour chaque pilote sont également indiquées (rendu des trajectoires réalisé avec le logiciel FromDady, Hurter, Tissoires, & Conversy, 2009).

IV.3.2. La décision d'atterrir

L'analyse discriminante pas à pas ascendante a révélé que la bonne décision qui consistait à remettre les gaz au lieu d'atterrir était significativement prédite par deux variables : le pourcentage de réponses correctes au 2-back ($p=.0006$, $F(1,17)=17.40$, $t=+4.17$) et le nombre total d'heures de vol ($p=.0121$, $F(1,17)=7.86$, $t=+2.80$), voir Tableau 14 en annexes pour synthèse de l'analyse discriminante pas à pas ascendante.

Une analyse discriminante exhaustive a également été réalisée sur les trois FE de bas niveau, MAJ-*set-shifting*-inhibition, ainsi que sur les trois variables d'impulsivité du Barrat (impulsivité cognitive, impulsivité non planning et impulsivité motrice). L'âge, l'expérience de vol et les performances de raisonnement ont également été ajoutés au modèle. Cette analyse a montré que les pilotes ayant pris la bonne décision de remettre les gaz présentaient un pourcentage de bonnes réponses moyen supérieur au 2-back (MAJ), un nombre total d'heures de vol supérieur et

une impulsivité motrice inférieure par rapport aux pilotes ayant poursuivi à tort l'atterrissage (respectivement $p=.0009$, $F(1,10)=21.27$, $t=+4.61$; $p=.0032$, $F(1,10)=14.77$, $t=+3.84$; $p=.0376$, $F(1,10)=5.73$, $t=-2.39$). Les performances de raisonnement n'étaient pas prédictives de la qualité de la prise de décision ($p=.728$), voir Tableau 15 en annexe pour le détail de la régression exhaustive. La matrice de classification montre que ce modèle permet de discriminer correctement 100% des pilotes ayant atterri et 91% des pilotes n'ayant pas atterri.

V. Discussion

Dans un premier temps, nous avons fait le choix d'évaluer les effets prédictifs de l'intégralité de nos variables sur le pilotage par le biais de régressions linéaires et d'analyses discriminantes pas à pas ascendantes. Ces régressions ajoutent des variables explicatives une à une, en commençant par celle qui augmente le plus la valeur de la statistique F . Ces régressions s'interrompent lorsqu'aucune variable significative supplémentaire ne peut être ajoutée au modèle. Le choix de ce principe statistique permet de mettre en évidence les prédicteurs les plus significatifs en regard des variables dépendantes. Cela évite que des variables très corrélées aient des effets redondants, ou au contraire, des influences qui s'annulent. Ces régressions permettent de mettre en avant la ou les variables qui ont le potentiel prédictif le plus « fort ». Cependant, nous étions conscients qu'il existe un effet d'ordre qui fait que, lorsque deux variables sont corrélées, seule la première dans la liste sera retenue. Nous avons également réalisé des régressions linéaires et des analyses discriminantes exhaustives afin d'éviter ces effets d'ordre. L'avantage de ce type d'analyse et de pouvoir atteindre le modèle prédictif optimal, toutes les combinaisons étant testées. Nous avons choisi de les appliquer sur une sélection de variables en fonction de nos hypothèses quant à leur rôle prédictif sur la variable dépendante étudiée, l'écart au cap ou la prise de décision lors de l'atterrissage.

V.1. Age et FE

Un premier objectif de cette étude était d'évaluer les effets du vieillissement normal sur les capacités cognitives, capacité indépendantes du domaine du pilotage, chez des pilotes de l'AG. L'analyse des effets du vieillissement sur les performances cognitives de ce type de population est assez peu répandue. Il s'agit généralement d'une population présentant un très bon niveau scolaire et il est intéressant d'observer le rôle de cette éducation sur la conservation des performances intellectuelles.

L'impact le plus net du vieillissement concerne la diminution des performances de la MDT, mise en évidence par la chute importante du pourcentage des réponses correctes à la tâche du 2-back. Cette chute se manifeste avec force à partir de cinquante-cinq ans. En effet, à cet âge, six participants sur sept ont un taux de bonnes réponses inférieur à 70%, ce qui n'est le cas pour aucun autre des participants plus jeunes. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Hardy (2007) qui montrent qu'en dépit de la bonne conservation des capacités mnésiques chez certains sujets, le nombre d'outliers²¹ augmente notablement après quarante ans. Un déclin est également retrouvé pour le test du 1-back, mais de façon moins marquée, la corrélation n'étant significative qu'en l'absence de correction de Bonferroni-Holm. Les résultats du 2-back, plus marqués que ceux du 1-back, mettent en avant un déclin des composantes de maintien et de MAJ en MDT, lorsque la demande s'accroît. L'absence d'impact du vieillissement sur la tâche du 0-back en opposition à ceux observés au 1-back met en évidence que les difficultés débutent lorsque la capacité de MAJ en MDT de travail est sollicitée. En effet, le 0-back et le 1-back impliquent la même charge en termes de maintien (un item), mais différent du fait que le 1-back nécessite une MAJ de l'item à retenir à chaque essai. Les effets de l'âge sur la performance obtenue au 2-back se sont avérés plus massifs que ceux observés sur le 1-back. Il semble donc que les symptômes de ce déclin de la MDT sont plus nets lors de la passation d'une tâche plus exigeante en termes de MAJ et de charge mnésique. Ces constatations nous permettent de tirer la conclusion que, même si la chute des performances mnésiques était bien réelle, et ce en accord avec la littérature (ex : Gregoire & Van Der Linden, 1997; Orsini et al., 1986; Taylor et al., 2007; Taylor et al., 2000; Verhaeghen, 1993; Yesavage et al., 1994), elle reste toutefois relativement modérée dans notre échantillon. Concernant les TR aux différents N-back, aucun effet significatif de l'âge n'a été retrouvé. Cette absence d'effet s'explique vraisemblablement par la nature même du test. En

²¹ Participant dont les résultats diffèrent grandement des autres pourtant considéré comme appartenant à une même catégorie, typiquement, en dépassant deux fois l'écart type.

effet, les stimuli ne sont affichés que durant un temps relativement court (500ms) et la réponse doit intervenir durant sa présentation, ce qui laisse peu de marge à une quelconque augmentation des TR, d'autant plus qu'il s'agit d'une tâche complexe. Des conclusions identiques ont également été formulées par Jaeggi et collaborateurs (2008). On peut s'interroger sur le rôle joué par cet aspect rapide et séquentiel de la tâche du N-back sur le déclin des performances. En effet, comme le propose Taylor (2005) ou encore Salthouse (1993), le déclin mnésique peut s'expliquer au moins en partie par une réduction générale de la rapidité de traitement. Le fait que les participants âgés prennent plus de temps à percevoir, encoder, stocker, mettre à jour, récupérer puis déclencher la réponse motrice, peut avoir contribué à une chute des performances, simplement par manque de temps disponible, du fait de la rapidité qu'implique la réalisation de cette tâche. Ainsi le taux de bonnes réponses a pu être modulé à la baisse par une rapidité de traitement plus faible. Ces modulations sont ainsi imputables au mécanisme de *temps limité* mis en avant par Salthouse (Salthouse, 1996) : il apparaît dans la mesure où les opérations cognitives sont exécutées trop lentement pour être réalisées correctement dans le temps imparti.

Le second effet massif de l'âge, le ralentissement cognitif général, appuie ces considérations. Ce ralentissement s'observe sur deux tâches : la poursuite de cible et le SNM. L'indice de vélocité psychomotrice, issu de la tâche de poursuite de cible chute progressivement avec l'âge et est un témoignage direct de la baisse de la rapidité de traitement cognitif ainsi que de la génération d'une réponse motrice. Le SNM fournit également un indice de rapidité cognitive. Cette tâche implique simplement de lire les mots gauche/droite et de générer une réponse motrice en fonction du sens du mot. Les performances peuvent toutefois être modulées par la rapidité de lecture, paramètre que nous ne testions pas. Par ailleurs les résultats au SMI traduisent également ce ralentissement cognitif mais de façon plus indirecte. Cette tâche introduit un l'effet d'interférence. L'allongement massif (même après correction) des TR au SMI sont la résultante de deux effets : celui d'un ralentissement cognitif général et celui d'un déclin des capacités d'inhibition (Bugg, De Losh, Davalos, & Davis, 2007; Uttl & Graf, 1997). Ce ralentissement cognitif et psychomoteur retrouvé dans toutes ces variables est un effet classique du vieillissement normal (Birren & Botwinick, 1955; Houx & Jolles, 1993; Salthouse, 1996) et est considéré comme facteur de dégradation cognitif général, et non pas comme la simple conséquence de cette dégradation. En effet, selon Salthouse (1991), la vitesse à laquelle les connexions neuronales s'effectue détermine le nombre de centres nerveux coopérant en même temps et module donc la performance intellectuelle dans son ensemble.

Les capacités d'inhibition se sont également avérées être affectées par l'âge. Les résultats montrent que ce déclin s'observe plus fortement après cinquante-cinq ans, ou cinq pilotes sur

sept présentent un taux d'interférence plus élevé que tous les autres pilotes. Différentes études ont montré que les personnes âgées présentaient une plus grande sensibilité à l'interférence par rapport à de jeunes adultes (Bruyer et al., 1995; Houx et al., 1993; West & Baylis, 1998). Le déficit d'inhibition est considéré par certains auteurs comme une des causes majeures de baisse des performances cognitives.

Les variables dépendantes du WCST sont également modifiées par les effets du vieillissement : augmentation du nombre d'essais totaux, augmentation du temps mis pour classer les cartes, diminution du nombre de catégories réussies et augmentation du nombre d'erreurs non persévératives et persévératives. Ces variables sont les indices d'une plus grande difficulté éprouvée à abstraire les règles, les maintenir durant la tâche et les modifier au moment opportun. L'augmentation des erreurs persévératives, associée au déclin du *set-shifting*, est considérée comme étant fortement liée au fonctionnement exécutif et donc, à l'intégrité du CPFDL (Voir Rhodes 2004 pour revue). Head (2009) a montré que l'augmentation des persévérations observé au cours du vieillissement est totalement expliqué par le déclin en terme de vitesse de traitement, de traitement temporel²² et de déficits en MDT, conséquences de la diminution du volume préfrontal, ainsi que de l'influence indirecte du déclin des capacités d'inhibition via la MDT. Ces résultats vont dans le sens de travaux antérieurs qui suggéraient déjà que ce déclin était dû à différents facteurs, et pas seulement au déclin du *set-shifting* (Ashendorf & McCaffrey, 2008; Fristoe et al., 1997; Hartman et al., 2001).

Le raisonnement logique semble relativement épargné puisque seul les temps moyens mis pour résoudre les syllogismes étaient significativement affectés par l'âge, le pourcentage de bonnes réponses n'ayant simplement que tendance à se dégrader (pour rappel, $p=.0663$). Une étude de De Neys (2009) a montré que les performances de raisonnement ne déclinaient sévèrement qu'après soixante-cinq ans, ce qui est précisément l'âge de notre participant le plus âgé. Nous pouvons donc considérer que l'absence d'effet de l'âge sur cette habileté cognitive est due à la composition de notre échantillon.

²² Ne pas confondre avec l'estimation des durées testées dans notre expérimentation. Le traitement temporel se réfère au contexte temporel des informations, par exemple l'ordre dans lequel elles ont été reçues. Cette habileté est associée à la MAJ et au *monitoring*.

V.2. Facteurs prédictifs de la performance de pilotage

V.2.1. L'âge, variable non prédictive de la performance de pilotage et de la décision d'atterrir

Afin d'évaluer les effets purs de l'âge sur la performance de pilotage, nous devons contrôler l'expérience des pilotes, ce paramètre étant considéré comme « protecteur » des effets du vieillissement par certains auteurs (Morrow, Menard et al., 2003; Morrow et al., 2001; Taylor et al., 2007; Taylor et al., 2005). L'expérience de vol récente (nombre d'heures de vol réalisées ces deux dernières années) et le nombre d'heures de vol total n'étaient pas modulés par l'âge. Cependant, trois pilotes âgés présentaient un niveau d'expérience élevé, qui a pu être bénéfique à leur performance de pilotage. L'effet positif de l'expérience sur l'habileté à piloter s'explique notamment par l'automatisation de certaines procédures de navigation et la maîtrise de scripts comportementaux spécifiques au pilotage. Ces précisions sont importantes car elles doivent pondérer l'absence de résultat en ce qui concerne l'effet de l'âge sur la performance de pilotage. En effet, contrairement à certains auteurs tels que Taylor (2000), les régressions linéaires ascendantes et exhaustives n'ont pas mis en avant d'effets de l'âge sur la capacité à piloter l'avion, telle que traduite par l'écart au cap optimal. Il est d'ailleurs intéressant de noter que le participant ayant réalisé la plus mauvaise performance de pilotage était un pilote plutôt âgé (62 ans) avec très peu d'expérience de vol (90 heures au total) alors que deux autres pilotes âgés également (61 ans tous deux), bénéficiant d'une très grande expérience (respectivement 13000 et 5000 heures de vol), ont réalisé une performance très correcte (la meilleure des plus de 50 ans pour le premier). Les novices âgés semblent être une population sensible. Enfin, il faut signaler également que l'âge n'était pas non plus un prédicteur pertinent de la qualité de la prise de décision au moment de l'atterrissage.

V.2.2. Variables prédictives de la performance de pilotage

Nous avons fait réaliser aux pilotes un grand nombre d'épreuves neuropsychologiques pour mesurer un panel de FE relativement large en termes de processus mais également en termes de niveaux considérés (ex : *set-shifting* vs. raisonnement). Les régressions linéaires pas à pas ascendantes ont révélé que la performance de raisonnement logique était la variable la plus prédictive de la performance de pilotage. Cette performance de raisonnement expliquant à elle seule 27.07% de la variation de cette variable dépendante. Le raisonnement est une mesure vraisemblablement très liée aux autres performances neuropsychologiques. En effet, les capacités de raisonnement sont une bonne mesure de l'intelligence fluide, fortement corrélée avec l'ensemble des autres habiletés intellectuelles (Salthouse, 2005). Ceci explique probablement le fait que la régression linéaire pas à pas ascendante montre qu'elle est la seule variable prédictive. Sa forte corrélation avec les autres habiletés intellectuelles réduit la significativité de ces dernières dans l'analyse. L'absence de résultat à la tâche du micro-monde s'explique vraisemblablement de cette façon. Ce résultat suggère que l'habileté à naviguer repose majoritairement sur un bon fonctionnement intellectuel général. Le raisonnement est une composante importante dans notre scénario, le pilote doit réaliser des observations tout au long de la navigation pour estimer sa position, de plus la panne du conservateur de cap suppose l'utilisation de la boussole magnétique en secours. Cette dernière, est anti-directionnelle et sollicite fortement le raisonnement à chaque fois que le pilote s'y réfère, pour éviter de se tromper de direction. Wiggins et O'Hare (O'Hare & Smitheram, 1995) ont retrouvé des résultats très proches. Ils ont établi une corrélation entre la performance de raisonnement, évaluée par la résolution de syllogisme, (*duncker's candle problem*), et la performance de pilotage. Ces résultats étaient vrais pour les pilotes novices mais pas pour les pilotes les plus expérimentés, ces derniers bénéficiant de l'expérience.

Dans un second temps, nous avons réalisé une régression linéaire exhaustive afin de tester la valeur prédictive d'un nombre plus restreint de variables et afin d'éviter les effets d'ordre générés par les régressions linéaire pas à pas ascendantes. En accord avec nos hypothèses initiales, en plus du raisonnement, nous avons sélectionné les trois FE de bas niveau (Miyake et al., 2000) évaluées par le pourcentage de bonnes réponses au 2-back (MAJ en MDT +maintien), les erreurs persévératives au Wisconsin (*set-shifting*) et le score d'interférence (inhibition). Nous avons également ajouté la rapidité psychomotrice, l'âge et l'expérience totale. Similairement à la première analyse, le raisonnement s'est avéré être le facteur le plus prédictif de la performance

de pilotage. De plus, l'expérience de vol et les capacités de MAJ et de maintien en MDT se sont également avérées être des variables prédictives. Ainsi, une augmentation de l'expérience de vol était un gage de meilleures performances à la tâche de pilotage. Il en allait de même pour les performances de MAJ et le maintien en MDT, également apparus comme étant cruciales à cette performance. Ces trois variables expliquaient à elles seules 44.51% du modèle. Taylor et collaborateurs avaient souligné dans une de leurs études que les mesures de la MDT et de la vitesse de traitement étaient les plus prédictives de la performance de pilotage sur simulateur. Nos résultats sont partiellement en accord avec cette étude puisque la vitesse de traitement ne s'est pas avérée être un prédicteur efficace. Cependant, l'échantillon de Taylor (2000) regroupait des pilotes allant de 50 à 69 ans et comprenait très certainement des participants dont la vitesse de traitement était plus faible. L'âge moyen de notre échantillon était relativement jeune (43.3 ± 13.6) et les performances cognitives retrouvées demeuraient dans l'ensemble correctes, au moins jusqu'à l'âge de 55 ans, ou nous l'avons vu, certains participants commençaient à présenter un déclin de la MDT et un ralentissement de la vitesse générale de traitement. Cette hétérogénéité des performances cognitives au cours du vieillissement a déjà été soulignée (Buckner, 2004; Hardy et al., 2007). Nos résultats semblent indiquer que l'âge comme seul prédicteurs de la performance de pilotage est très largement insuffisant. Schroeder (1999) dans un article de synthèse avait déjà émis de telles hypothèses et proposait une approche alternative consistant à examiner l'état neuropsychologique des pilotes plutôt que de prendre en considération l'âge réel.

V.2.3. Variables prédictives de la décision d'atterrir

L'analyse discriminante pas à pas ascendante a révélé que les performances obtenues au test du 2-back et l'expérience de vol totale étaient également prédictives de la décision erronée de poursuivre l'atterrissage en dépit des mauvaises conditions météorologiques. Muthard (2003) a évoqué dans une de ces études la grande difficulté rencontrée par certains pilotes à intégrer des modifications contextuelles critiques telles que la dégradation des conditions météorologiques. Le fait que la performance au 2-back soit significativement liée à la prise de décision erronée de poursuivre l'atterrissage va, selon nous, tout à fait dans le sens des propos de cet auteur. En effet, les capacités de MAJ en MDT peuvent conditionner la capacité à intégrer l'évolution de la météorologie, cette dernière se dégradant progressivement durant notre expérience. Par ailleurs,

la spécification technique précisant la tolérance maximale de l'appareil n'a probablement pas été récupérée en MDT, et n'a donc pas été portée à la pleine conscience des pilotes ayant poursuivi l'atterrissage. Lors de l'atterrissage, les pilotes devaient, en plus de la tenue des paramètres de vol, prendre en compte les informations du METAR (*meteorological airport report* – le bulletin météorologique de l'aérodrome), puis les mettre en regard des spécifications techniques de l'appareil. Cela consistait à réaliser un calcul mental pour déterminer la composante de vent traversier, retenir le résultat, et le comparer avec la vitesse de vent traversier maximale de l'appareil, comme spécifié dans le document technique fourni. C'est l'incapacité à récupérer des informations cruciales puis mettre à jour le contexte météorologique qui semble avoir conduit les pilotes à s'en tenir à la poursuite de l'atterrissage. Le raisonnement n'est pas incriminable puisque ce dernier, introduit dans le modèle, ne présentait pas d'effet significatif. Ce résultat offre un éclairage nouveau sur le syndrome *fascination de l'objectif* (ou *get-home-itis syndrome*) particulièrement dangereux en AC (Rhoda & Pawlak, 1999) et en AG, considéré pour cette dernière, responsable de plus de 41.5% des pertes humaines (BEA, 2000). La mesure de l'intégrité de la MDT des pilotes semblent être un enjeu majeur pour la sécurité aérienne puisque de nombreux travaux ont également démontré sa capacité à prédire la performance de pilotage (ex : Gregoire & Van Der Linden, 1997; Orsini et al., 1986; Taylor et al., 2007; Taylor et al., 2000; Verhaeghen, 1993; Yesavage et al., 1994) ou à effectuer des radiocommunications (Morrow et al., 2001; Morrow, Ridolfo et al., 2003; Taylor et al., 2005).

Le nombre total d'heures de vol était également prédictif de la qualité de la prise de décision. En effet, ce sont les pilotes les plus expérimentés qui ont posé un diagnostic juste en prenant en compte l'évolution des conditions météorologiques. De nombreuses expérimentations ont visé à comprendre la difficulté que peuvent rencontrer certains pilotes à réviser leur plan de vol (Goh & Wiegmann, 2001; Goh & Wiegmann, 2002; Muthard & Wickens, 2003; Orasanu et al., 2001), en particulier durant la phase critique de l'atterrissage (Dehais et al., 2003). Ces résultats sont tout à fait compatibles avec ceux de Wiegman (2002) qui a montré que le temps passé à voler dans des conditions météorologiques nécessitant normalement un déroutement immédiat était négativement corrélé à l'expérience des pilotes. L'explication avancée étant que l'expérience permet une évaluation plus juste et plus efficace de la situation.

Enfin, le niveau d'impulsivité motrice, propension habituelle d'un individu à agir avant d'avoir réfléchi pleinement aux conséquences de ses actes, était également un prédicteur pertinent de la décision d'atterrir. Ce résultat est original et ne semble à ce jour pas mis en avant dans d'autres études du domaine aéronautique. Sicard avait cependant montré que le niveau d'impulsivité évalué par le Barrat, était significativement plus élevé chez les pilotes de l'aviation militaire par

rapport à ceux de l'AC (Sicard, Taillemite, Jouve, & Blin, 2003). Selon l'auteur, cette augmentation de l'impulsivité est péjorative à la qualité des prises de décisions en raison de l'augmentation de la prise de risque qu'elle suppose. Cependant, contrairement à notre étude, l'expérience de Sicard n'a pas établi de liens clairs entre l'augmentation de l'impulsivité et la qualité des prises de décisions observées dans l'activité quotidienne des pilotes. Une étude de Goh (2001) montre que l'observation d'un excès de confiance est sept fois plus fréquemment citée, comme cause principale dans les catégories d'accidents où des pilotes ont continué à voler dans des conditions dégradées de type VFR-IMC (*Visual Flight Rules – Into instrument meteorological conditions*), en regard de tous les types d'accidents. Cela signifie que l'excès de confiance peut expliquer le fait que des pilotes volant à vue poursuivent le vol dans ces conditions VFR-IMC, nécessitant en théorie le recours à des instruments de vol. Des expérimentations menées en laboratoire ont montré que les pilotes acceptant de voler dans des conditions VFR-IMC s'auto évaluent comme plus habiles et comme ayant un meilleur jugement que ceux n'en commettant pas. Ainsi O'Hare et Smitheram (1995) soutiennent l'hypothèse selon laquelle les accidents, qui se produisent en condition dégradées de type VFR-IMC, sont dus en grande partie à de mauvaises appréciations du risque.

VI. CONCLUSION

Une première conclusion concerne les effets du vieillissement sur les performances exécutives de notre population de pilotes. En dépit d'un niveau d'éducation moyen très élevé (15.45 années \pm 2.06), les effets du vieillissement se sont manifestés à plusieurs niveaux : MDT, vitesse de traitement, et dans une moindre mesure, inhibition et flexibilité mentale. Le fait de constater cette chute, nonobstant un niveau d'éducation élevé, n'est pas si contre-intuitif que cela. En effet, Tucker-Drob (2009) a montré que l'éducation n'a pas d'effet neuroprotecteur. Selon l'auteur, l'éducation favorise des capacités de raisonnement supérieures à un âge avancé, mais n'a pas d'influence sur la vitesse du déclin cognitif. En d'autres termes, les meilleures performances apportées par le nombre d'années d'éducation sont la manifestation de la persistance de capacités cognitives déjà supérieures dans le passé.

Une deuxième conclusion concerne les effets du vieillissement sur la performance de pilotage. Ce paramètre, conformément à nos hypothèses, ne s'est pas avéré prédictif de cette performance. Il faut toutefois rappeler que notre échantillon était relativement restreint ($n=24$), avec un âge moyen relativement bas (42 ± 13.6) et comportait par exemple seulement sept participants de plus de cinquante-cinq ans (dont trois bénéficiant d'une expérience de pilotage élevée). L'absence d'effets de l'âge est donc un résultat à pondérer par toutes ces observations.

Une troisième conclusion concerne les autres prédicteurs de la performance de pilotage. La capacité de raisonnement s'est avérée être la variable la plus prédictive de cette performance, expliquant à elle seule 27.07% de la variation de cette variable dépendante. Un modèle plus ciblé comprenant un nombre plus restreint de variables a montré que l'ajout de l'expérience et des capacités de MAJ en MDT portait à 44.51% l'adéquation du modèle à la variation des performances de pilotage. Par ailleurs l'expérience de vol totale, les capacités de MAJ en MDT et l'impulsivité motrice se sont avérés être prédictives de la qualité de la prise de décision au moment de l'atterrissage. La matrice de classification montre que ces trois variables permettent au modèle de discriminer correctement 100% des pilotes ayant atterri et 91% des pilotes n'ayant pas atterri. L'effet de l'expérience est à rapprocher des hypothèses déjà évoquées dans la littérature, telles que l'évaluation du risque, plus efficace chez les pilotes expérimentés (2002). Nous émettons l'hypothèse que la prédictibilité de la performance de MAJ et de maintien en MDT sur la décision d'atterrir est en lien avec des perturbations de la récupération des limitations techniques de l'appareil (étudiées en début d'expérience), de l'intégration de l'évolution des

conditions météorologiques, la rétention des informations du message ATIS, ainsi que du rafraîchissement du modèle de situation, entravé par une MDT moins performante. Enfin l'impulsivité motrice est à mettre en lien avec l'augmentation de la prise de risque.

La compréhension des mécanismes cérébraux précis des erreurs de pilotage, et la possibilité de prédire leur occurrence chez un individu nécessite encore de nombreux progrès. Cependant, la définition de telles batteries de tests pouvant être administrées à des pilotes à l'occasion de leur contrôle médical obligatoire serait selon nous une avancée significative en termes de sécurité aéronautique, notamment lorsque de fortes lacunes exécutives sont observées. Un futur protocole pourrait étudier un plus grand panel de pilotes, intégrer des participants plus âgés et mieux contrôler le niveau d'expérience afin de pouvoir discriminer sans équivoque, les effets de celui-ci.

Cette recherche a été co-financée par le GIS Longévité dans le cadre du projet "Intelligence Artificielle et évaluation des fonctions exécutives dans le vieillissement normal et pathologique : des pilotes d'avion aux patients MCI" et par la Région Midi-Pyrénées : contrats DAER-Recherche 03012000 et DAER-Recherche 05006110.

« J'ai remarqué que plus on est envahi par le doute, plus on s'attache à une fausse lucidité d'esprit avec l'espoir d'éclaircir par le raisonnement ce que le sentiment a rendu trouble et obscur. »
Alberto Moravia, *le Mépris* (Jean-Luc Godard, 1963).

Chapitre 2.

Influence de la récompense et de l'incertitude sur la prise de décision

I. Résumé

Contexte : L'analyse d'événements aériens montre que les pilotes de l'aviation civile ont tendance à persister à poser leur appareil alors que les conditions météorologiques nécessiteraient une remise de gaz ou un déroutement sur un autre aéroport. Ce comportement semble influencé par différents facteurs, dont la pression financière exercée par la compagnie aérienne. Notre hypothèse est que cette pression va moduler les circuits cérébraux de l'émotion et de la récompense et influencer les décisions en raison notamment des interactions existantes entre le CPFDL et le CPFVM.

Méthodes : Les participants sont placés dans une situation proche de celle de l'atterrissage dans laquelle, à la fois l'incertitude sur l'issue de la décision (probabilité de crash) et la conséquence financière de la décision (atterrissage/remise des gaz) sont manipulées. La prise de décision s'effectue à partir des informations fournies par une représentation simplifiée de l'ILS (Instrument Landing System, instrument d'aide à l'atterrissage). Une première expérimentation avec 16 participants a été réalisée avec différentes mesures psychophysologiques (réponse électrodermale, rythme respiratoire, rythme cardiaque, oculométrie). Une deuxième expérimentation utilisant l'IRMf est en cours et seuls des résultats préliminaires sont rapportés.

Résultats : Les données comportementales ont montré que les participants prenaient plus souvent la décision risquée d'atterrir dans la condition où la récompense était manipulée que dans la condition neutre, où aucune récompense n'était attribuée. Ceci était particulièrement vrai

lorsque l'incertitude était la plus forte. Les données psychophysologiques ont montré que ce biais dans la prise de décision s'accompagnait d'une augmentation du rythme cardiaque. En neuroimagerie, la prise de décision réalisée en condition neutre se traduisait par une augmentation de l'activité du CPFDL droit et des régions occipitales, tandis que, sous l'influence du facteur financier, l'activité du CPFVM était significativement plus importante (Causse, Dehais et al., 2009). Les aires visuelles primaires (V2) étaient également plus actives lorsque le raisonnement s'effectuait en absence du facteur financier.

Discussion : Les résultats montrent l'efficacité de l'enjeu monétaire à biaiser la prise de décision vers un comportement plus risqué et moins rationnel d'un point de vue de la sécurité. Les données préliminaires de neuroimagerie révèlent une bascule entre le CPFDL en condition neutre et le CPFVM sous incitation monétaire, analogue à celle observée dans la bascule entre raisonnement rationnel et raisonnement émotionnel (Goel & Dolan, 2003). De plus, l'observation de la modulation de l'activité des aires visuelles secondaires permet d'avancer l'hypothèse de perturbations *top-down* provoquées par le facteur financier. Enfin, les données cardiaques confirment que la modification de la prise de décision était au moins en partie liée à une pression de nature émotionnelle.

II. Introduction

L'atterrissage est une phase de vol particulièrement critique qui implique des séquences d'actions formalisées (sortir le train, sortir les volets etc.), le passage par des points géographiques bien précis (ex : balises) et des processus de prise de décision basés sur des éléments rationnels (ex : prise en compte du vent traversier maximum accepté par l'appareil). Cependant, l'incertitude peut être forte et un certain nombre de biais de raisonnements peuvent altérer la pertinence des décisions prises par l'équipage. En effet, la cause de nombreux crashes au cours de l'atterrissage réside dans la persistance de l'équipage dans la décision d'atterrir alors qu'une remise de gaz serait nécessaire, ceci afin de tenter une nouvelle approche ou afin de se détourner sur un aéroport aux conditions météorologiques plus favorables. Une étude de Rhoda et Pawlak (1999) portant sur deux-mille approches montre que 2/3 des équipages persévèrent dans leur décision d'atterrir alors que plusieurs paramètres de sécurité minimums ne sont pas respectés (météorologie, état de l'aéronef etc.). Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce phénomène (voir partie 1 chapitre I). Nous nous intéressons ici particulièrement à deux d'entre eux : l'incertitude, génératrice de stress, et la pression de la compagnie, qui pousse certains équipages à refuser une remise de gaz très coûteuse en temps et en argent. Le spectre des différentes situations négatives/aversives pouvant émaner de la remise de gaz conjugué au stress de l'atterrissage conduit les pilotes à bien souvent trancher en faveur de la décision de poursuivre l'atterrissage, parfois au prix d'un risque important. Une explication neurologique de certains de ces phénomènes peut résider dans l'altération temporaire des FE. Les FE, chef d'orchestre du cerveau humain, sont sensibles au stress et à l'émotion et cette interpénétration entre cognition et émotion semble liée en partie aux relations entre deux structures du cortex préfrontal : le CPFDL, « rationnel », et le CPFVM, « affectif » et fortement connecté au système limbique, responsable des processus émotionnels. Différentes études en imagerie cérébrale étayent désormais cette hypothèse (Goel & Dolan, 2003; Simpson et al., 2001a).

Nous avons mis au point un protocole expérimental visant à moduler la prise de décision de participants confrontés à une situation proche de celle de l'atterrissage par un facteur émotionnel bâti sur une matrice de paiement récompensant l'atterrissage et punissant la remise de gaz. Cette matrice de paiement reproduit les différentes pressions, en particulier financières, rendant la remise de gaz aversive. La prise de décision s'effectue en fonction de la configuration visuelle d'un instrument issu d'interfaces d'avions de ligne alors que les activations cérébrales générées par ces décisions sont mesurées en IRMf. L'étude a également été répliquée en psychophysologie afin

d'observer notamment les modifications du SNA induites. L'étude en IRMf est réalisée à la Fondazione Santa Lucia à Rome, en collaboration avec l'équipe du Pr Sabatini.

Trois objectifs principaux sont visés par cette expérimentation :

- Etudier l'influence de la récompense et de l'incertitude sur la prise de décision dans une situation aéronautique. Nous émettons l'hypothèse que l'incertitude et l'incitation financière devraient provoquer chez les participants un comportement analogue à celui de pilotes sous l'influence des différents facteurs énumérés plus haut ;
- Observer les modifications de l'activité du SNA sous l'influence de l'enjeu financier afin de mesurer les implications émotionnelles de l'incitation financière. En particulier, nous faisons l'hypothèse du passage d'une prise de décision rationnelle « à froid », à une prise de décision émotionnelle « à chaud », sous l'effet de l'incertitude et la récompense ;
- Déterminer les réseaux cérébraux impliqués dans ce basculement entre prise de décision à froid/prise de décision à chaud. En particulier, nous faisons l'hypothèse qu'une bascule des activations entre le CPFDL et le CPFVM devrait sous-tendre la modification de comportement et le passage à un état émotionnel (Goel & Dolan, 2003).

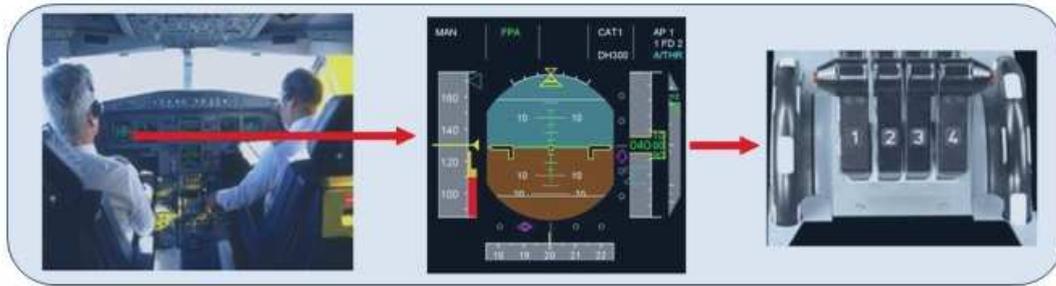
III. Matériel et méthodes

III.1. La tâche

III.1.1. De l'avion au laboratoire

La tâche était basée sur une reproduction simplifiée d'un véritable instrument de vol, l'ILS. Les participants étaient informés qu'ils étaient aux commandes d'un avion en phase d'atterrissage et que tout comme les pilotes, ils avaient la possibilité d'annuler l'atterrissage s'ils estimaient que les conditions de sécurité n'étaient pas réunies. La décision reposait en particulier sur deux éléments : le *localizer* qui fournit l'écart horizontal de l'avion par rapport à l'axe de la piste et le *glide path* qui affiche l'écart de l'avion par rapport à la pente nominale de descente. Ces informations sont fournies par deux losanges en fonction de leur position sur leur axe respectif (horizontal et vertical, situés en bas et à droite de l'horizon artificiel). Il était expliqué aux participants que les conditions de sécurité étaient correctes quand les deux losanges étaient centrés sur leurs axes respectifs ; plus les losanges étaient éloignés du centre de leurs axes, plus grand était le risque de rater l'atterrissage et de faire une sortie de piste. Pour chaque essai, le participant indiquait sa réponse sur un des deux boutons d'un boîtier de réponse (Fig. 47). Une première variable indépendante, le niveau d'incertitude de la situation, comportait deux modalités. La position des losanges, plus ou moins ambiguë déterminait si le stimulus était à incertitude faible ou élevée. Une deuxième variable indépendante était manipulée : l'incitation monétaire. Soit la tâche était réalisée de façon neutre (condition Neutre) soit elle était exécutée sous l'influence d'un enjeu financier (condition Money). La tâche était organisée en un ensemble de runs (suite d'essais sans pause), chaque run ne comportant qu'une seule condition d'incitation monétaire mais au sein duquel le niveau d'incertitude était manipulé selon les deux modalités.

Environnement réel



Environnement expérimental

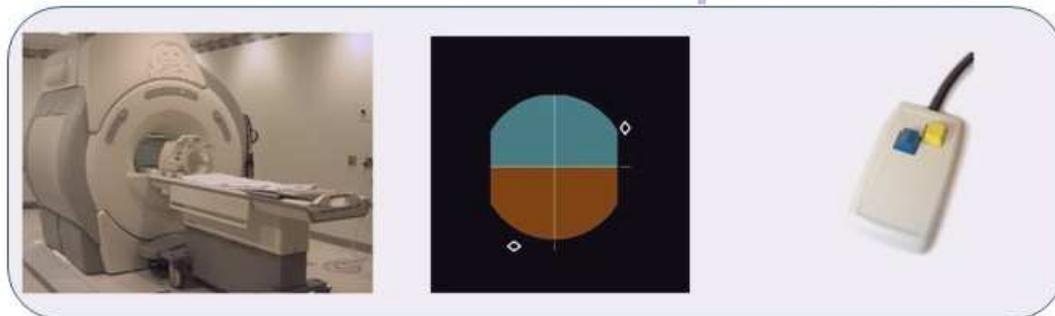


Fig. 47 : Reproduction simplifiée de la prise de décision lors de l'atterrissage. Dans la partie supérieure, l'environnement réel, de gauche à droite : le PFD (Primary Flight Display) au sein du cockpit, le PFD réel en gros plan avec les deux losanges de l'ILS (en rose), la manette des gaz. Dans la partie inférieure, l'environnement expérimental avec de gauche à droite : l'IRMf, le PFD simplifié (uniquement l'ILS, représenté par les deux losanges blancs, était conservé) et le boîtier de commande, reproduisant la manette des gaz du dessus, permettant de choisir d'atterrir ou de remettre les gaz.

III.1.2. Stimuli

III.1.2.1. L'ILS

Les stimuli sur lesquels repose la prise de décision sont présentés sur un ordinateur portable. Ils sont basés sur la reproduction simplifiée (résolution : 480*480) d'une phase d'atterrissage se réalisant sans aucune visibilité extérieure. Le niveau d'incertitude est manipulé en fonction de la position des losanges. Une catégorisation binaire rend compte du niveau d'incertitude : basse incertitude et haute incertitude.

- Pour les situations de basse incertitude, la prise de décision est simple : soit les losanges sont placés très loin du centre de leur axe, ce qui se traduit par une probabilité de réussir l'atterrissage de 0%, soit ils sont placés très près, ce qui donne une probabilité de réussir l'atterrissage de 100% ;
- Pour les situations de haute incertitude, la position des losanges est ambiguë, ils ne sont ni très éloignés, ni très près du centre de leur axe. La probabilité de réussir un atterrissage est dans ce cas de 50%.

Un système de points a permis de générer de très nombreux stimuli, ainsi, le participant ne revoit la même situation que deux fois : une fois sans incitation financière, une fois avec la présence de l'incitation financière. Chaque axe est gradué de 16 points, à gauche et à droite de son centre. Les stimuli sont catégorisés par la somme des points des deux axes qui sont fonction de la position de chaque losange. Plus le losange s'éloigne de son centre, plus le nombre de points augmente et plus faibles sont les chances d'atterrir avec succès (Fig. 48).

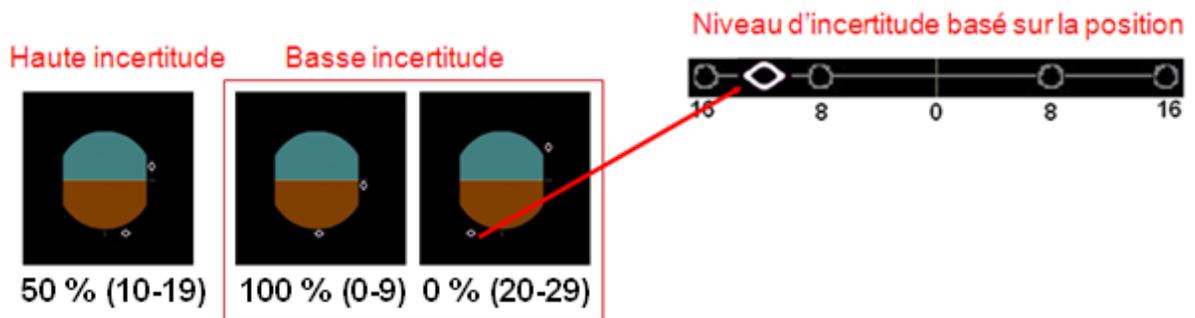


Fig. 48 : Catégorisation du niveau d'incertitude en fonction de la position des deux losanges sur leurs axes. Le score est basé sur la somme des points des deux axes (le grossissement ne fournit ici que le score d'un losange, les repères n'étaient pas affichés pendant l'expérimentation). La position des losanges est contrebalancée horizontalement et verticalement sur l'ensemble de l'expérimentation pour éviter les effets de latéralité. L'ordre de présentation des stimuli est randomisé.

III.1.2.2. Les feedbacks

Après chaque réponse, le participant reçoit un feedback l'informant que sa décision était soit correcte (*OK*, pour un atterrissage réussi ou une remise de gaz justifiée) ; soit incorrecte (*NO*, pour un atterrissage manqué ou une remise de gaz injustifiée). Pour les conditions avec incitation monétaire, un deuxième feedback délivre les conséquences financières de la décision qu'il vient de prendre. Durant ce feedback, une pièce de monnaie ou un billet est affiché ainsi que le symbole + ou – selon qu'il s'agit d'une perte ou d'un gain (Fig. 49). Si le participant ne répond pas dans le temps imparti, la mention *trop tard* apparaît et est suivie d'une punition monétaire pour la condition avec incitation. Enfin, un feedback global informant du pourcentage total de bonnes réponses est affiché à la fin de chaque run. Cette information correspond au « score sécurité » que le participant a été capable d'atteindre. Pour les conditions avec incitation monétaire, un feedback financier global apparaît également et informe de la quantité totale d'argent remportée ou perdue. Ce dernier feedback correspond au « score financier ». Les deux totaux, sécurité et financier, ne sont pas nécessairement liés, la matrice de paiement favorisant plutôt la prise de risque.



Fig. 49 : Les différents feedbacks affichés pour les conditions sans et avec incitation financière. Durant l'expérience, le feedback monétaire n'est pas affiché en même temps que le feedback informant de la justesse (*OK/NO*). Il est affiché juste après celui-ci.

III.1.2.3. La matrice de paiement

Les situations aversives rencontrées au cours d'une remise de gaz ont été reproduites par une matrice de paiement administrée au cours de la condition avec incitation (Fig. 50). Cette matrice favorise l'acceptation des atterrissages et pénalise les remises de gaz. Tout d'abord, chaque remise de gaz, est systématiquement sanctionnée par une punition financière, moins importante toutefois quand elle est justifiée que si elle ne l'est pas. Cette systématisation de la punition de la remise de gaz reproduit les pressions pesant sur les décisions des pilotes en condition réelle. En effet, une remise de gaz, même justifiée, se traduit par des sanctions éventuelles, une potentielle prise de risque, un coût supplémentaire en carburant et un retard des passagers, sans parler de l'anxiété que cela peut provoquer chez ces derniers. Dans l'expérimentation, un atterrissage réussi est récompensé par une somme d'argent. Ainsi dans notre matrice de paiement, un atterrissage réussi rapporte 5 euros, un atterrissage rude/manqué est puni de 2 euros, et une remise gaz fait perdre soit 2 euros si elle justifiée, soit 5 euros si le participant aurait dû se poser. De plus, si le participant ne répondait pas à temps, il perdait également 2 euros. Nous avons fait le choix de punir davantage une remise de gaz injustifiée qu'un atterrissage erroné pour deux raisons. La première est liée au poids relatif des pressions exercées sur le pilote. La sortie de piste est un événement relativement peu plausible aux yeux du pilote, et l'analyse des approches non stabilisées confirme que les accidents sont rares malgré des prises de risques exagérées (Rhoda & Pawlak, 1999). En revanche, la remise de gaz a des conséquences négatives immédiates et inévitables (anxiété des passagers, problème avec la compagnie etc.). La seconde raison est technique. Nous ne pouvions reproduire la rareté des accidents dans une expérimentation IRMF, car l'activation trop faible due à ces événements trop rares ne parviendrait pas à émerger

statistiquement. Nous avons donc choisi d'attribuer des valeurs de punitions et de récompenses modulées par la plausibilité de l'apparition des événements auxquelles elles sont associées.

	Situation	GO	GO-A
Décision			
GO		+5	-2
GO-A		-5	-2

Fig. 50 : Matrice de paiement récompensant ou punissant les participants en fonction de la situation présentée et de la décision des participants (GO = « atterrissage », GO-A = « remise de gaz »).

III.1.3. Design expérimental de l'étude IRMf

Nous avons mis au point un plan factoriel 2*2 croisant l'incitation monétaire (présence et absence) et l'incertitude (élevée, 50% de chance de rater l'atterrissage, faible 100%/0% de chance de rater l'atterrissage). L'affichage des stimuli et l'acquisition des données sont réalisées avec le logiciel *Cogent 2000 v125* fonctionnant dans l'environnement Matlab (Matlab 7.2.0.232, R2006a, *The MathWorks*, USA). Un total de quatre runs est présenté aux participants, deux avec incitation, deux sans incitation financière (4 runs*40 stimuli). Les situations 0% et 100% sont répétées quarante fois chacune, les situations 50% sont répétées quatre-vingt fois, ce qui représente un total de 160 stimuli et une distribution à 50/50 entre haute et faible incertitude. L'ordonnement dans lequel les runs sont présentés est contrebalancé pour éviter les effets d'ordre (Fig. 51).

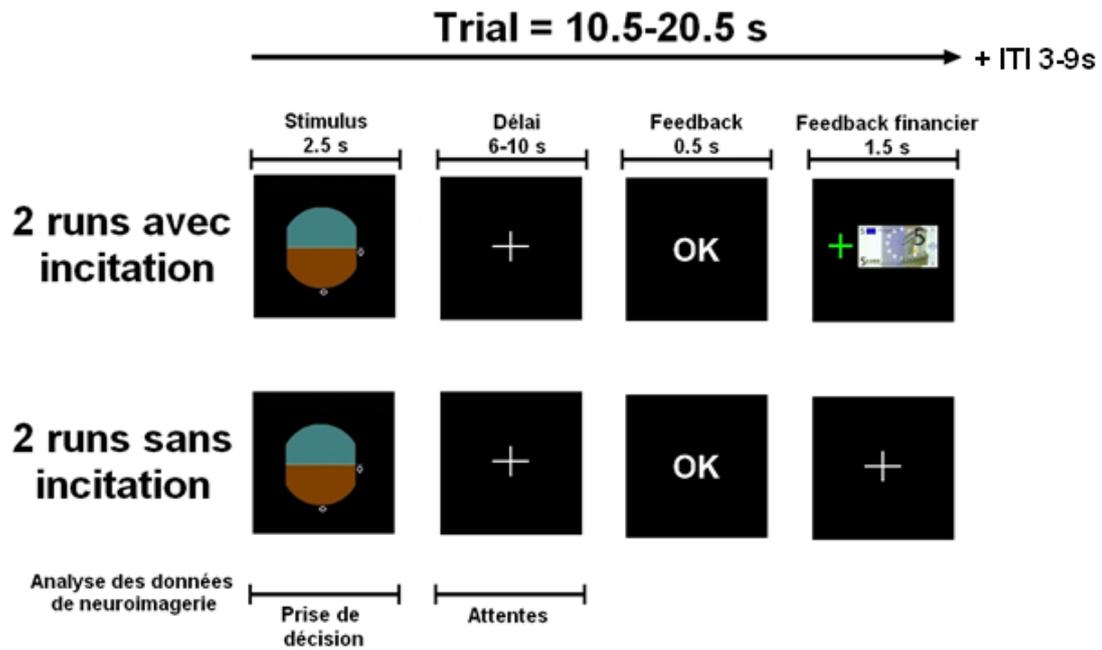


Fig. 51 : Design expérimental : un total de quatre runs est présenté (160 essais), deux runs neutres et deux runs avec incitation monétaire. Les trois probabilités de réussir l’atterrissage (0%, 50%, 100%) sont caractérisées par la position des losanges des stimuli. Les probabilités sont inconnues du participant. Chaque essai consiste en la présentation du stimulus (2.5s) durant lequel le participant prend sa décision (atterrir ou non) à l’aide du boîtier de réponse suivi d’un délai variable pendant lequel est affiché une croix de fixation (6-10s) puis d’un feedback informant de la justesse ou non de la réponse (0.5s) et enfin de l’affichage du feedback monétaire, {-5}, {-2} ou {+5} en fonction de la décision (1.5s). Ce dernier feedback n’existe que pour les deux runs avec incitation, la croix de fixation étant affichée pendant la même durée pour les runs sans incitation. Enfin, un ITI (*Inter Trial Interval*) variable sépare les différents essais. Le long délai entre 1^{er} stimulus et le feedback permet de distinguer la réponse hémodynamique associée à la prise de décision de celle associée à l’incertitude vis-à-vis de la récompense, ceci afin de permettre l’analyse des attentes de la récompense.

Avant de réaliser l’expérience proprement dite, les participants effectuaient l’équivalent de deux runs (Neutre et Money) afin de se familiariser avec la tâche et le système de récompense. La tâche d’entraînement est identique à celle effectuée en IRMf, à la différence que les délais et ITI sont fixes (respectivement 6 et 3 secondes).

IV. Expérimentation en psychophysiology

L'expérimentation a été menée indépendamment de l'étude IRMf, sur une population de participants différente, avec des mesures psychophysiology afin d'ajouter des corrélats plus périphériques aux données de neuroimagerie.

IV.1. Design expérimental de l'étude psychophysiology

Quelques modifications mineures ont été apportées au design expérimental par rapport à l'étude IRMf. Les durées des délais entre les stimuli étaient fixes et non plus variables. Elles ont été portées à dix secondes entre le stimulus et le feedback et dix secondes également pour l'ITI. Ces longues durées étaient nécessaires pour permettre le développement complet de la réponse électrodermale. Par ailleurs, en psychophysiology, il n'est pas indispensable de répéter autant de fois une même condition qu'en neuroimagerie. Les participants n'ont en conséquence réalisé que les deux premiers runs dont l'ordre de passation a été contrebalancé. De la même façon que pour l'expérience IRMf, les participants effectuent l'équivalent de deux runs pour se familiariser avec la tâche et le système monétaire. A la fin du run comportant l'enjeu financier (Money), il était demandé aux participants d'évaluer, sur une échelle de 1 à 9, dans quelle mesure la pression financière avait pesé dans leurs décisions.

IV.2. Participants

Seize participants en bonne santé (treize hommes ; âge moyen 20.3 ± 1.25), non pilotes, ont été recrutés parmi une population d'étudiants. Un rapide entretien a permis de s'assurer qu'ils étaient tous exempts de déficits sensoriels, neurologiques, psychiatriques, qu'ils ne présentaient vraisemblablement pas de désordres émotionnels et qu'ils n'étaient pas sous l'influence de substances capables d'agir sur le système nerveux central. Tous les participants étaient latéralisés

à droite. Pour s'en assurer, l'*Edinburgh Handedness Inventory* (Oldfield, 1971) a été employé. Les sujets étaient indemnisés et ils étaient informés qu'ils recevraient une somme d'argent minimale pour leur participation (sept euros), et que cette somme pouvait être majorée de façon proportionnelle aux gains remportés pendant la tâche (jusqu'à trente euros, mais en réalité tous les participants recevaient cette somme maximale).

IV.3. Mesures psychophysiques

Les participants sont confortablement installés dans une pièce de l'ISAE prévue à cet effet. Elle est calme et offre un éclairage constant. Le *ProComp Infiniti* (©Thought Technology Ltd.) a été utilisé pour réaliser les mesures psychophysiques (Fig. 52). La fréquence d'échantillonnage sélectionnée pour la génération des données était de 8hz pour l'ensemble des canaux, ce qui est suffisant pour le type de mesures réalisées : la résistance électrodermale, la respiration et le rythme cardiaque. Les données ont été filtrées pour éliminer les artefacts. Avant le début de l'expérimentation proprement dite, il est demandé au participant de se relaxer durant trois minutes afin d'obtenir son état physiologique de repos (baseline).



Fig. 52 : Illustration du *ProComp Infiniti* (©Thought Technology Ltd.) utilisé durant cette expérimentation. Il est possible de brancher jusqu'à huit capteurs en parallèle.

IV.3.1. La réponse électrodermale

Le niveau de conductance électrodermale tonique (*Skin Conductance Level, SCL*) et la réponse électrodermale (*skin conductance response, SCR*), exprimés en micro Siemens (μS), ont été enregistrés en continu durant l'expérimentation (Fig. 53). Ce sont des mesures fiables de la modulation tonique ou transitoire du niveau d'éveil du SNA (Nagai & Critchley, 2006). Suivant les informations fournies par Dawson et al. (Dawson, Schell, & Filion, 2000), la réponse électrodermale a été calculée comme suit (ou G est la valeur de la conductance électrodermale et T_s le temps de présentation du stimulus) : $G_{\max} [t_s + 3; t_s + 7] - G_{\min} [t_s - 3; t_s - 1]$. Le niveau minimum intervenant 1-3 secondes avant le stimulus est retranché à la valeur maximale intervenant 3-7 secondes après le stimulus, l'absence de réponse ainsi que les réponses négatives ont été codées par la valeur 0.



Fig. 53 : Capteur utilisé pour réaliser la mesure de la résistance électrodermale. Il se compose de deux électrodes apposées sur la pulpe de deux doigts afin de mesurer en continu le niveau de conductance électrodermale, l'individu étant considéré comme une résistance variable.

IV.3.2. La respiration

L'activité respiratoire a été enregistrée tout au long de l'expérimentation (Fig. 54). Le signal respiratoire est dérivé de l'enregistrement de l'expansion poitrinaire et constitue un indice potentiel de la consommation d'oxygène, et donc de l'activité physique, intellectuelle ou émotionnelle (Masaoka & Homma, 1997). Nous avons collecté l'amplitude respiratoire (AR), une mesure relative, sans unité précise, et le rythme respiratoire (RR), exprimé en inspiration/expiration par minute.



Fig. 54 : L'activité respiratoire (fréquence et amplitude) est enregistrée à l'aide de cette ceinture placée au niveau du thorax. Elle est sensible aux expansions/contractions poitrinaires.

IV.3.3. Le rythme cardiaque

Le rythme cardiaque (RC) a été mesuré grâce à des électrodes disposées sur la poitrine des participants (Fig. 55). Le signal ECG brut recueilli est converti en mesure de l'IBI (*Inter Beat Interval*), qui offre une indication continue sur le rythme cardiaque. La mesure de la variabilité cardiaque selon différentes fréquences (HRV) est également possible.

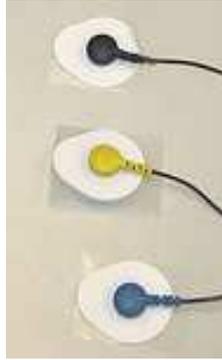


Fig. 55 : Electrodes employées pour enregistrer l'activité cardiaque. Elles sont disposées sur la poitrine préalablement préparée à l'aide d'une pate abrasive.

IV.3.4. L'oculométrie

Un oculomètre type L développé par la société *Pertech*® (dit « tête porté ») a été employé pour réaliser les mesures oculométriques (Fig. 56). Il est équipé d'un capteur monoculaire. Son poids est inférieur à quatre-vingt grammes, ce qui le rend très discret. Il possède une précision de 0.25 degrés et est échantillonné à 25Hz (une mesure/40 millisecondes). Les variables collectées étaient le nombre et la durée des fixations. Elles offrent un indice des stratégies visuelles mises en œuvre lors de l'analyse des stimuli.

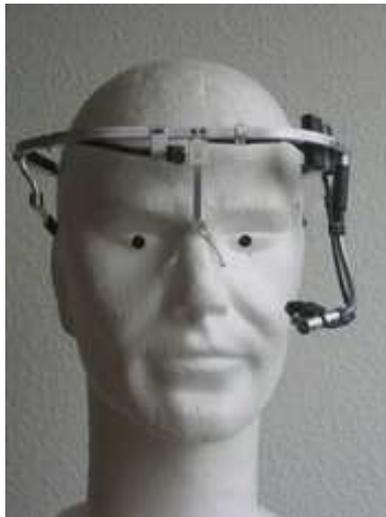


Fig. 56 : Oculomètre type L de la société *Pertech*®. Il s'agit d'un oculomètre tête porté, contrairement aux caméras oculaires, il permet d'enregistrer l'activité visuelle même lorsque le participant détourne largement la tête de l'écran.

IV.4. Résultats

IV.4.1. Résultats comportementaux

Toutes les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica 7.1 (© StatSoft). L'examen des effets de l'incitation financière (Neutre et Money), du niveau d'incertitude (faible et élevé) et de leurs interactions sur les TR et les pourcentages d'atterrissages a été réalisé par des ANOVA à mesures répétées (niveau d'incertitude*type d'incitation monétaire). Le type de stimulus étant imbriqué avec le niveau d'incertitude, nous avons réalisé des ANOVA à mesures répétées différentes pour évaluer l'effet du type de stimulus (0%, 50% et 100%) et de incitation financière sur les mêmes variables dépendantes (type de stimulus*type d'incitation monétaire). Bien que les stimuli 0% et 100% soient catégorisés tous deux à « faible incertitude », nous avons mené cette analyse pour observer les éventuels différences comportementales et physiologiques qu'ils pouvaient générer. Voir Tableau 7 et Tableau 8 pour synthèse. Enfin, des corrélations de Bravais-Pearson ont été employées pour estimer le niveau d'adéquation entre l'autoévaluation du niveau ressenti d'influence de l'incitation monétaire sur les prises de décisions et leur traduction effective au niveau des résultats comportementaux.

IV.4.2. Effets du niveau d'incertitude sur les temps de réactions

L'ANOVA a révélé un effet global (avec et sans enjeu financier) de l'incertitude (Fig. 57) sur les TR ($p < .001$, $F(1,14) = 45.539$). La condition faible incertitude prend en compte les deux types de stimuli à faible ambiguïté (0% et 100% de chance de réussir l'atterrissage). La condition à incertitude élevée prend simplement en compte les stimuli à forte ambiguïté (50% de chances de réussir l'atterrissage). Cet effet démontre l'élévation du temps mis pour réaliser la prise de décision lorsque l'ambiguïté est importante.

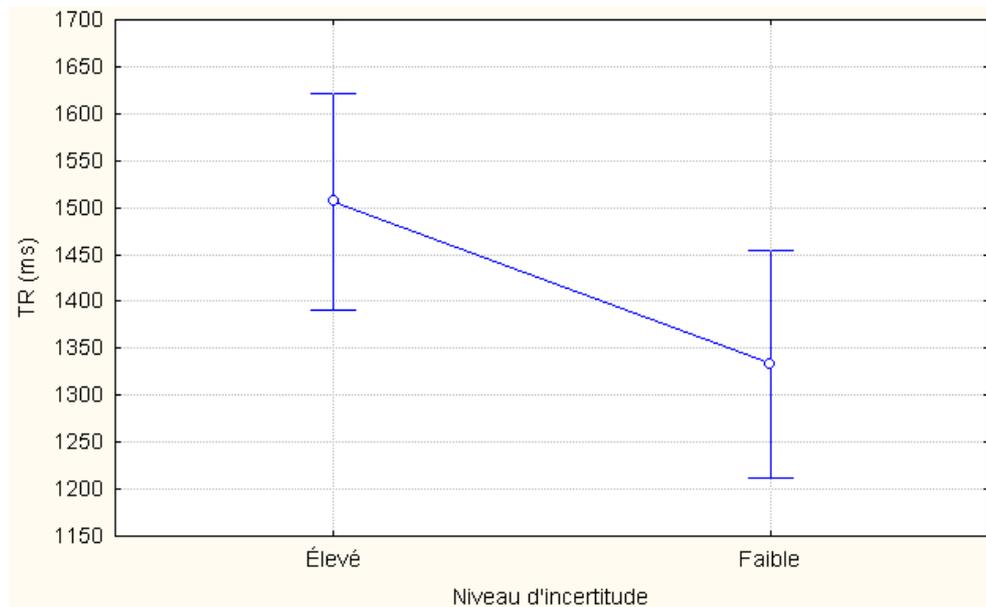


Fig. 57 : Temps de réactions en fonction du niveau d'incertitude pour les deux niveaux d'incitation monétaire confondus (run Neutre et Money).

IV.4.3. Effets de l'enjeu sur les temps de réactions

L'effet global de l'enjeu financier (niveaux d'incertitudes faibles et élevés confondus) sur les TR est également significatif ($p=.001$, $F(1,14)=16.143$). En présence de l'enjeu financier, les temps consacrés aux processus de prises de décisions sont réduits, voir Fig. 58. L'ANOVA portant sur les effets de l'enjeu en fonction des stimuli montrent une interaction significative ($p=.001$, $F(2,28)=6.826$). En particulier, le test Post-Hoc du LSD de Fisher réalisé sur les six type de stimuli révèle que les décisions sont prises plus rapidement sous l'effet de l'enjeu financier pour les stimuli 100% ($p=.001$) et 50% ($p=.004$) mais pas en présence des stimuli 0% ($p=.263$). Vraisemblablement, la réduction des TR sous l'effet de l'incitation financière est associée à la décision d'atterrir et non pas à celle de remettre les gaz, c'est à dire lors de la condition 0% (Fig. 59).

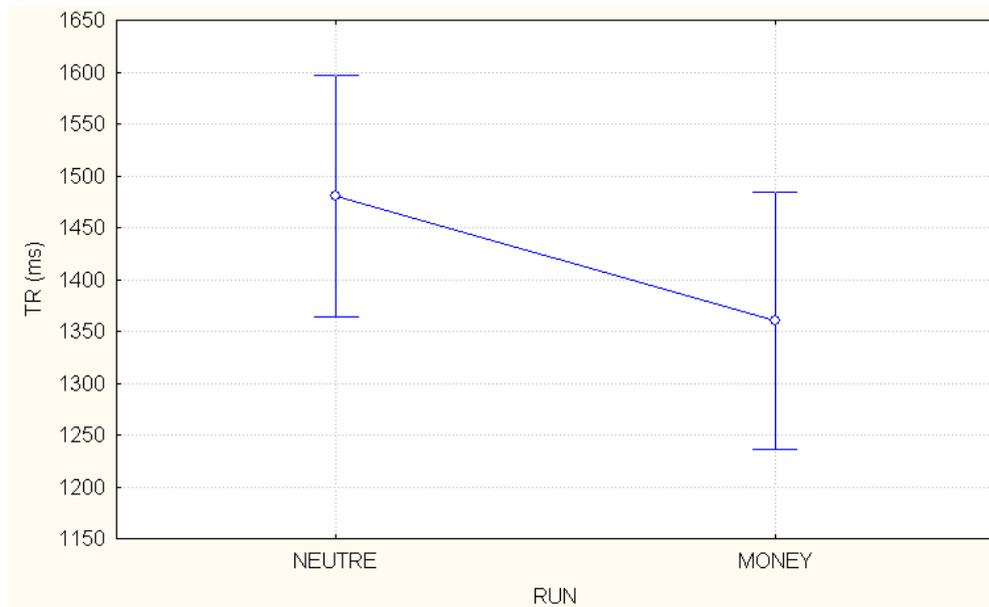


Fig. 58 : Temps de réactions globaux en fonction du type d'incitation monétaire (run Neutre ou Money).

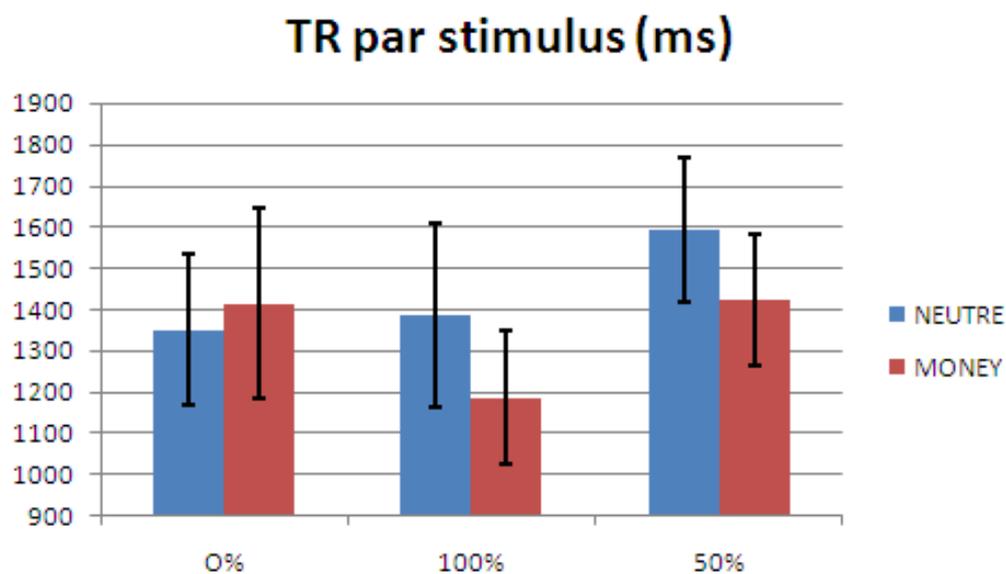


Fig. 59 : Temps de réactions en fonction des trois type de stimuli (0%, 100% et 50%) pour les deux conditions d'incitation financière (runs Neutre et Money). Les TR sont significativement plus courts sous l'effet de l'enjeu financier pour les stimuli 100% et 50%. Ce n'était pas le cas lorsque les stimuli étaient nécessairement associés à une remise de gaz, les stimuli 0%.

IV.4.4. Effets de l'enjeu sur les prises de décisions

Il est intéressant de noter que les résultats des corrélations de Bravais-Pearson montrent que le niveau d'influence de l'incitation monétaire sur les décisions, tel qu'il est auto-évalué par les participants, n'était pas significativement corrélé à l'augmentation effectivement observée du pourcentage d'acceptation des atterrissages entre le run Neutre et le run Money ($p=.578$, $r=+.17$). Par ailleurs, l'ajout de l'ordre de passation des runs en prédicteur catégoriel ne se traduisait pas par une modification significative des prises de décisions : le fait de commencer par le run Neutre ou Money n'affectait pas significativement le biais à atterrir en présence de l'enjeu ($p=.894$).

Comme attendu, les analyses des réponses montrent que l'incitation monétaire modifie significativement la prise de décision. Le test du LSD de Fisher indique que le pourcentage d'acceptation d'atterrissage a significativement augmenté durant tous les types de stimuli 0% ($p=.048$), 100% ($p=.008$) et 50% ($p=.001$). Contrairement à nos attentes, l'enjeu financier a également modifié le profil des prises de décisions réalisées sous faible incertitude (Fig. 60), c'est-à-dire les stimuli 0% et 100%. Le total des gains financiers moyen était de 39.31 euros (± 11.42).

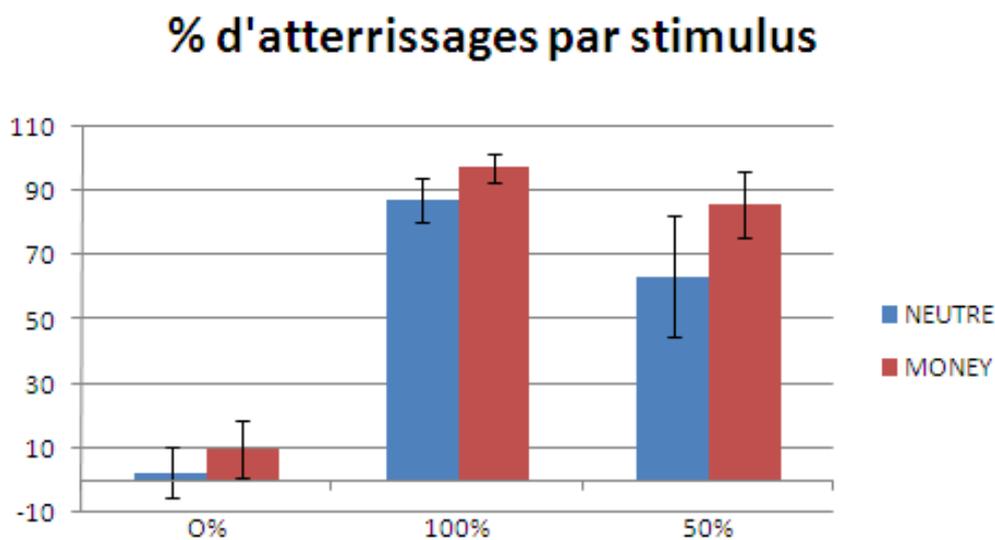


Fig. 60 : Pourcentages d'atterrissages en fonction des trois conditions (0%, 100% et 50%) pour les deux type d'incitation financière (runs Neutre et Money).

Tableau 7 : TR et pourcentages d'atterrissages acceptés moyens en fonction du niveau d'incertitude pour les conditions avec et sans incitation monétaire. Les données correspondant à la condition faible incertitude sont les valeurs moyennes des stimuli 0% et 100%.

TRs (en ms)	Incertitude faible		Incertitude élevée
	0%	100%	50%
Proba. de réussir l'atterrissage			
Incitation monétaire			
Sans incitation	1351.06 (±184.85)	1385.63 (±221.59)	1592.43 (±174.45)
Avec incitation	1415.03 (±231.92)	1186.56 (±160.46)	1421.34 (±158.44)

Atterrissages acceptés (en %)	Incertitude faible		Incertitude élevée
	0%	100%	50%
Proba. de réussir l'atterrissage			
Incitation monétaire			
Sans incitation	2.66 (±7.98)	87.33 (±7.03)	63.66 (±19.12)
Avec incitation	10 (±8.94)	97.5 (±4.47)	85.9375 (±10.03)

Tableau 8 : Effets des variables indépendantes sur les TR et pourcentages d'atterrissages (* ≤.05 ; ** ≤.01 ; *** ≤.001).

Prédicteurs	Type de stimulus	Niveau d'incertitude	Enjeu	Type de stimulus *	Niveau d'incertitude	
				Enjeu	* Enjeu	
TR	<i>p</i>	<.001***	<.001***	.001***	<.001***	.067
	F	22.099	45.539	16.143	6.826	3.930
% Atterrissage	<i>p</i>	<.001***	/	<.001**	.013**	/
	F	802.109	/	20.242	5.079	/

V. Résultats psychophysiologicals

En raison de problèmes techniques, les données psychophysiologicals et oculométriques n'étaient disponibles que pour quinze participants au lieu de seize. Un premier niveau d'analyse réalisé sur la moyenne de chaque paramètre physiologique au cours de la baseline et de chaque run complet a permis d'évaluer l'effet global de la tâche. Ensuite, une ANOVA à mesures répétées a été utilisée pour chaque variable physiologique sur les valeurs moyennes obtenues au cours de chaque run rapportées à la valeur de repos (valeur delta). Cette analyse permet d'évaluer l'effet de l'incitation monétaire, tout niveau d'incertitude compris. Comme pour les données comportementales, nous avons également réalisé des ANOVA à mesures répétées supplémentaires afin de comparer les réponses physiologiques élicitées par les différents types de stimuli (0%, 50% et 100%). Pour cette dernière analyse, les données prises en compte concernent la moyenne des valeurs allant du T0 de la présentation de chaque stimulus à 10 secondes après ce dernier. Voir Tableau 9 pour synthèse²³.

V.1. La réponse électrodermale

L'évolution du niveau tonique de la conductance électrodermale a été mesurée via le coefficient directeur de la droite (relation affine) réalisée par régression linéaire de la série des données issues de la baseline et des deux runs sur le temps. Cette technique donne une indication sur la pente de la courbe de la mesure de la conductance électrodermale tout au long d'une période et reflète l'évolution de son niveau tonique. L'ANOVA portant sur ce coefficient directeur révèle une différence significative entre les trois périodes étudiées, la baseline, le run Neutre et le run Money. L'analyse Post Hoc du LSD de Fisher montre que ces différences portent sur les deux runs Neutre et Money, par rapport à la baseline (respectivement $p=.011$, $p=.007$). La baseline présente une évolution négative du SCL, reflétant bien l'état de relaxation des participants (Fig. 61). L'ANOVA portant sur les valeurs delta, moyenne de chaque type de condition monétaire (run Neutre ou run Money) rapportée à la valeur moyenne de la baseline, ne met pas en évidence de différence entre les deux runs. Autrement dit, il n'apparaît pas d'effet du type d'incitation

²³ Un programme développé par Christian Colongo (chef du centre aéronautique et spatial de l'ISAE) a permis de faciliter grandement ces analyses.

monétaire sur le SCL. La SCR n'était également pas significativement différente entre les deux runs. Voir Fig. 63 pour illustration de la réponse électrodermale chez un participant au cours d'un run complet.

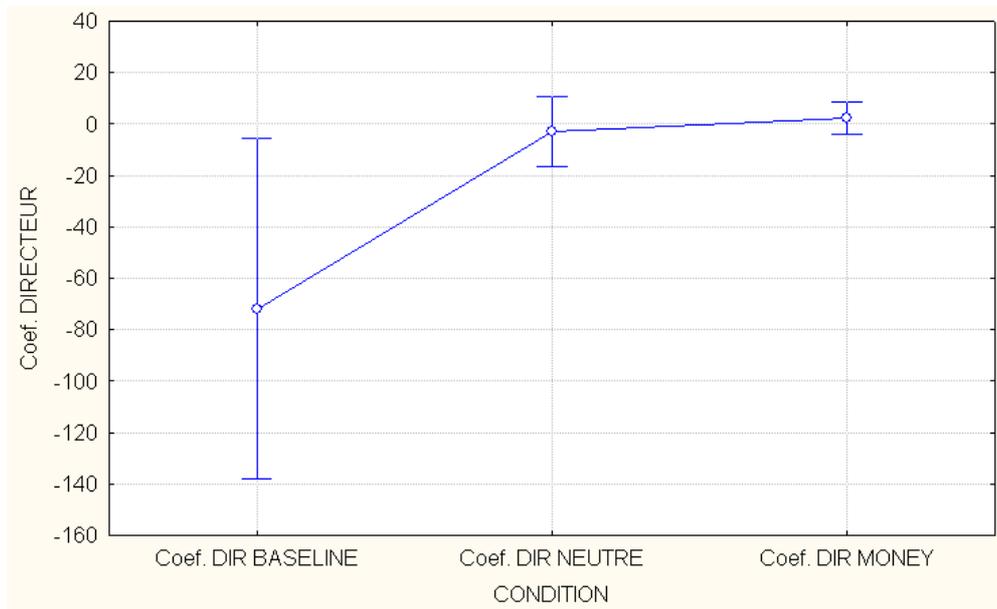


Fig. 61 : Évolution du SCL durant trois périodes d'intérêt : le repos (baseline) et les deux runs Neutre et Money. Pendant le repos, le SCL moyen diminue très fortement (valeur négative), il présente un niveau stable durant les deux runs. La dispersion importante des valeurs du repos est liée notamment au niveau initial du SCL au moment où débute la mesure. Lorsque le niveau tonique est bas et proche du niveau physiologique standard (environ de 2 μ S) en début de mesure du repos, un effet plancher apparaît : le niveau tonique ne peut guère diminuer.

Un effet global du type de stimulus affectait le niveau de réponse électrodermal ($p=.035$). En particulier, les stimuli de type 0% élicitaient une réponse électrodermale supérieure aux stimuli de type 100% ($p=.011$). Bien que nous n'ayons pas réalisé une mesure comparative de tous les atterrissages acceptés vs. toutes les remises de gaz, ce résultat permet de poser l'hypothèse que c'est la décision de remettre les gaz qui génère cet effet sur la SCR (Fig. 62).

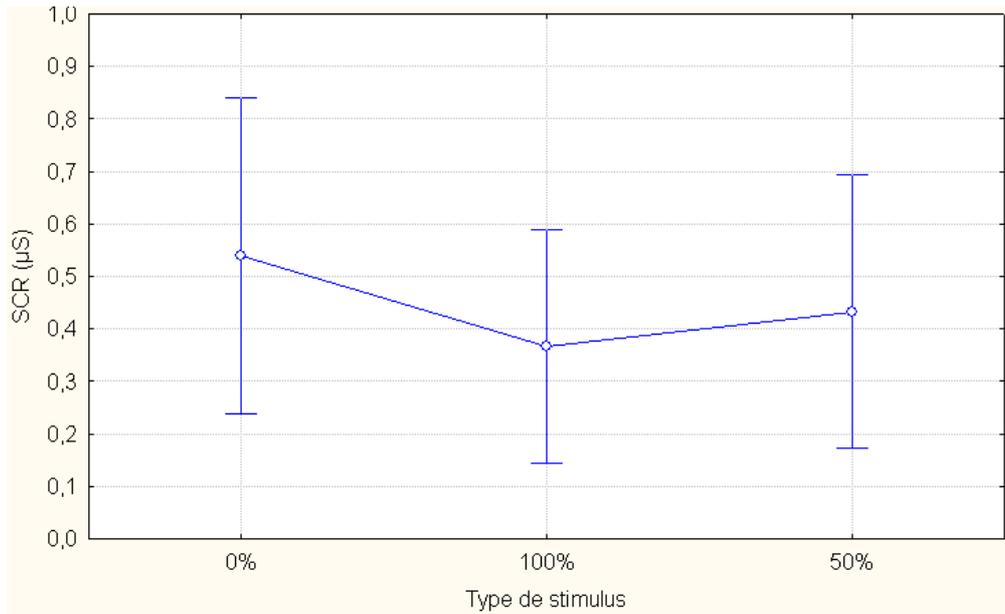


Fig. 62 : SCR en fonction des trois types de stimuli, 0%, 100% et 50%. Les stimuli 0%, associés nécessairement à une remise de gaz, élicitent un SCR supérieur aux stimuli 100%, associés nécessairement à un atterrissage.

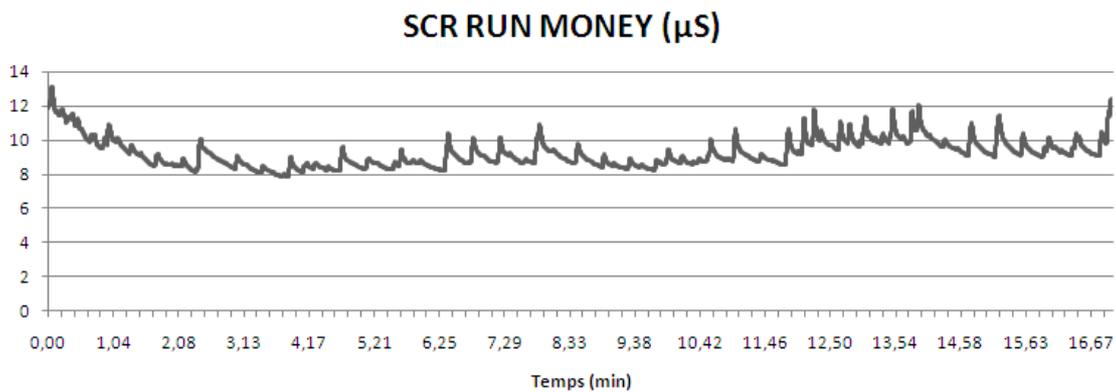


Fig. 63 : Illustration de la réponse électrodermale d'un participant au cours d'un run complet (ici un run Money). La forte réponse finale apparaît lors de la présentation du résultat financier global.

V.2. La respiration

L'ANOVA révèle une différence significative du RR entre les trois périodes (Fig. 64), le repos et les deux runs ($p < .001$). Le Post Hoc du LSD de Fisher montre que le RR était plus bas durant la baseline par rapport aux deux runs Neutre et Money ($p < .001$ dans les deux cas). En revanche,

l'ANOVA portant sur les valeurs delta des deux runs montre qu'ils ne différaient pas l'un de l'autre.

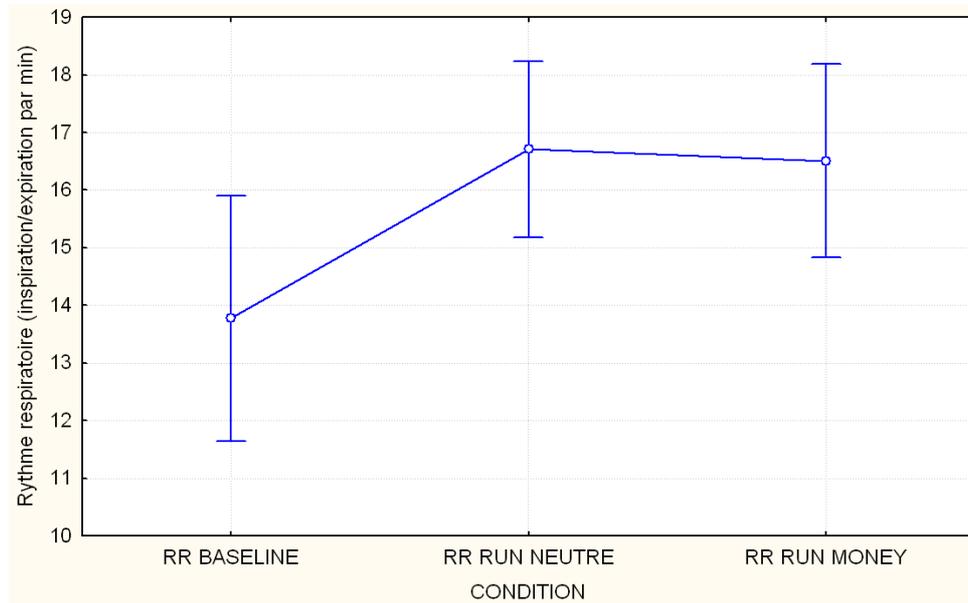


Fig. 64 : Rythme respiratoire durant trois périodes d'intérêt : le repos (baseline) et les deux runs, Neutre et Money. Il s'élève significativement durant les deux runs par rapport à la baseline.

V.3. Le rythme cardiaque

La comparaison des trois périodes d'intérêt révèle que le RC moyen différait significativement au cours de celles-ci ($p < .001$). L'analyse Post Hoc du LSD de Fisher montre que les deux runs, Neutre et Money, différaient de la baseline ($p < .001$ dans les deux cas). Le RC moyen était plus élevé durant l'accomplissement des tâches que pendant la période de repos. De plus l'ANOVA portant sur les valeurs delta montre que le RC moyen était également différent entre les deux runs. En effet, une augmentation significative de ce dernier apparaissait durant le run Money par rapport au run Neutre ($p = .009$), voir Fig. 65 et Fig. 66.

RC (Batttement/min) pendant la baseline et les deux runs

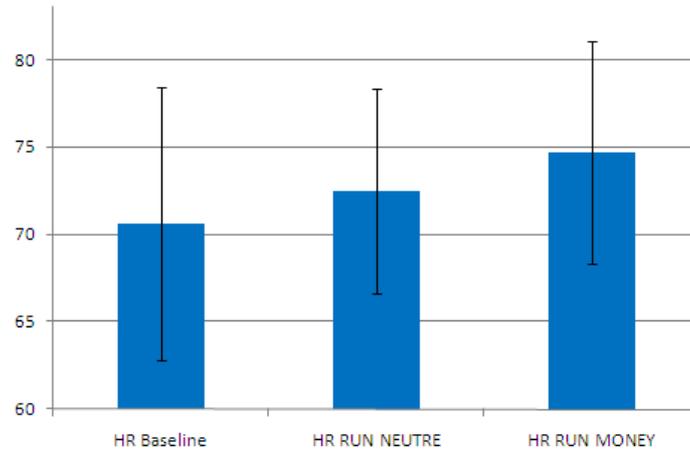


Fig. 65 : Rythme cardiaque moyen (HR) durant les trois périodes d'intérêt : la baseline et les deux runs, Neutre et Money.

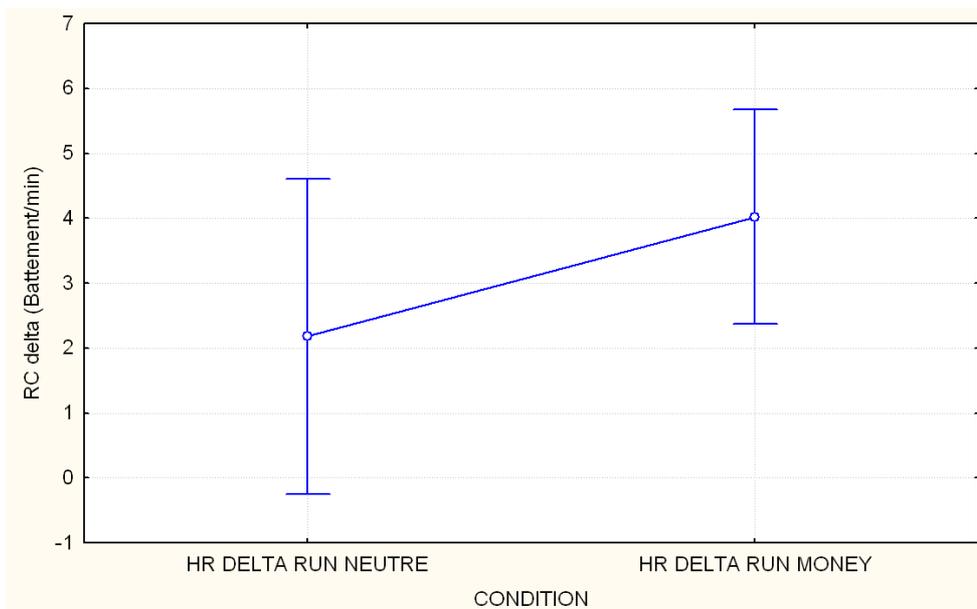


Fig. 66 : Valeurs delta du rythme cardiaque (HR) durant le run Neutre et le run Money (valeur moyenne durant le run - valeur moyenne durant la Baseline). L'augmentation moyenne du RC par rapport au repos était significativement plus importante durant le run comportant l'incitation financière (run Money) par rapport au run n'en comportant pas (run Neutre).

L'examen des six conditions (3 types de stimuli*2 niveau d'incitation monétaire) montre que le RC moyen le plus important au cours de toutes ces périodes est relevé durant la condition haute incertitude avec pression financière (HR 50 OK*). De plus, Le RC moyen le plus élevé pour chaque run correspond à la condition haute incertitude (respectivement 73.52 battement minute pour HR 50 OK, et 75.06 battement minute pour HR 50 OK*). Une ANOVA complémentaire

portant sur ces données montre une différence significative entre ces deux conditions à forte incertitude ($p=.016$) : le RC moyen est plus élevé en présence de l'enjeu (HR50 OK vs. HR 50 OK*, Fig. 67).

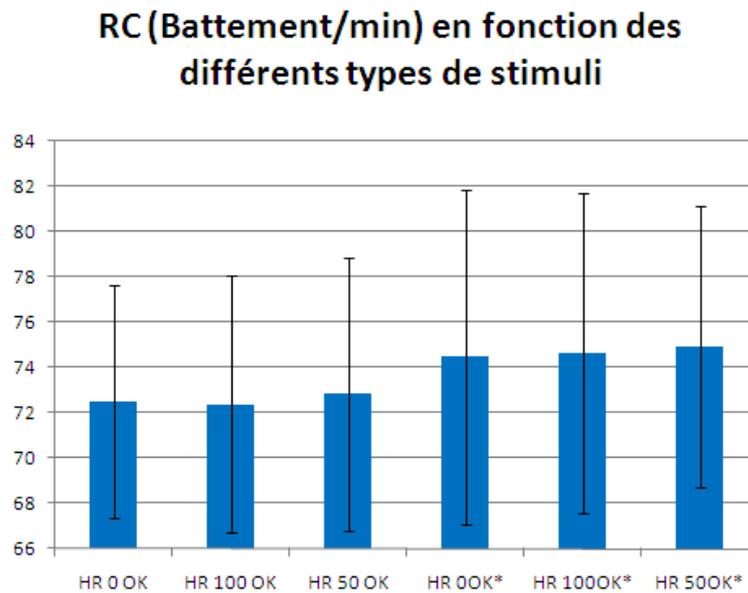


Fig. 67 : RC (HR) durant les 3 conditions 0%, 50% et 100% pour le run Neutre et Money. L'astérisque signale la présence de l'enjeu financier.

Tableau 9 : Valeurs physiologiques moyennes en fonction des trois périodes d'intérêt (Baseline et les deux runs). Les valeurs F et p des ANOVA présentent les résultats de l'analyse globale de ces trois périodes d'intérêt ainsi que l'effet global du type d'incitation financière par la comparaison entre les valeurs deltas du run Neutre avec le run Money. (* $\leq .05$; ** $\leq .01$; *** $\leq .001$).

Predicteurs	BASELINE	NEUTRE	MONEY	GLOBAL		NEUTRE VS. MONEY	
				F	p	F	p
SCR (μ S)		0.48 (± 0.37)	0.39 (± 0.32)			.0556	.468
SCL (c. dir.)	-68.43 (± 111.08)	-2.84 (± 23.75)	2.25 (± 10.31)	5.26	.010**	.856	.371
RR	14.54 (± 3.45)	16.63 (± 2.18)	16.66 (± 2.36)	17.99	<.001***	0.134	.623
RC (bpm)	70.59 (± 7.81)	72.44 (± 5.86)	74.65 (± 6.37)	11.23	<.001***	9.57	.009**

VI. Résultats préliminaires de neuroimagerie

La session d'entraînement est réalisée en dehors du scanner. Durant le scan, les participants voient la tâche tout en étant allongé dans l'IRM grâce à une projection par un jeu de miroirs. Six participants ont été scannés. L'examen a été réalisé à la Fondazione Santa Lucia de Rome sur un IRM Allegra 3 Teslas (*Siemens Medical Solutions*, Erlangen, Allemagne) possédant une force de gradient maximale de 40 mT/m. Les données IRMf ont été acquises par un gradient echo-EPI²⁴ (38 coupes axiales avec une taille de voxel de $3 \times 3 \times 3.75 \text{ mm}^3$, taille de la matrice 64×64 ; FOV²⁵ $192 \times 192 \text{ mm}^2$) et en ordre ascendant. Le temps d'acquisition était de 2.47 s ; 65 ms/ coupe. Les données ont été acquises en une seule session. Toutes les images fonctionnelles ont été prétraitées avec le logiciel SPM5 (*Welcome Department of Cognitive Neurology*, www.fil.ion.ucl.uk) fonctionnant dans l'environnement Matlab (Matlab 7.2.0.232, R2006a, *The MathWorks*, USA). Les images DICOM ont été converties au format compatible SPM (*Analyze*). Nous avons effectué la correction temporelle du délai d'acquisition entre les coupes (*slice timing*), corrigé les mouvements de tête (*realign*) et normalisé les images fonctionnelles vers le modèle T1 du MNI (*normalize*). Enfin, chaque image a été lissée avec un filtre Gaussien ($6 \times 6 \times 6 \times 8$) d'environ deux fois la taille des voxels (voir Annexe 1 pour plus de détails sur les prétraitements).

VI.1. Régresseurs

Les résultats de neuroimagerie présentés sont préliminaires et portent sur seulement six participants. Nous avons utilisé huit régresseurs prenant en compte le niveau d'incertitude et le type d'incitation durant la période du stimulus et du délai ({faible incertitude neutre}, {faible incertitude avec incitation}, {haute incertitude neutre} et {haute incertitude avec incitation} * {période de présentation du stimulus} et {période de délai}). Ces régresseurs permettent de réaliser des contrastes sur les effets simples et sur les interactions des conditions. Les analyses que nous avons effectuées visent à observer quelles régions cérébrales ont été impliquées dans la prise de décision selon le niveau d'incertitude et la présence ou l'absence de récompense. Dans

²⁴ Echo Planar Imaging : méthode d'acquisition la plus rapide en IRM.

²⁵ Field-of-view. Paramètre lié à la résolution spatiale.

cette étude, nous avons uniquement réalisé les contrastes pendant la période de la prise de décision.

VI.2. Régions d'intérêt

Les régions d'intérêts sélectionnées sont : le cortex préfrontal dorsolatéral (CPFDL, BA 9/46), l'insula (BA 13/14), le cortex orbitofrontal (COF, BA 11/12), le cortex occipital (BA 17/18/19) et le cortex cingulaires antérieurs (CCA) ventraux et dorsaux (BA 24/32). Ces régions recouvrent à la fois des aires dites cognitives (BA9, BA 32...) et émotionnelles (BA 24, BA 11...) afin de faire la part entre les effets « motivationnels » de l'incitation financière ou au contraire, ses effets délétères (Fig. 68).

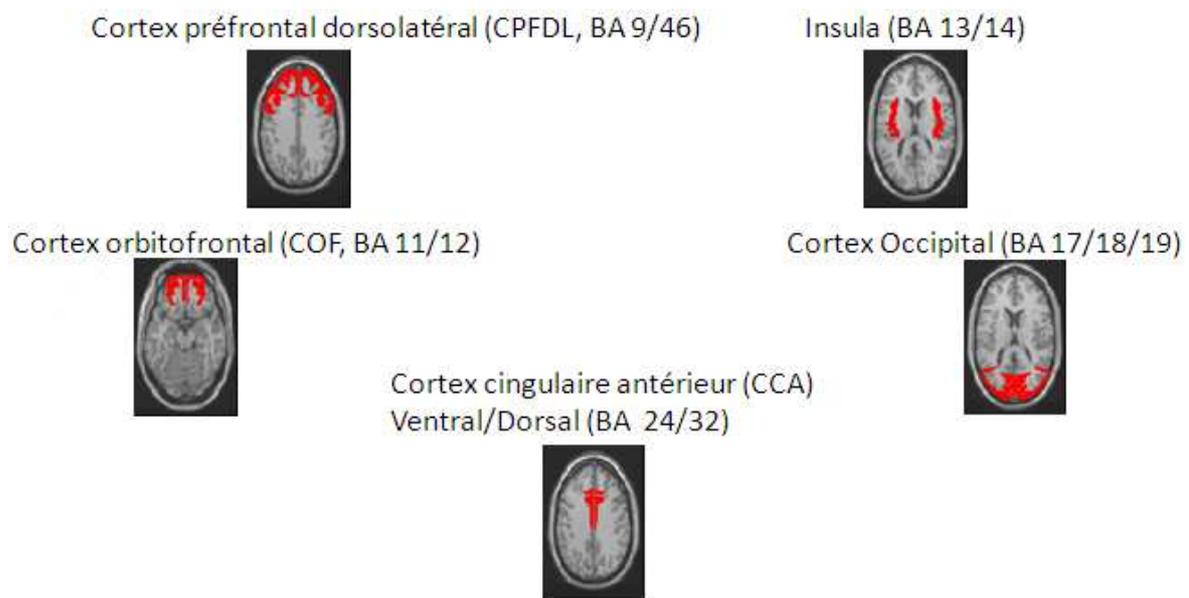


Fig. 68 : Régions d'intérêt sélectionnées pour réaliser les contrastes.

VI.3. Résultats comportementaux

Le profil des données comportementales de l'étude IRMf est tout à fait cohérent avec celui observé au cours de l'étude en psychophysologie (Fig. 69). En particulier, les TR moyens sont plus courts lorsque l'incertitude est faible ($p = .028$) et en présence de l'enjeu financier ($p = .011$).

TR par type de stimulus

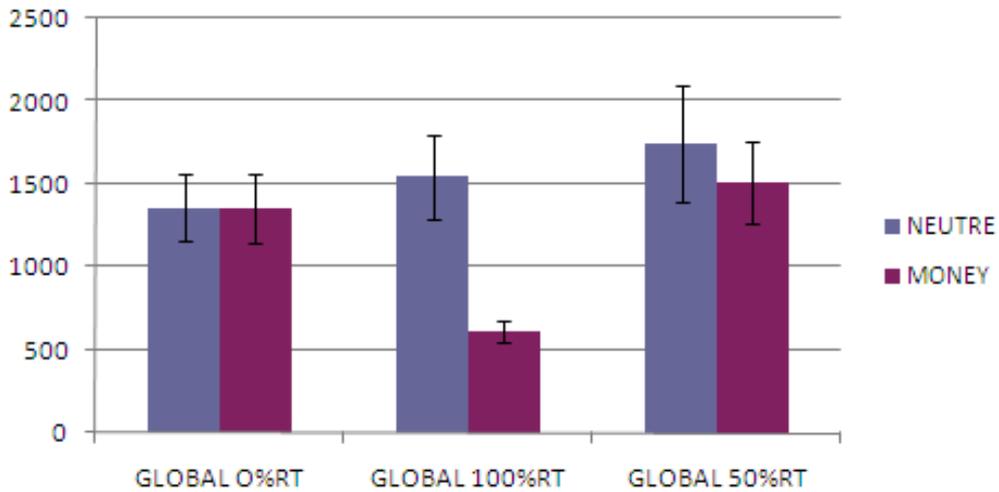


Fig. 69 : Temps de réactions moyens en fonction des trois conditions (0%, 100% et 50%) pour les runs Neutre et Money.

Par ailleurs, comme attendu, le pourcentage d’atterrissages acceptés a fortement augmenté en présence de l’enjeu financier pour les stimuli à forte incertitude ($p = .011$), passant de 45.83% à 65.83% d’acceptation (Fig. 70).

% atterrissage par type de stimulus

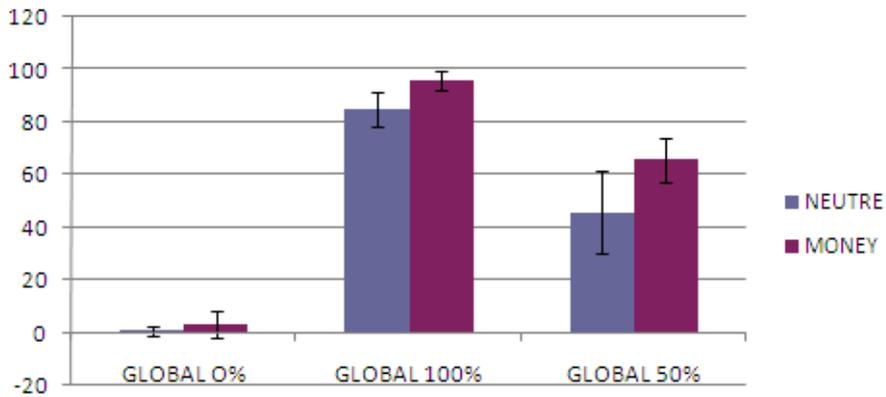


Fig. 70 : Pourcentages d’atterrissages en fonction des trois conditions (0%, 100% et 50%) pour les runs Neutre et Money.

VI.4. Résultats de neuroimagerie

VI.4.1. Contraste : Neutre > Financier

Ce contraste met en évidence une diminution de l'activité du CPFDL droit en présence de l'enjeu financier (BA 9, $p < .01$; $K = 23$). Ce résultat est conforme à nos hypothèses (Fig. 71).

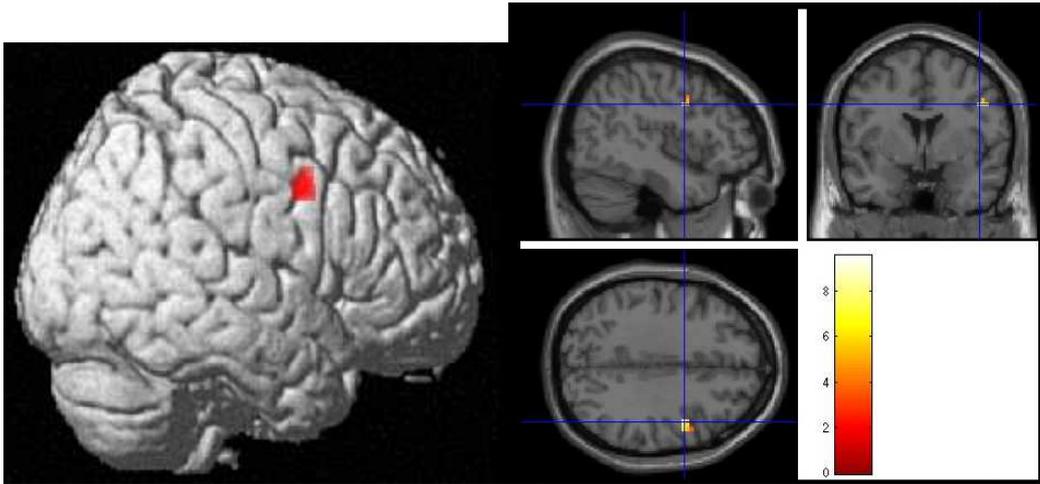


Fig. 71 : Activations plus importantes en condition neutre dans la région BA 9.

VI.4.2. Contraste : Financier > Neutre

Ce contraste a fait apparaître une activité accrue dans :

- Le CCA ventral (BA 24, $p < .01$; $K = 28$)
- L'insula (BA 13, $p < .01$; $K = 9$)
- Le cortex occipital (BA 17, $p < .01$; $K = 5$)

Ce contraste met en évidence l'effet global de l'enjeu financier, tout niveau d'incertitude confondu. Le CCA ventral et l'insula sont associés à des processus émotionnels. Une augmentation modeste de l'activité des régions visuelles est également à noter (Fig. 72).

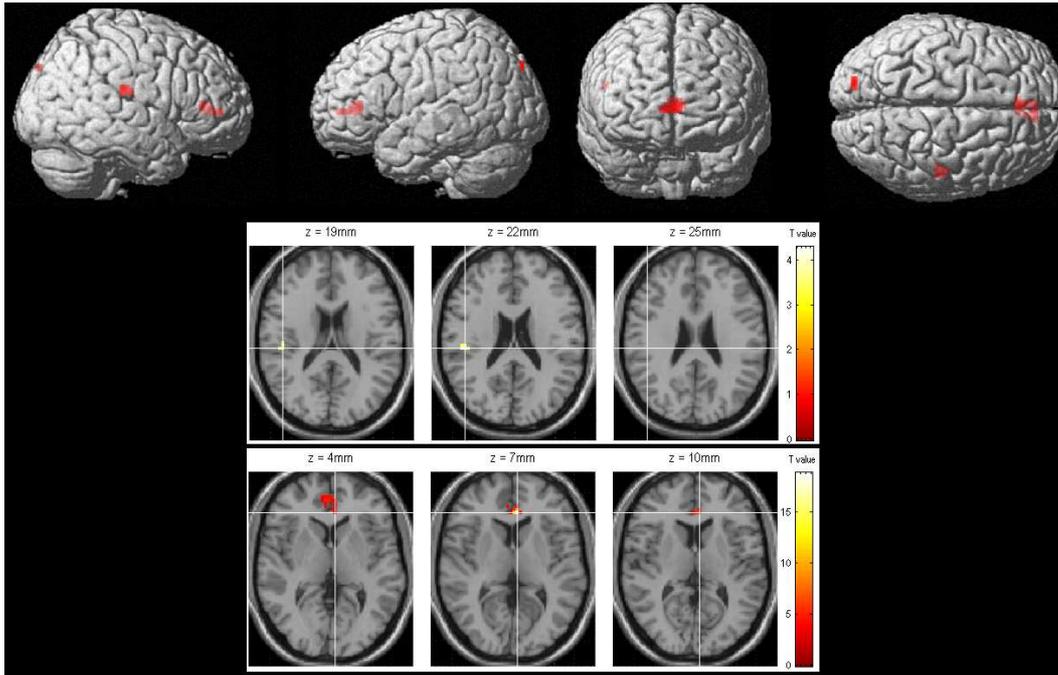


Fig. 72 : Activations plus importantes en condition financière dans les régions BA 24, BA 13 et BA 17.

VI.4.3. Contraste : Neutre Haute Incertitude > Financier Haute Incertitude

Une activité accrue est apparue dans :

- CPFDL gauche (BA 9/BA 46, $p < .01$; $K = 11$, $K = 6$)
- Cortex occipital gauche (BA 18, $p < .01$; $K = 27$)

Ce contraste laisse apparaitre une diminution de l'activité des régions préfrontales ainsi que des aires visuelles en présence de l'enjeu financier, lorsque l'incertitude est grande (Fig. 73).

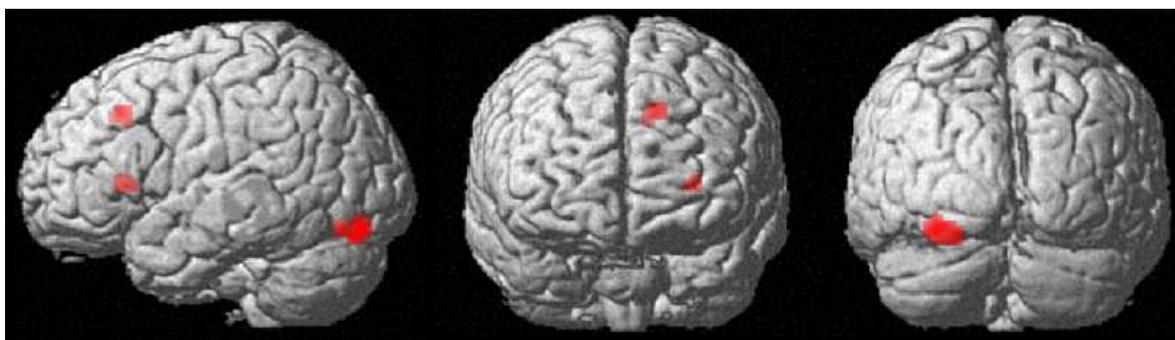


Fig. 73 : Activations plus importantes en condition neutre dans les régions BA 9, BA 46 et BA 18.

VI.4.4. Contraste : Financier Haute Incertitude > Neutre Haute Incertitude

Ce contraste a fait apparaître une activité accrue dans le COF (BA 11, $p < .01$; $K = 5$). Cette activité du cortex orbitofrontal va dans le sens d'une réelle pression émotionnelle exercée par l'enjeu financier (Fig. 74).

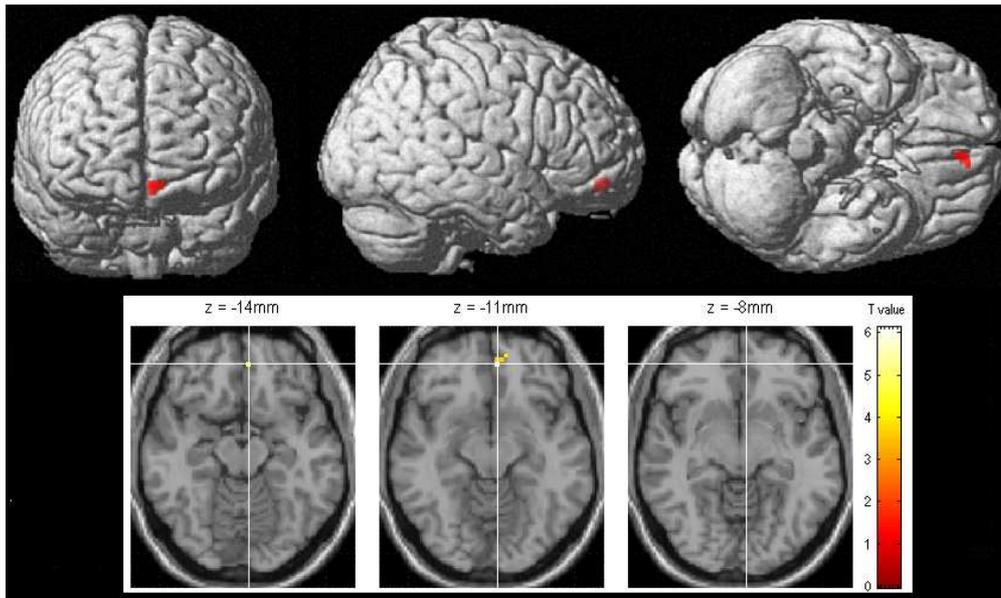


Fig. 74 : Activité plus importante en condition financière au sein de la région BA 11.

VII. Conclusion

Durant cette étude, nous avons tenté de placer des participants dans une situation analogue à celle que peuvent rencontrer des pilotes au cours de leur activité, en particulier durant la phase critique de l'atterrissage. Nous avons recréé une situation d'atterrissage simplifiée durant laquelle les participants devaient prendre la décision d'atterrir ou non. Certaines pressions telles que celles ressenties par les pilotes dans la vie réelle ont été reproduites artificiellement par une matrice de paiement, biaisée de manière à encourager à accepter l'atterrissage, au détriment de la sécurité.

Une première expérimentation en psychophysiology réalisée sur seize participants a permis de produire un certain nombre de résultats pouvant éclairer des comportements rencontrés en aéronautique. En condition neutre, comme nous le prévoyions, l'incertitude générée par les

stimuli à forte ambiguïté, se traduisait par une modification des TR. Nous avons observé un rallongement de ces derniers pour aboutir à une décision lorsque les stimuli présentaient une information floue et ambiguë. Des conclusions allant dans la même direction sont tirées de l'analyse des prises de décisions. Alors que les stimuli à faible ambiguïté étaient correctement catégorisés par les participants, les situations à forte ambiguïté généraient des réponses plus dispersées, avec 63.66% d'atterrissage.

Concernant l'incitation monétaire, nous avons également retrouvé un effet sur les TR, significativement plus courts en présence de celle-ci. La présence de l'enjeu poussait les participants à répondre de façon plus impulsive. La matrice de paiement était biaisée de façon à favoriser les atterrissages, au détriment du « score sécurité ». De fait, la prise de décision d'atterrir était réalisée de façon d'autant plus rapide et impulsive qu'elle s'accompagnait au final de conséquences financières préférables à la remise des gaz. Il est intéressant de noter, que cet effet ne s'observait pas dans le cas des stimuli de type 0% (*i.e.* remise de gaz nécessaire). Au contraire, pour ces stimuli, les TR moyens avaient tendance à s'allonger en présence de l'incitation monétaire. Ce résultat laisse penser que l'inévitabilité de cette punition monétaire était aversive et retardait la détermination du choix de remettre les gaz. Par ailleurs, comme attendu, la nature des prises de décisions a été modifiée sous l'emprise de l'enjeu financier. Alors que, lors des situations à forte incertitude et en l'absence de récompense, les participants ont tendance à adopter un comportement plutôt prudent, ils prennent davantage de risques lorsque l'enjeu financier est présent. L'enjeu favorise un comportement aversif envers les remises de gaz et conduit les participants à trancher en faveur d'un atterrissage, en particulier lorsque la situation est à forte incertitude.

La réduction des TR ainsi que la forte augmentation du nombre d'atterrissages en présence de l'enjeu financier par rapport à la condition Neutre sont des indices comportementaux qui confirment la différenciation des processus décisionnels engagés en fonction de ces deux conditions. Un raisonnement plus pesé et analytique semble associé à la condition neutre alors que les décisions semblent plus orientées vers des stratégies de maximisation des gains durant la condition Money. Cette analyse est appuyée par les résultats de la condition à incertitude élevée, durant laquelle l'acceptation des atterrissages s'accroît fortement en présence de l'enjeu (85.93% en sa présence vs. 63.66% en son absence).

Les résultats psychophysiques ont confirmé la capacité de ce type de mesures à observer l'augmentation de l'activité du SNA en réaction à l'accomplissement d'une tâche, témoin d'une mobilisation de l'énergie et d'un investissement mental pour répondre aux exigences de cette

dernière (Fairclough, Venables, & Tattersall, 2005; Gaillard, 2001). Le RR ainsi que le RC était significativement plus élevés durant les deux tâches en comparaison avec l'état de repos. L'évolution du SCL était également différente durant la période de repos, où elle était négative, par rapport aux périodes de la tâche, où elle demeurait relativement stable. Les résultats concernant le niveau de conductance électrodermal tonique sont peu étudiés, l'analyse de ce type de mesure au cours d'une période relativement longue est extrêmement peu répandue. En effet, la plupart des auteurs s'intéressent uniquement à la réponse électrodermale, en lien avec la présentation brève d'un stimulus. Il faut signaler que la SCR était significativement plus élevée lors de la présentation de stimuli de type 0%. Ces stimuli impliquaient nécessairement une remise de gaz, action considérée comme négative dans le cadre de cette expérience, à l'instar de la vie réelle. Il apparaît que le fait de remettre les gaz élicitait une réaction émotionnelle plus forte chez les participants que le fait d'atterrir. Cette observation est cohérente avec le contexte aversif créé tout autour de la remise de gaz.

Les données psychophysiologiques ont montré dans une certaine mesure l'impact émotionnel de l'enjeu financier. En particulier, le RC était significativement plus élevé au cours du run Money, comportant l'enjeu financier, par rapport au run Neutre. Cette différence atteste l'effet exercé par la pression émotionnelle sur le SNA, venant se surajouter à celui de nature cognitive, généré par la réalisation de la tâche. Bien que l'amplitude de l'élévation du RC entre les deux types de run s'est avérée relativement modeste, (2.20 bpm) elle n'en demeurait pas moins très significative et récurrente sur l'ensemble des participants ($p=.009$). Il faut toutefois signaler que l'amplitude de cette augmentation est cohérente avec les données de la littérature en lien avec l'émotion. Ainsi, Brosschot (Brosschot & Thayer, 2003) a montré qu'une émotion négative et positive élicitait respectivement des élévations du RC de 2.14 et de 1.06 battement/minute.

Cette augmentation du RC entre le run Neutre et le run Money ne peut pas directement être imputable à une augmentation notable ni de la difficulté, ni des performances, en particulier dans la situation ambiguë. Dans ce dernier cas, au contraire, le taux d'erreur par fausse alarme augmentait fortement en présence de l'enjeu. Pourtant, depuis les travaux de Wright (1996), faisant le lien entre théories motivationnelles et activité cardiovasculaire, de nombreuses études ont montré que l'activité cardiaque était liée à l'augmentation de la difficulté d'une tâche tant que le succès importait et que l'amélioration des performances était possible, ces derniers étant facteurs de motivation (Bongard, 1995; Bongard & Hodapp, 1997; Gendolla, 1998; Gendolla & Krüsken, 2001). En effet, l'organisme oriente l'investissement de ses ressources de façon à ne pas les gaspiller. Richter (2006) a montré que lorsque la difficulté de la tâche n'est pas claire (par ex : pas connue à l'avance), l'augmentation du RC traduit linéairement l'augmentation du niveau de

récompense accordé en cas de succès. Nos résultats sont en droite ligne avec cette théorie dans la mesure où la tâche qu'accomplissaient nos participants comportait, de par sa nature, une certaine part d'incertitude. En effet, la catégorisation du niveau d'incertitude liée à la règle des points, fonction de la position des losanges, n'était pas connue des participants. Il n'existait pas de limite claire au delà de laquelle un atterrissage pouvait être catégorisé comme possible ou non, les repères visuels existant sur le PFD ayant été retirés dans ce but. Ces considérations nous rapprochent vers d'autres théories, celles de l'engagement, conduisant des individus à consacrer beaucoup d'énergie en faveur de comportements pourtant en inadéquation totale avec ce que prescrirait la logique la plus élémentaire...

Concernant la SCR ou le RR, nous n'avons pas retrouvé de différences significatives entre les deux runs. Plusieurs explications peuvent être avancées. Chaque type de stimulus a été répété un grand nombre de fois afin d'obtenir des statistiques basées sur un nombre satisfaisant de données. Le grand nombre de ces répétitions a probablement entraîné un effet d'habituation, érodant ainsi ces réponses physiologiques. La SCR est en effet extrêmement sensible aux effets d'habituation (Bohlin, 1976; Raskin, 1975; Roth, Ehlers, Taylor, Margraf, & Agras, 1990), qui semblent d'ailleurs en partie liés à des facteurs génétiques (Lykken, Iacono, Haroian, McGue, & Bouchard, 1988). Par ailleurs, même si l'auto-estimation du niveau d'influence de l'enjeu (échelle de 1 à 9) ne corrélait pas avec le comportement observé, le biais dans la décision comporte nécessairement une certaine part de rationalité. Les participants étaient conscients du biais induit par la matrice de paiement. Dans le doute, ces derniers tranchaient en faveur de la décision d'atterrir, en dépit du conflit que cela pouvait provoquer vis-à-vis de la sécurité. Le fait que ce biais soit lié à des aspects conscients a très certainement été favorisé par l'affichage du feedback monétaire après chaque réponse, y compris pendant les sessions d'entraînement. Ce feedback a permis aux participants d'ajuster consciemment leurs réponses de façon à maximiser les gains. Il faut d'ailleurs signaler que l'affichage du feedback peut également modérer l'activité du SNA. En effet, la littérature montre que l'affichage d'un feedback ayant trait aux performances durant l'accomplissement d'une tâche peut réduire l'activité du SNA. Par exemple, Van der Veen (2004) a montré que l'augmentation du RC chez des individus, consécutif à l'accomplissement d'une tâche, était réduit par l'affichage d'un feedback sur leurs performances. Par ailleurs, il est intéressant de noter que dans l'étude de Van der Veen, la réduction du RC apparaissait indépendamment de la nature des informations fournies (spécifiant que les performances étaient correctes ou non). Dans notre expérimentation, des SCR plus importantes durant la condition avec incitation financière auraient peut-être été retrouvées durant les prises de décisions si les feedbacks n'avaient pas été systématiquement affichés après chaque réponse, laissant ainsi le participant dans une grande

incertitude vis-à-vis de la pertinence de ses actions et du bilan financier global lié à ses décisions. Cependant, ce choix a été fait pour deux raisons. Le pilote obtient un feedback après chaque atterrissage ! De plus, l'analyse des activations durant le délai, les attentes de la récompense, fait partie de nos perspectives. Enfin, un dernier élément peut expliquer l'absence de résultat au niveau de la réponse électrodermale : la relative modestie des sommes d'argent engagées (trente euros).

Concernant le RR, nous n'avons pas mis en évidence de résultats convaincants. Les deux runs élicitaient un RR supérieur à celui mesuré pendant le repos, mais le facteur financier n'a pas généré d'effet particulier. La littérature dans ce domaine est rare et montre la complexité des liens entre émotion et RR. Une étude relativement ancienne avait mis en évidence le fait qu'une émotion négative génèrait un ralentissement du RR (Blatz, 1925) alors que des données plus récentes semblent au contraire montrer un ralentissement du RR chez des patients dont l'anxiété état et trait a significativement diminué, suite à des lésions de l'amygdale (Masaoka, Hirasawa, Yamane, Hori, & Homma, 2003).

Les résultats préliminaires de neuroimagerie doivent être pris avec beaucoup de précaution et nécessitent d'être répliqués sur un plus grand nombre de participants pour atteindre un niveau de validation satisfaisant, mais ils n'en demeurent pas moins encourageants et correspondent à nos hypothèses initiales. Tout d'abord les résultats comportementaux des six participants sont en adéquation avec ceux obtenus en psychophysiologie, à savoir une augmentation du pourcentage d'atterrissage et une diminution des TR en présence de l'enjeu financier.

Nos analyses de neuroimagerie ont révélé des patterns d'activations cérébrales cohérents avec la littérature (Goel & Dolan, 2003; Simpson et al., 2001b; Simpson et al., 2001a), à savoir une activité différentielle des réseaux neuronaux selon que la décision est réalisée à froid ou à chaud. Les régions du cortex préfrontal dorsolatéral semble déactivées en présence de l'enjeu financier, dénotant un comportement moins « rationnel » au moment des prises de décisions. Cette diminution de la « rationalité » est à mettre en regard de la sécurité. En effet, d'un point de vue financier, ces décisions sont tout à fait cohérentes. Alors que le CPFDL est impliqué plus fortement lorsque la décision est réalisée à froid, le CCA ventral, puis le COF lorsque l'incertitude est importante, semblent être recrutés lorsque la pression financière est présente. Ces activations des régions du CCA ventral et orbitofrontales sous enjeu financier nous confortent dans l'idée selon laquelle les motivations des participants s'orientaient différemment en présence de l'enjeu. Elles s'écartaient des considérations sécuritaires au profit de considérations plus économiques. Le CCA ventral est connu pour son rôle dans les processus émotionnels, y compris les réactions

physiologiques tels que l'activité cardiaque. De même, l'insula est considéré comme une région fortement liée aux émotions (Damasio, 1995). Un article de Kringelbach (2005) évoque l'accumulation de preuves montrant que le CPFVM est impliqué dans l'estimation de la valeur des stimuli et qu'il joue un rôle majeur dans le processus de sélection, d'un point de vue émotionnel à un instant donné, parmi un ensemble de possibilités, du meilleur choix disponible pour l'individu.

Des modulations des cortex visuels primaires ont également été retrouvées entre les deux conditions émotionnelles, avec un accroissement de l'activité des aires visuelles V2 (Broadman 18) au cours de la condition neutre. Ces modulations des aires visuelles sont un résultat original et montre que la pression financière peut, dans une certaine mesure, accroître leur activité (concernant l'analyse intégrant les deux niveaux d'incertitude confondus). En revanche, la déactivation de ces régions en présence de l'enjeu, lorsque l'incertitude est grande, suggère que les traitements visuels, liés à l'analyse des stimuli, sont moins soutenus. Cet accroissement au cours de la condition neutre peut être interprété comme la mise en place de stratégies différentielles en fonction de la présence ou non de la récompense. La condition neutre serait réalisée plus « objectivement », avec une analyse visuelle soutenue de la position des losanges, alors que l'introduction du facteur financier viendrait altérer ce processus d'attention visuelle soutenue. La décision la plus intéressante financièrement étant dans tous les cas celle d'atterrir. L'argent rendant ainsi « aveugle » les participants. Cette modulation top-down des aires occipitales V2 est compatible avec le fait qu'il s'agit d'une aire visuelle associative recevant de fortes connections feedforward depuis V1 (BA 17), et qu'elle-même projette fortement sur V3, V4 et V5. Par ailleurs, cette aire projette également de fortes connections feedback sur V1. Shulman (1997) avait montré que sur neuf études comparant la visualisation passive de stimuli avec de la discrimination active, six d'entre elles faisaient apparaître des modulations top-down d'aires visuelles impliquées très tôt dans la hiérarchie des traitements visuels (notamment B17/18). Nos résultats associés à ceux de Shulman offre une piste intéressante aux troubles de l'attention visuelle (parfois semblable à l'effet tunnel) observé chez des opérateurs en proie à des situations où le facteur stress et émotionnel pèse lourdement. Ces résultats sont à rapprocher des données comportementales de l'expérience en psychophysiologie, dans laquelle les TR des participants étaient plus courts en présence de l'enjeu, ce qui va tout à fait dans le sens d'une diminution de l'attention, a fortiori visuelle, portée sur les stimuli. Le parallèle avec l'effet tunnel observé en aéronautique, lorsque les pilotes semblent ignorer les alertes visuelles dans le cockpit, lors de phases critiques, nous semble tout à fait à propos. Bien entendu, ces résultats préliminaires portant sur 6 sujets sont à confirmer sur un échantillon plus important (n = 16).

En dépit des limites de notre étude, les résultats comportementaux et psychophysiologiques démontrent l'efficacité de l'enjeu financier à générer une certaine pression émotionnelle et à inciter à atterrir lors de situations pourtant trop dangereuses. En sa présence, nous avons observé un biais à atterrir en situation ambiguë, très au delà des probabilités de réussite (85.93% d'atterrissage contre 50% de réussite potentielle pour l'étude en psychophysiologie) et des TR moyens plus courts. Ces résultats signent une attitude moins rationnelle et moins rigoureuse vis-à-vis de la sécurité en présence de l'enjeu financier. Par ailleurs, ce comportement s'accompagnait d'un RC significativement plus élevé par rapport à la condition neutre. Enfin, la remise de gaz, contrainte par les stimuli de type 0%, s'est avérée être la seule situation où les TR n'étaient pas plus courts en présence de l'enjeu. Au contraire, ils avaient tendance à augmenter. Il semble que nous ayons réussi à recréer un contexte aversif autour du refus d'atterrir, en témoigne la réponse électrodermale, plus élevée durant les prises de décision réalisées face aux stimuli de type 0%.

VIII. Perspectives

Pour des raisons de calendrier, un certain nombre d'analyses relatives à cette expérimentation ne figurent pas encore dans ce manuscrit. Les résultats de l'étude en psychophysiologie seront complétés par l'analyse des questionnaires que nous avons soumis aux participants afin de mieux cerner leur profil psychologique. Ces questionnaires concernent le degré d'anxiété trait (version française du Spielberger state-trait anxiety inventory (STAI Y-B, Bruchon-Schweitzer & Paulhan, 1993)) ainsi que le degré d'impulsivité (Barratt Impulsiveness Scale, French version (BIS-10, Bayle et al., 2000)). Il est désormais admis que les individus présentant un niveau important d'impulsivité (Helmers, Young, & Pihl, 1995; Pietrzak et al., 2008) ou d'anxiété (Airaksinen et al., 2005; Castaneda et al., 2008) peuvent présenter des troubles des FE et de la prise de décision (Miu et al., 2007) ainsi qu'une tendance à prendre davantage de risques (Martin & Potts, 2009), en particulier dans un contexte à forte incertitude (Bensi & Giusberti, 2007). L'anxiété état est également mesurée avant et après l'expérience, un état d'anxiété, même passager, peut, nous l'avons vu, influencer la prise de décision (Bechara et al., 2000; Hogan, 2003; Isen, 2001; Phillips et al., 2002; Schwarz, 2000). Les informations extraites de ces questionnaires apporteront un éclairage complémentaire sur les prises de décisions et

expliqueront probablement, au moins en partie, les différences de comportement, plus prudent et conservateur chez certains individus.

Par ailleurs, des mesures de l'activité visuelle ont été enregistrées à l'aide d'un oculomètre de type tête porté (oculomètre type L, Pertech©). Nous espérons retrouver des patterns de stratégies visuelles différents en fonction du niveau d'incertitude et ou de la présence de la récompense. La modulation des aires visuelles avec le facteur financier retrouvée dans les résultats préliminaires de neuroimagerie pourrait par exemple se traduire par des durées de fixation réduites avec la présence de l'enjeu financier. L'analyse des TR, diminuant en présence de l'enjeu financier tend dans cette direction (Fig. 75).

Pour cette étude nous avons obtenu un budget afin d'indemniser les participants. Ces derniers étaient informés qu'ils recevraient une somme d'argent minimale pour leur participation, et que cette somme pouvait être majorée de façon proportionnelle aux gains remportés pendant la tâche (en réalité tous les participants recevaient la somme maximale). Actuellement, la législation ne permet pas, en théorie, d'indemniser les participants proportionnellement à leur performance au cours d'un protocole de recherche. L'indemnité de participation à une expérimentation doit être fixe. Un futur objectif est de comparer les résultats obtenus en la présence d'argent réel avec des résultats obtenus en présence d'argent « virtuel ». C'est-à-dire dans des conditions expérimentales où les participants ne recevront pas véritablement de somme d'argent. Nous voulons évaluer l'importance d'avoir un enjeu financier réel pour moduler efficacement l'état émotionnel, tel qu'observé au travers de l'activité du SNA. Cela permettra également d'évaluer dans quelle mesure, le biais à atterrir est lié à des aspects émotionnels et cognitifs.

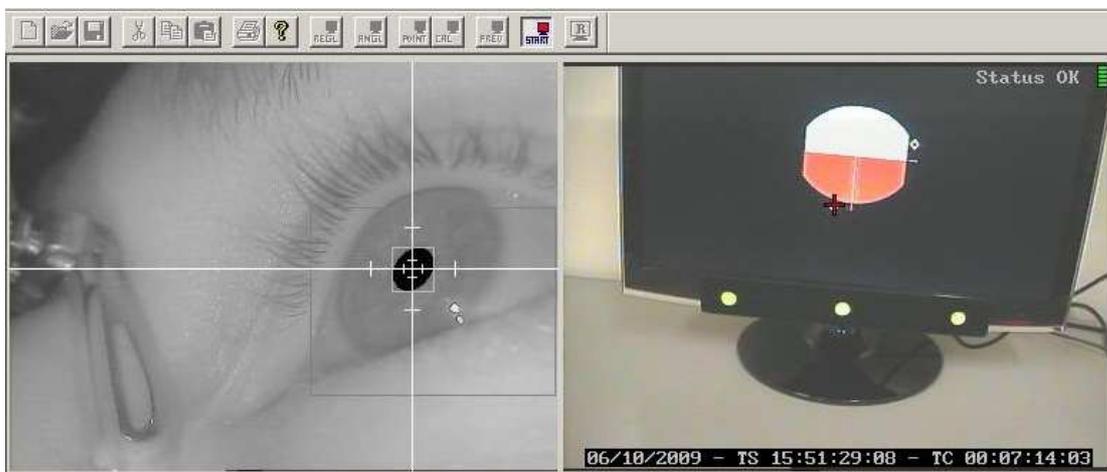


Fig. 75 : Mesures oculométriques durant l'analyse visuelle des stimuli. Cette analyse aboutit sur la prise de décision.

Enfin, l'étude en neuroimagerie comprend dors et déjà un échantillon supérieur de participants et les résultats sont en cours de traitement. Elle viendra nous l'espérons, asseoir l'observation de circuits de la prise de décision spécifiques, selon que cette dernière est réalisée à chaud ou à froid. Les questionnaires décrits plus haut figurent également dans cette expérience et les données issues de ces derniers pourront être utilisées comme régresseurs supplémentaires. Une étude récente de Xue (2009) suggère qu'il existe une subdivision fonctionnelle au sein des régions médiales du CPF. Selon l'auteur, l'aversion au risque et la recherche de la récompense, deux forces très importantes intervenant lors de prises de décisions risquées réalisées sous incertitude, seraient sous-tendues par des processus neuronaux distincts. La partie dorsale du CPFVM serait impliquée dans les processus d'aversion à l'incertitude et au risque alors que la partie ventrale serait plus liée à la recherche active de la récompense. Dans cette optique, d'autres analyses sont envisagées pour affiner les investigations portant sur les activations cérébrales. L'effet du *background* antérieur (influence des regrets par exemple), les effets de l'incertitude durant l'attente de la récompense ou encore les interactions entre l'incertitude et la récompense seront examinés.

... toute théorie, y compris scientifique, ne peut épuiser le réel, et enfermer son objet dans ses paradigmes (Edgar Morin, *Le paradigme perdu*, 1973).

Chapitre 3.

Oculométrie en vol réel

I. Résumé

Contexte : La détermination d'un « vecteur d'état » prédictif de la performance du pilote constitue un enjeu majeur pour les futures IHM. Les mesures psychophysiologiques pourraient constituer de bons candidats. L'oculométrie, en particulier, est un outil de mesure intéressant en ce sens qu'il offre d'une part, des informations comportementales via la prise d'information visuelle, essentielle au contrôle de l'appareil, et d'autre part, des données sur le diamètre pupillaire, indice de l'état cognitif et émotionnel.

Méthodes : Nous avons intégré un oculomètre Tobii x 50 à bord d'un Aquila AT01. Six pilotes instructeurs ont participé à l'expérimentation qui se déroulait en condition réelle de vol. Les mesures oculométriques étaient réalisées pendant qu'ils accomplissaient un circuit d'atterrissage nominal puis un deuxième circuit d'atterrissage avec une panne moteur simulée.

Résultats : L'analyse des fixations oculaires a montré la fiabilité du système à enregistrer les différentes prises d'informations visuelles. Cette fiabilité a été confirmée par la bonne correspondance entre les données issues de l'analyse des aires d'intérêt et les informations nécessaires à l'accomplissement d'une check-list. Par ailleurs, la comparaison des deux atterrissages (nominal et dégradé) a montré que durant la simulation de panne, les pilotes passaient moins de temps sur les instruments et se focalisaient fortement sur l'anémomètre, l'information de vitesse étant très importante lors de la gestion d'un appareil dépourvu de puissance moteur. Pour finir, le diamètre pupillaire était significativement plus important lors de l'atterrissage avec la panne simulée (Dehais, Causse, & Pastor, 2008).

Discussion : Cette étude a constitué l'occasion de mettre en œuvre en environnement réel des mesures habituellement réservées aux études de laboratoire. Il s'agit d'un premier pas pour évaluer la faisabilité et l'acceptabilité d'enregistrement oculométriques en vol réel et pour étudier

les bénéfices potentiels de ce type d'outil pour les facteurs humains. Elle ouvre un certain nombre de perspectives vers le développement de systèmes embarqués capables de prédire la performance du pilote en intégrant un vecteur d'état psychophysique en plus des mesures plus classiques du vecteur d'état de l'aéronef et du vecteur d'état des interactions pilotes-système

II. Introduction

Actuellement, l'évaluation en ligne des performances de l'équipage se focalise sur des données dérivées de l'interaction du pilote avec son aéronef. Des méthodes formelles ont été développées afin de détecter les erreurs de l'équipage grâce à la supervision des interactions pilotes/aéronefs (Callantine, 2001; Heymann & Degani, 2001). Une approche prédictive basée sur des réseaux de Petri (Lesire & Tessier, 2005) a également été proposée pour anticiper d'éventuels conflits entre le pilote et ses systèmes embarqués (Dehais, Lesire, Goudou, & Tessier, 2005). Ces conflits, générateurs de stress, sont des précurseurs remarquables de la dégradation des performances de l'opérateur (Dehais et al., 2003). Cependant, toutes ces méthodes reposent sur les actions du pilote et apportent des informations souvent trop tardives pour pouvoir réagir en ligne. Dès lors, une évaluation de l'état physiologique du pilote peut apporter des indices précoces sur son activité cognitive, le stress et l'émotion (Critchley, 2002; Granholm & Steinhauer, 2004; Skinner & Simpson, 2002; Veltman & Gaillard, 1996). De nombreuses mesures existent (EEG, ECG..), mais elles présentent chacune des inconvénients (par ex. la transpiration perturbe la réponse électrodermale, la fièvre peut changer la réponse cardiaque etc...) et nécessitent souvent des appareils trop encombrants pour être facilement embarqués dans un cockpit. Même si les études sur simulateur permettent d'obtenir des informations très contrôlées sur la façon dont le système nerveux autonome réagit au cours du pilotage (Kasarskis, Stehwien, Hickox, Aretz, & Wickens, 2001; Mumaw, Sarter, & Wickens, 2001), le transfert de ce type de mesure au monde réel reste souvent problématique eu égard aux contraintes techniques et légales qu'imposent ce genre d'expérimentations. Dans cette étude, nous avons adapté et embarqué un oculomètre, qui offre à la fois des informations psychophysiologiques, via le diamètre pupillaire, et comportementales, grâce à l'enregistrement des directions du regard. Une autorisation de vol nous a été accordée par l'agence européenne de la sécurité aérienne (numéro 856/2007 – AESA PTF.A07.0232) afin de réaliser une telle expérience, avec la seule contrainte de ne pouvoir réaliser les expériences qu'avec des instructeurs.

Cette étude devait satisfaire plusieurs objectifs :

Techniques :

- Adapter un appareil de mesure non intrusif, n'attirant pas l'attention du pilote et ne gênant en aucune manière son activité²⁶.

Scientifiques :

- Analyser les prises d'informations visuelles du pilote et son diamètre pupillaire durant différentes phases d'un vol ;
- Comparer deux types d'atterrissages à partir des mêmes mesures : nominal et dégradé (panne moteur simulée).

III. Méthode

III.1. Participants

Six instructeurs de vol de l'ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, anciennement SUPAERO) ont participé à l'expérimentation. Ils étaient tous de sexe masculin, la moyenne d'âge était de 43 ans (35-58). L'expérience moyenne de vol totale était importante avec 5896 heures (*range* = 1480-13000). Les six pilotes possédaient les qualifications nécessaires pour piloter l'aéronef, un Aquila AT01 (avion deux places, 100 chevaux).

²⁶ L'intégration physique de l'oculomètre, notamment la réalisation d'un support de fixation, a été réalisée par Eric Absil, alors étudiant 3A de l'ISAE. Merci à lui.

III.2. Scénario de vol

Le scénario de vol se déroulait à l'aérodrome de Lasbordes, à partir du coucher du soleil et se terminait juste avant le début de la nuit aéronautique²⁷. Il était constitué de deux séquences consécutives (Fig. 76)

- La première séquence se déroulait dans des conditions nominales, et consistait en un pattern de circuit d'aérodrome classique : décollage (1), vent traversier (2), vent arrière (3), étape de base (4), dernier virage (5), finale (6) ;
- La seconde séquence, en condition dégradée, commençait dès la fin de la première, juste après le *touch and go* (posé décollé) (7) et consistait en un vol retour vers l'aérodrome après avoir atteint l'altitude de 2500 pieds (1000 pieds égalent 304,8 mètres). Une fois au dessus de la piste d'atterrissage, le pilote coupait les gaz et simulait une panne moteur (8), il devait ensuite planer jusqu'à la piste pour atterrir.

Le scénario était présenté aux participants une heure avant l'expérimentation. Durant le *briefing*, il était fait mention à chaque pilote que le choix du moment où la panne simulée serait déclenchée leur appartenait et qu'ils pouvaient remettre les moteurs en route à tout moment, si la sécurité était compromise.

²⁷ En France, la nuit aéronautique démarre 30 minutes après le coucher du soleil.

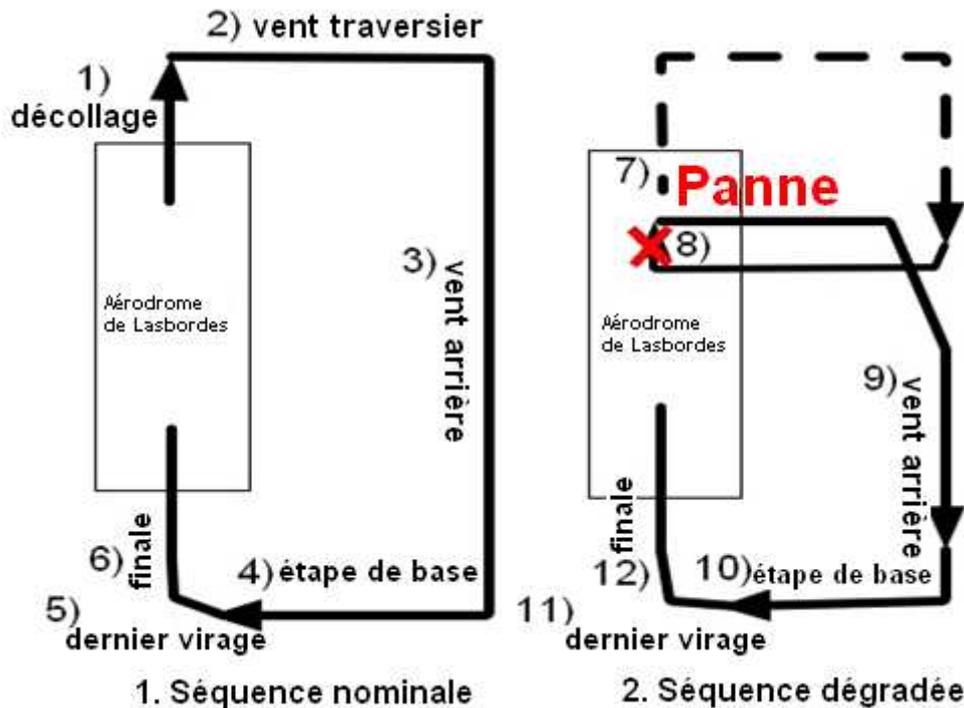


Fig. 76 : Les deux séquences de vol : nominale puis dégradée. La séquence nominale se termine après le premier atterrissage (6), la séquence dégradée commence consécutivement à cette dernière, juste après le décollage (7). Les phases de vol correspondent aux différentes périodes de vol à l'intérieur d'une séquence (ex : étape de base, vent arrière etc.).

III.3. Oculométrie

Un eye tracker Tobii x 50, de type caméra oculaire, a été utilisé pour l'expérimentation²⁸. Cet appareil a été modifié de façon à pouvoir être embarqué et fonctionner convenablement dans des conditions de luminosité extérieures. L'appareil a une précision de 0.5 degrés et un taux d'échantillonnage de 50 Hz. Il est de type non intrusif, fixé sous le cockpit, et n'a impliqué aucune modification notable de l'appareil, il ne provoquait donc pas *a priori* de perturbation pour le pilote (ex. ne masquait aucune partie de la visibilité extérieure ou du cockpit). En outre, l'appareil possède une capacité de reprise dynamique du regard en cas de mouvements de têtes importants. L'eye tracker (oculomètre) a été fixé sous la partie gauche du cockpit en face du siège du pilote (Fig. 77), une caméra de scène a été fixée à l'arrière du pilote sur une partie fixe de la verrière. La synchronisation et l'acquisition des données ont été effectuées par le biais d'un convertisseur analogique/numérique, une carte externe Tobii et un ordinateur portable Sony Vaio laptop. Ces trois appareils légers étaient logés dans le compartiment à bagages.

²⁸ L'eye tracker Tobii x50 a été gracieusement mis à la disposition de l'ISAE par la société "Pilot Vision".

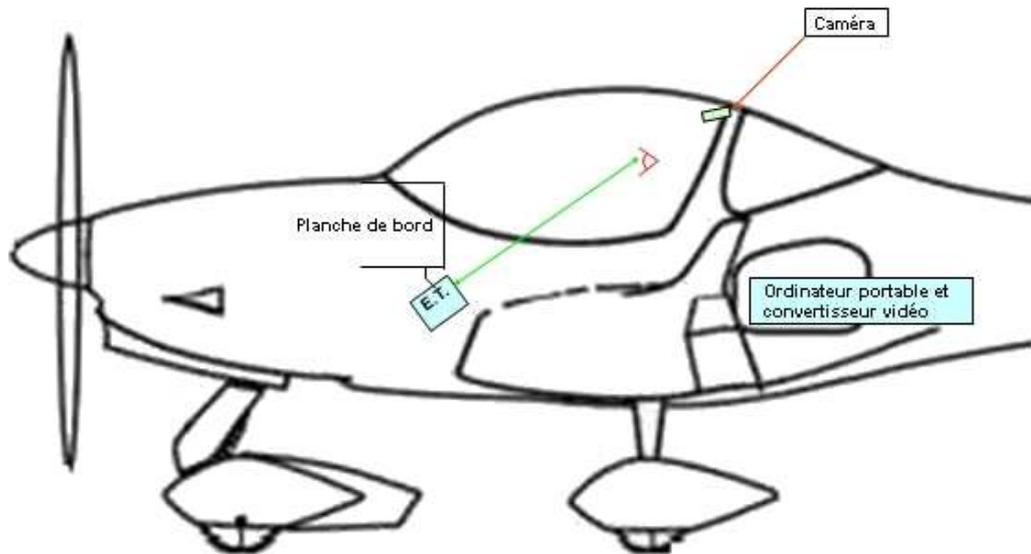


Fig. 77 : L'eye tracker (E.T) était fixé sous la planche de bord, les appareils de traitement des données étaient placés dans le compartiment à bagages et synchronisaient en temps réel les données d'oculométrie et les données vidéo provenant de la caméra de scène.

Les caractéristiques techniques de l'eye tracker ainsi que sa position particulière ont limité le suivi du regard à la partie gauche de la planche de bord, zones où sont localisés les instruments principaux de vol (tachymètre, altimètre, horizon etc.). Comme il est montré Fig. 78 et Fig. 79, il n'était pas possible d'obtenir les directions de regard en dehors de cette zone (*i.e.* les regards vers l'extérieur ou sur les instruments localisés dans la partie droite).



Fig. 78 : Le point bleu représente le point de fixation actuel du pilote. Dans la figure, celui-ci fixe l'anémomètre, instrument affichant la vitesse de l'appareil, une information capitale au moment du décollage.

III.3.1. Les aires d'intérêt

Un logiciel d'analyse dédié fournissait en temps réel les données telles que le datage, les coordonnées du regard du pilote (x,y) ou encore le diamètre pupillaire. Il était également possible de déterminer le nombre et la durée des fixations sur des aires d'intérêt définies au moment du traitement des données oculométriques. Dans le but d'étudier le comportement visuel du pilote, 14 aires d'intérêt, correspondant chacune à un instrument de la partie gauche de la planche de bord, ont été définies. Les instruments étaient les suivants : (1) température extérieure, (2) conservateur de cap, (3) témoin de pression du collecteur d'admission, (4) alarme, (5) anémomètre, (6) horizon, (7) altimètre, (8) tachymètre (indicateur du régime moteur), (9) indicateur de virage et de dérapage (bille-aiguille), (10) gyroscope directionnel, (11) vitesse verticale, (12) VOR (abréviation de VHF Omnidirectional Range), (13) interrupteurs, (14) volets (Fig. 79).



Fig. 79 : Les 14 rectangles bleus illustrent les 14 zones d'intérêt qui ont été définies au moment du traitement des données.

III.3.2. Réponse pupillaire

Les directions de regard et le diamètre pupillaire étaient enregistrés en continu tout au long de l'expérimentation. Afin de limiter l'effet de la baisse de la luminosité au cours du temps, nous avons utilisé des valeurs delta pour nos analyses (diamètre pupillaire moyen au cours de la séquence étudiée, ex : étape de base - diamètre pupillaire moyen calculé sur l'ensemble de la phase de vol, nominale ou dégradée). Le niveau de luminosité ambiant était enregistré grâce à un luxmètre pour déterminer les phases de vol où il demeurait suffisamment constant. En nous basant sur des travaux (Gupta, Schwiegerling, & Straub, 2001) portant sur la variation pupillométrique en fonction de la quantité de lumière pénétrant l'œil, nous avons limité nos analyses à des séquences où la variation lumineuse était très faible et durant lesquelles l'intensité restait inférieure à 25 lux.

IV. Résultats

IV.1. Résultats comportementaux

Etant donné la faiblesse de notre échantillon, les données obtenues ne suivaient pas une distribution normale, des analyses statistiques non paramétriques ont été employées. L'ANOVA de Friedman a été utilisée pour les analyses globales, le test de Wilcoxon a été employé pour les comparaisons deux à deux. Tous les tests statistiques ont été effectués avec le logiciel Statistica 7.1 (© StatSoft).

Dans un premier temps, nous avons analysé le comportement oculaire au cours de la « check-list 2000 pieds» (Fig. 80), qui oblige le pilote à vérifier différents paramètres critiques à cette altitude. Les résultats montrent que le comportement oculaire des pilotes est cohérent avec la procédure idoine (Tableau 10). Le tachymètre a été l'instrument le plus fixé (*tachymeter*, 46.71%), vient ensuite le capteur de pression du collecteur d'admission (*manifold pressure*, 29.78%) et l'anémomètre (*airspeed*, 14.12%). D'autres paramètres non spécifiés, tel que l'horizon artificiel, sont également vérifiés pour des raisons de sécurité.

Tableau 10 : Check-list 2000 pieds de l'Aquila ATO1 (Schimederer, 2005).

<i>Altimeter</i>	set
<i>Directional</i>	Checked
<i>Engine instruments</i>	Checked
<i>Manifold pressure</i>	25 inches
<i>Tachymeter</i>	2000 RPM

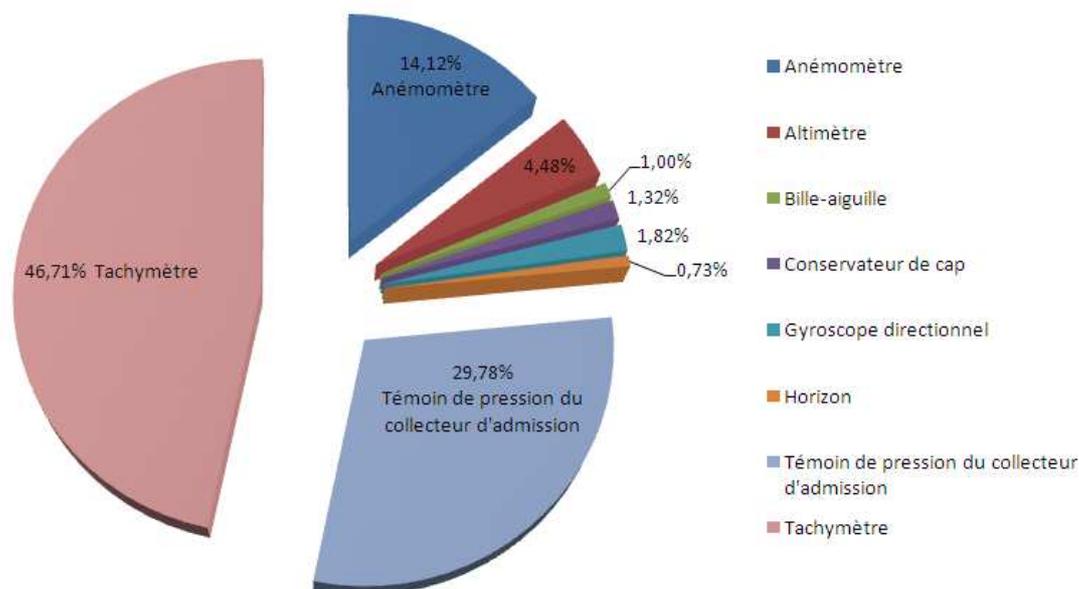


Fig. 80 : Fixation en pourcentage de temps total passé sur les principaux instruments d'intérêt au cours de la « check-list 2000 pieds ».

Le temps de fixation sur chaque instrument est exprimé en pourcentage par rapport au temps total passé sur l'ensemble des instruments définis par les aires d'intérêts. Les temps de fixation sur les différents instruments durant la séquence d'atterrissage nominale vs. la séquence dégradée sont présentés en Fig. 81. Les résultats démontrent une réduction du nombre d'instruments fixés pendant la séquence dégradée en regard de la séquence nominale. Durant la séquence nominale, tous les instruments ont fait l'objet de fixations (excepté le panneau d'alarme) alors que seulement dix instruments ont été observés par le pilote lorsque l'atterrissage s'effectuait avec la simulation de panne. Plus précisément, le compas, les interrupteurs et le tachymètre sont absents de la liste. De plus, un résultat très net concerne la proportion de temps passé sur l'anémomètre par rapport aux autres instruments, plus important lors de la séquence dégradée que lors de l'atterrissage nominal (77.49 % vs. 58.12 %). Un dernier résultat concerne le temps total passé à regarder les instruments durant la séquence d'atterrissage dégradée par rapport à la séquence d'atterrissage nominale. Durant l'atterrissage dégradé, le temps passé sur les instruments était moins important que durant la séquence nominale. Cette observation met très vraisemblablement en évidence un temps plus important passé à recueillir des informations visuelles externes à l'aéronef (Fig. 82).

Plus anecdotique, l'analyse des zones fixées pendant l'atterrissage chez un pilote a permis de relier l'absence de prise d'information sur le bouton de commande actionnant les volets hypersustentateurs avec l'oubli ultérieur d'une action pourtant requise sur ces derniers.

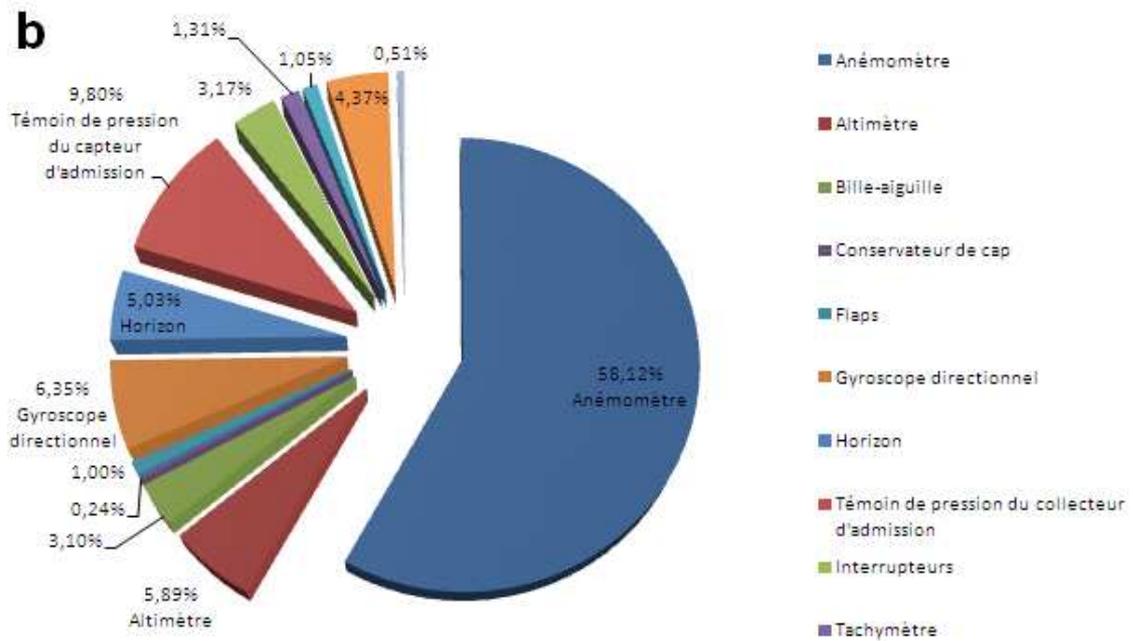
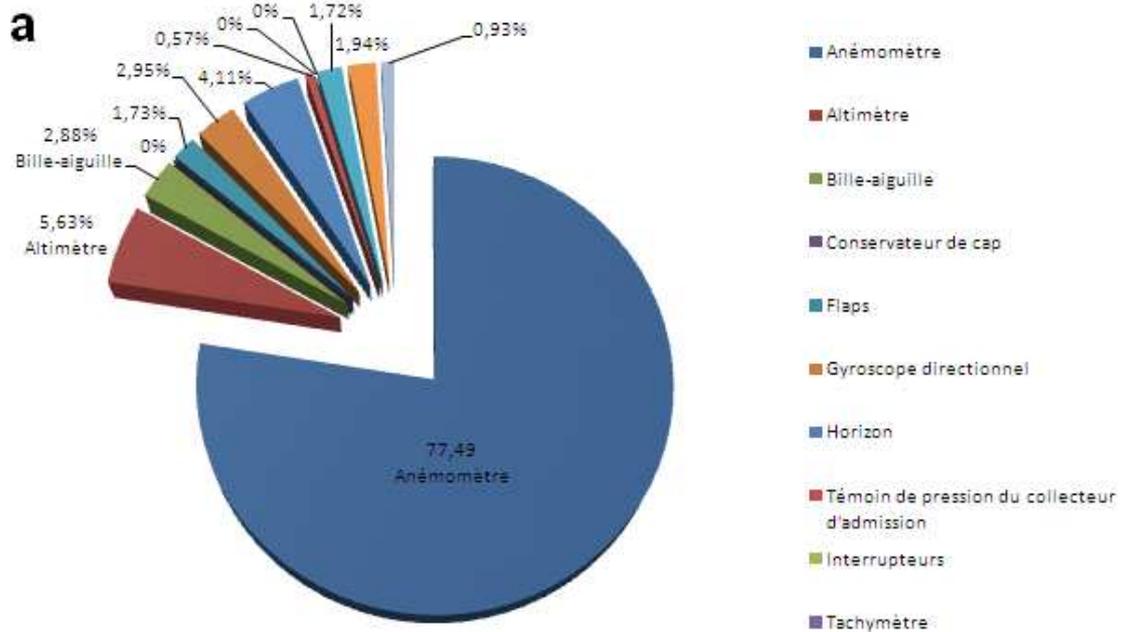


Fig. 81 : Pourcentages de temps de fixation par instruments calculés en fonction du temps total passé sur ces derniers par les six pilotes. Le graphique a concerne la séquence d’atterrissage dégradée, le graphique b la séquence nominale, dans les deux cas, depuis l’étape de base jusqu’à l’arrondi (lorsque le pilote tire sur le manche, juste avant le toucher des roues).

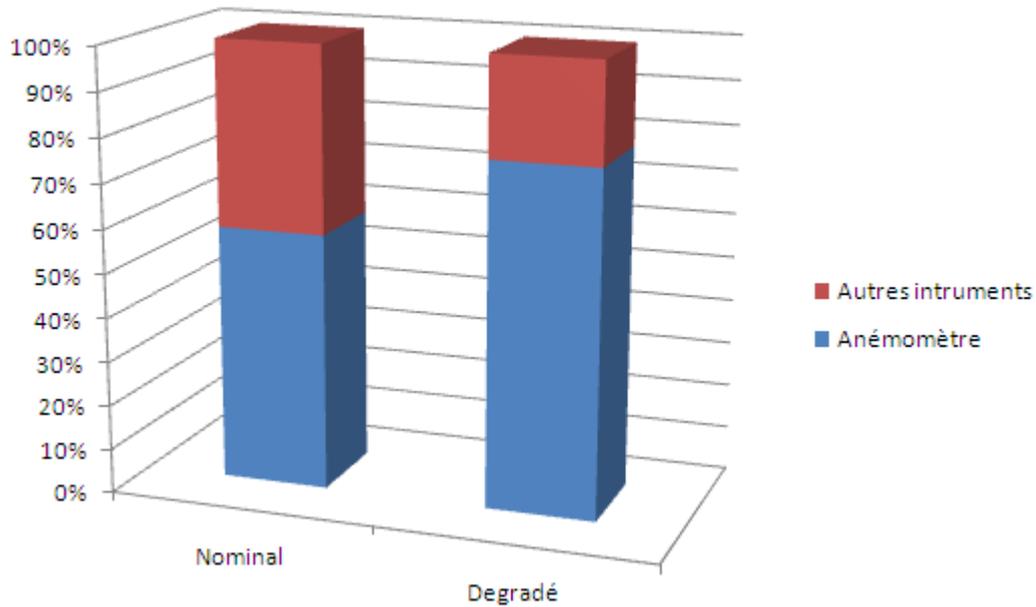


Fig. 82 : Proportion de temps passé sur l'anémomètre (*airspeed*) et sur les autres instruments durant la séquence d'atterrissage nominale et dégradée.

IV.2. Réponse pupillaire

Les données oculométriques ont été filtrées afin d'éliminer les artefacts de mesure (filtre passe bas). En dépit du fait que les expérimentations commençaient dès la tombée de la nuit, les variations de luminosité ne permettaient pas d'analyser la réponse pupillaire pour les deux séquences (Tableau 11). En tenant compte de ce point, nous n'avons pu raisonnablement qu'analyser la réponse pupillaire des pilotes 1 à 4 en ne prenant en compte que la séquence dégradée qui se déroulait plus tard dans la chronologie de l'expérimentation et donc avec une luminosité ambiante plus faible (*i.e.* inférieure à 25 lux). En effet, pour ces données précises, la fluctuation de luminosité ambiante reste raisonnable, la variation maximale se produisant pour le pilote 1, avec un écart de 13 lux entre le début des enregistrements et la fin de ceux-ci.

Tableau 11 : Mesures des fluctuations de la luminosité pour chaque pilote au début et à la fin de chacune des deux séquences de vol. Par exemple le pilote 1 a démarré la séquence nominale avec 127 lux de luminosité ambiante et l'a terminée avec 40 lux, puis a commencé la séquence dégradée avec une luminosité de 20 lux et l'a terminé avec une luminosité de 7.

Pilote ID	Variations de la luminosité (en lux)	
	Séquence nominale	Séquence dégradée
1	127-40	20-7
2	82-36	8-4
3	90-35	10-6
4	93-33	12-10
5	473-230	220-91
6	610-600	520-380

En dépit du très faible échantillon disponible pour les analyses de la réponse pupillaire nous avons tout de même effectué une comparaison des réponses pupillaires moyennes au cours de la séquence dégradée, pour les pilotes dont la variation de luminosité demeurerait raisonnable (n=4). L'ANOVA de Friedman a révélé que les quatre phases de la séquence dégradée s'accompagnaient d'un diamètre pupillaire significativement différent ($p=.019$). Le test deux à deux de Wilcoxon ne révèle cependant pas d'effet significatif (Fig. 83).

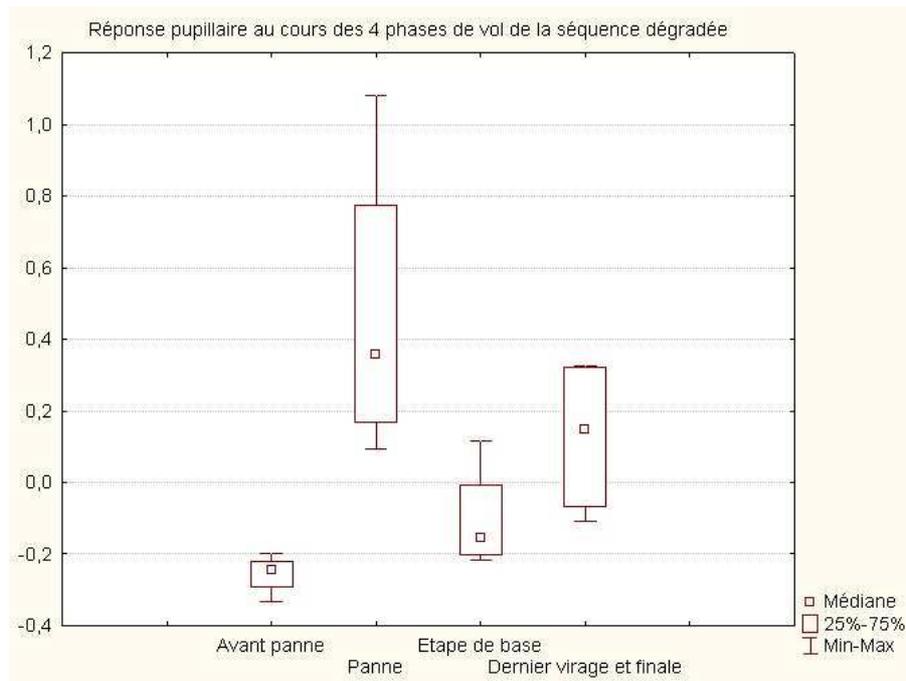


Fig. 83 : Réponse pupillaire (en millimètres) en fonction des 4 phases de vol durant la séquence dégradée, respectivement : une minute avant la panne, au moment de la panne lors du vent de travers, au cours de l'étape de base puis lors du dernier virage jusqu'au toucher.

V. Discussion

L'introduction d'un nouvel instrument de mesure à bord d'un aéronef dans le but de poursuivre des études en facteur humain doit satisfaire à trois contraintes : 1) l'appareil ne doit pas perturber l'activité du pilote, (2) il doit atteindre un niveau de fonctionnement satisfaisant dans des conditions de vol réel, (3) il doit être bénéfique et améliorer la qualité de l'interaction interface homme machine, en particulier, dans ce cas précis, en ce qui concerne le thème de la sécurité. Ce travail préliminaire s'inscrit dans une démarche neuroergonomique et offre un certain nombre de pistes quant à la faisabilité d'employer un eye tracker à bord d'un avion léger. Les observations recueillies auprès des six pilotes après le vol confirment que l'eye tracker n'a pas perturbé leur pilotage. Néanmoins, ce type de dispositif est limité en angle de mesure car il nous a seulement été possible de suivre le regard du pilote sur la planche de bord située en face de lui. Ces limitations devraient pouvoir être surmontées lors d'une prochaine expérimentation grâce à l'acquisition de nouveaux capteurs de type "tête portée", ne réduisant plus la scène visuelle à une zone fixe. Cependant, la généralisation de tels outils de mesure nécessite probablement encore

de grandes avancées technologiques, qu'il soit fixes (augmentation du cône d'acquisition) ou portés (miniaturisation et intégration dans de simples lunettes ?).

En dépit de ces limitations, les résultats préliminaires ont apporté la preuve qu'il est possible d'étudier le comportement oculaire du pilote durant son activité réelle. Les analyses des aires d'intérêt permettent d'obtenir de précieux indices sur le type d'information nécessaire au pilote, en particulier lors d'évènements critiques comme la *check-list*, qui s'est révélée être également un excellent moyen de vérifier la fiabilité du dispositif :

- Le pattern visuel est codifié par une procédure officielle et peut servir de modèle de référence ;
- Ces séquences sont très courtes (moins de 10 secondes) et les paramètres vérifiés par les pilotes sont vitaux.

De telles contraintes nécessitent de la part des pilotes d'encoder les informations référencées dans la procédure officielle et permettent d'établir l'hypothèse que chaque instrument observé est le résultat d'une activité visuo-attentionnelle consciente et volontaire. Dans cette perspective, les analyses des aires d'intérêt durant la *check-list* montrent que le tracé des regards des six pilotes se limite à huit instruments. Plus précisément, les pilotes ont porté leur regard sur le tachymètre, le témoin de pression du collecteur d'admission, l'anémomètre, l'altimètre, le gyroscope directionnel, le conservateur de cap, la bille-aiguille et le gyroscope d'horizon. Ces zones sont cohérentes avec celles définies dans la *check-list* officielle de l'Aquila : le tachymètre et le témoin de pression dans le collecteur d'admission doivent être positionnés sur des valeurs particulières et le résultat de ces ajustements implique, pour des raisons techniques, la vérification implicite de l'anémomètre, de l'altimètre puisque cette *check-list* doit se faire précisément à 2000 pieds et la valeur du gyroscope directionnel qui est effectuée par une comparaison rapide avec la valeur du conservateur de cap. Bien qu'ils ne soient pas expressément spécifiés dans la *check-list*, il est tout à fait logique que des indicateurs de vol tels que le gyroscope d'horizon ou la bille-aiguille soient supervisés par le pilote dans le but de stabiliser parfaitement l'avion sur ses trois axes (tangage, roulis et lacet) afin d'effectuer la *check-list* dans des conditions optimales. Il faut noter que certaines des actions pourtant requises n'ont pas été détectées par l'oculomètre. Cependant, le *trim* (permettant le réglage de la profondeur, c'est à dire de l'assiette de l'avion) et les instruments moteurs (ex. indicateur de pression) sont situés sur la partie droite de la planche de bord où l'eye tracker n'était pas capable de recueillir les fixations.

Les analyses des temps de fixation sur les aires d'intérêt durant la check-list ont montré que le pilote focalise particulièrement sur le tachymètre (46.71 %), la bille-aiguille (29.78 %) et l'anémomètre (14.12 %). Les entretiens avec les pilotes ont confirmé que la gestion des paramètres moteurs requiert une grande demande attentionnelle : des ajustements très précis sont nécessaires au niveau du régime moteur, de la pression dans le collecteur d'admission et de l'anémomètre. Les pilotes passent moins de temps à vérifier des instruments tels que l'altimètre (4.48%), le gyroscope directionnel (1.82 %) ou le conservateur de cap (1.32 %). En effet, les discussions avec les pilotes révèlent que l'altitude est rapidement vue afin de vérifier qu'elle est bien de 2000 pieds (*i.e.* pour commencer la check-list). Ils ont également rapidement observé le gyroscope directionnel et le compas : étant donné que les pilotes ne réalisaient pas une navigation complexe, la vérification croisée de ces deux instruments était de moindre importance. Sur ces bases, ces résultats sont consistants avec des recherches montrant la relation entre temps de fixation et importance de l'information (Bacs & Walrath, 1992; O'Donnell & Eggemeier, 1986; Wilson & Eggemeier, 1991).

Les comparaisons des temps de fixation sur les aires d'intérêt, recueillis au cours de l'atterrissage pendant la séquence nominale avec la séquence dégradée, révèlent différents patterns oculaires. Premièrement, la durée moyenne totale des fixations sur les instruments pendant la séquence nominale était plus de deux fois supérieure au temps des fixations obtenus pour la séquence dégradée (13.59 secondes vs. 5.53 secondes). Cela suggère vraisemblablement que les pilotes passent plus de temps à recueillir des informations extérieures au cockpit pour évaluer et adapter leur trajectoire par rapport à la piste. Un autre résultat majeur concerne la variété des zones d'intérêts observées, différentes pendant les deux atterrissages. Le nombre d'instruments observés est moins important durant la condition dégradée et la part relative de l'anémomètre s'est fortement accrue pendant la séquence dégradée par rapport à la séquence nominale (respectivement 77.49% vs. 58.12%). Un premier élément de réponse concerne la pertinence des instruments au cours de la situation dégradée, le pilote n'ayant aucun intérêt à vérifier le tachymètre ou la pression du collecteur d'admission étant donné que le moteur est en arrêt simulé. Ensuite, d'autres informations recueillies au cours des entretiens tendent à expliquer l'importance de l'anémomètre : au cours de la séquence dégradée, où les gaz sont coupés, ce paramètre de vol est particulièrement crucial pour la bonne tenue de l'avion et pour maîtriser l'énergie de ce dernier au moment de l'atterrissage. Les pilotes sont ainsi fortement focalisés sur cet instrument pour vérifier la vitesse et le cas échéant décider d'interrompre la panne simulée pour une remise de gaz plus sûre.

Il faut rester très prudent sur les analyses de la variation pupillaire portant sur seulement quatre pilotes. Elles semblent toutefois montrer que le diamètre était différent en fonction des séquences de vol. La réponse pupillaire moyenne était de -0.25 mm avant la simulation de panne, +0.47 mm après la panne et pendant le vent de travers, -0.10 durant l'étape de base et +0.12 depuis le dernier virage jusqu'au toucher final. Ces résultats semblent cohérents avec les propos recueillis chez les pilotes qui rapportent un état de charge mentale et d'anxiété élevé immédiatement après le déclenchement de la panne, ensuite, une anxiété plus basse est rapportée pendant l'étape de base. Ces mesures sont cohérentes avec la charge de travail rapportée par les pilotes après chaque vol : la phase de vol qui suit le déclenchement de la panne (vent arrière) nécessite une forte demande attentionnelle pour arriver à stabiliser l'avion avec des paramètres précis. C'est lorsque cette phase est terminée que les pilotes savent s'ils vont pouvoir réussir leur atterrissage : ainsi on observe un certain relâchement attentionnel durant l'étape de base. Finalement, un autre pic d'anxiété et de charge mentale est à nouveau ressenti pendant l'atterrissage en raison de la précision nécessaire et du stress généré par la perspective d'une potentielle remise de gaz en cas d'approche non parfaitement sécurisée. Bien que portant sur un nombre très limité de pilotes, ces résultats montrent qu'il est possible de discriminer de manière très fine des séquences de vol limitées dans le temps. De telles données, à condition qu'elles soient reproduites dans de futures expérimentations, pourraient conduire à un modèle de référence physiologique.

VI. Conclusion

Les pilotes sont confrontés à des situations de stress qui peuvent diminuer leurs performances : par exemple la pression temporelle, les conditions météorologiques, les pannes ou encore toutes situations inhabituelles et imprévues. Alors qu'une littérature grandissante (Dussault, Jouanin, Philippe, & Guezennec, 2005; Schnell, Macuda, Poolman, & Keller, 2006) met en lumière les effets de scénarios de vol complexes sur l'anxiété, les performances de pilotage et les paramètres physiologiques, les expérimentations en vol réel restent extrêmement rares. Pourtant, l'eye tracking embarqué offre des voies prometteuses en termes de *monitoring*, à la fois des actions du pilote et de son état physiologique en situation réelle. Premièrement, les analyses des aires d'intérêt ont montré la fiabilité de l'outil à prédire des comportements, par exemple pendant l'atterrissage. Il a été possible de relier l'absence de prise d'information sur le bouton de

commande actionnant les volets avec l'oubli ultérieur d'une action pourtant requise sur ce dernier. De plus, l'analyse des aires d'intérêt permet d'apporter des informations sur les différents comportements visuels en fonction des deux différentes situations d'atterrissage (nominale et dégradée). Deuxièmement, les mesures de la dilatation pupillaire apportent des données sur l'état émotionnel et/ou la charge mentale. La variation du diamètre pupillaire apporte des indices sur l'état émotionnel. Au vu des résultats portant sur quatre pilotes, nous pouvons supposer que le diamètre pupillaire a effectivement bien évolué significativement en fonction des quatre phases de l'atterrissage dégradé. Ces résultats tendent à confirmer la possibilité d'utiliser l'oculométrie dans un but de *monitoring* d'état physiologique. Le diamètre pupillaire moyen est apparu comme étant le plus important lors de la période de gestion de la panne. Cette observation est cohérente avec l'augmentation en termes de demande mentale et/ou d'anxiété durant cette phase de vol très critique. De plus, l'occurrence de différents patterns des fixations oculaires durant cette panne, par rapport à la séquence d'atterrissage nominale, appuie ces résultats. Un futur travail prendra place lors de la nuit totale pour s'affranchir de la problématique de la variation lumineuse et produire des résultats plus robustes, en particulier afin de pouvoir comparer la réponse pupillaire au cours de la séquence nominale avec la séquence dégradée. Dans un avenir proche, des cockpits sans verrières et donc sans luminosité extérieure pourraient apparaître, l'analyse de la réponse pupillaire au cours du quotidien des pilotes pourrait devenir une réalité.

3^e partie :
Discussion et perspectives

I. Discussion générale

Durant ce travail de thèse, nous avons abordé plusieurs thèmes relatifs à l'implication de l'opérateur l'humain dans la sécurité aéronautique. Nous avons vu que les erreurs décisionnelles continuent de représenter une large part des facteurs d'accidents. En aviation commerciale, ces mauvaises décisions s'observent notamment lors de la phase d'approche et d'atterrissage, où certains équipages persistent à vouloir mener absolument le plan de vol à son terme, malgré des conditions de sécurité ne le permettant pas. Les études en facteurs humains montrent que ce type de comportement est expliqué par différents facteurs psychosociaux ainsi que par certains biais cognitifs. De plus, d'autres facteurs sociétaux émergent, comme les pressions financières ou l'augmentation de l'âge moyen des pilotes en aviation générale. Les pressions financières sont également suspectées de favoriser cette tendance à vouloir atterrir, alors que les effets du vieillissement cognitif sur le pilotage sont plus flous et restent à préciser. Ainsi, nous avons principalement abordé trois grandes problématiques : les facteurs émotionnels pesant sur les prises de décision au moment de la phase d'atterrissage ; le vieillissement des pilotes et l'estimation de ses effets sur les fonctions exécutives d'une part, et sur le pilotage d'autre part ; la mesure de l'état psychophysique du pilote, par oculométrie, en situation de vol réel, qui a constitué pour nous l'occasion d'opérationnaliser *in situ* des mesures comportementales et de l'activité du SNA. Nous nous sommes attachés à adopter une approche issue du champ de la neuroergonomie, en employant des techniques de neuroimagerie, des tests d'évaluation neuropsychologique, des mesures psychophysiques en lien avec l'activité cérébrale, puis nous sommes ensuite allés sur le terrain du pilote, afin de réaliser des mesures oculométriques en vol réel. Cette approche intégrative, rassemblant des outils des neurosciences et les mettant au service de l'amélioration des conditions de travail de l'opérateur dans son activité quotidienne constitue l'originalité de l'approche neuroergonomique. D'un point de vue théorique, l'hypothèse du continuum cognitif a guidé nos investigations. Elle nous a permis d'organiser notre travail autour du fonctionnement exécutif, habiletés intellectuelles de haut niveau qui, de part leur sensibilité, constituent une cible idéale aux effets de l'émotion et du vieillissement.

L'observation de phénomènes proches du syndrome dysexécutif chez des opérateurs extrêmement spécialisés, tels que les pilotes d'avion (Dehais, 2004), peut s'expliquer par la théorie du continuum cognitif (Pastor, 1999). Cette hypothèse suppose que le fonctionnement intellectuel d'un individu, à un instant donné, se situe quelque part sur un continuum. L'individu, en fonction de son positionnement sur ce continuum, peut montrer des performances tout à fait

optimales aussi bien qu'extrêmement dégradées, et ce, en fonction de son état de fatigue ou de certains facteurs endogènes ou exogènes. Ce cadre théorique nous semble être tout à fait pertinent pour interpréter et mieux comprendre certains accidents aéronautiques.

I.1. Contribution à la définition de batteries neuropsychologiques prédictives de la performance de pilotage

Contrairement à l'aviation commerciale, où l'âge des pilotes est limité dans certains pays à 65 ans aujourd'hui (USA), l'aviation générale, à l'instar de la conduite automobile, n'a pas établi de règles précises à ce sujet. Au sein de la littérature, l'ambiguïté règne encore en ce qui concerne les effets précis de l'âge sur la performance de pilotage. Selon nous, cette absence de consensus est en partie liée à la grande difficulté d'établir des précurseurs cognitifs pouvant prédire avec fiabilité la performance de pilotage. Les fonctions exécutives sont de bonnes candidates dans la mesure où les altérations du cortex préfrontal liées au vieillissement ont un impact fonctionnel majeur sur sa partie dorsolatérale (MacPherson et al., 2002), et plus modéré sur sa partie ventromédiane (Baena, Allen, Kaut, & Hall, 2010). De ce fait, les FE sont les fonctions les plus sensibles aux effets du vieillissement (Raz, 2000; Tisserand & Jolles, 2003; West & Baylis, 1998) et leur déclin est soupçonné responsable d'une très grande partie des troubles cognitifs observés au cours du vieillissement normal (Moscovitch & Winocur, 1995). En opposition aux altérations temporaires des FE sous l'effet du stress ou de l'émotion, les effets du vieillissement normal sur le fonctionnement exécutif sont considérés comme irréversibles. Le seul moyen de réduire l'effet potentiellement néfaste de leur altération sur la sécurité aérienne, consiste à identifier précisément les composantes critiques pour le pilotage ainsi que les seuils au delà desquels la performance se dégrade. Nous avons mis au point un protocole contrôlant certains aspects (expérience, personnalité...) afin d'observer les effets du vieillissement sur les FE et leur impact sur le pilotage. Cette performance était mesurée selon deux aspects. L'écart au cap théorique, indice fiable de la performance de pilotage primaire et des performances de plus haut niveau (ex : l'utilisation des instruments de radionavigation ou la réalisation de tâches parallèles); la prise de décision au moment de l'atterrissage, permettant d'évaluer si le pilote a bien remis les gaz, en accord avec les nécessités du contexte. Nous émettions l'hypothèse que l'âge à lui seul ne

suffit pas à prédire l'habileté à piloter, mais que le fonctionnement exécutif, en revanche, en est un prédicteur plus fiable. D'une certaine façon, nous émettions l'hypothèse que l'âge chronologique serait un critère discriminant moins pertinent que l'âge cognitif.

Concernant les effets de l'âge sur le fonctionnement exécutif, les effets les plus massifs concernaient le fonctionnement mnésique (mise à jour et maintien), la vitesse générale de traitement et dans une moindre mesure, les capacités d'inhibition et la flexibilité mentale. Ce déclin semble être plus abrupt autour de 55 ans. C'est le cas par exemple pour les performances à la tâche du 2-back, tâche de mise à jour en mémoire de travail, où à partir de 55 ans, six participants sur sept ont un taux de bonnes réponses inférieures à 70%, ce qui n'est le cas pour aucun des autres participants plus jeunes. Il est intéressant de constater ce déclin cognitif nonobstant un niveau d'éducation élevé. Cela confirme les résultats de Tucker-Drob (2009) qui tendent à montrer que l'éducation n'a pas d'effet neuroprotecteur. Elle favoriserait des capacités de raisonnement supérieures à un âge avancé, mais n'aurait pas d'influence sur la vitesse du déclin cognitif. La chute est la même, mais elle débute d'un niveau supérieur.

Concernant la discrimination de facteurs prédictifs, l'âge ne s'est pas avéré être un prédicteur significatif de la performance de pilotage ni de la pertinence de la prise de décision au moment de l'atterrissage. L'écart au cap s'est avéré être prédit par la performance de raisonnement, variable qui à elle seule expliquait 30.9% (40,6% pour la corrélation) de la variation de la mesure. Ce résultat est d'autant plus intéressant que les capacités de raisonnement n'étaient pas impactées de façon significative par les effets du vieillissement. Ces observations sont cohérentes : la mesure de l'écart au cap agrège les performances liées à la réalisation de tâches diverses. Il reflète à la fois la capacité primaire de pilotage et l'efficacité de fonctions cognitives de plus haut niveau, sollicitées par l'utilisation des systèmes de radionavigation, par le *monitoring* constant des instruments de vol, par l'évaluation de la distance parcourue et de la distance restante, par l'utilisation de la boussole anti-directionnelle après la panne etc.

Les variables prédictives de la décision erronée d'atterrir ont été : les capacités de maintien et de MAJ en MDT, évaluées par le 2-back, l'expérience de vol totale et l'impulsivité motrice. Les capacités de mise à jour sont cruciales à la réalisation correcte de cette prise de décision. En effet, elle repose sur l'intégration des nouvelles conditions météorologiques, se dégradant progressivement, ainsi que sur la MAJ du modèle de situation et sur le renoncement au plan de vol pour se dérouter. Par ailleurs, les spécifications techniques de l'appareil, concernant le vent traversier maximum autorisé, appris par le pilote lors de la préparation du vol, doivent être maintenues en MDT et portées à la pleine conscience avant l'atterrissage afin de prendre une

décision basée sur ce paramètre extrêmement important. Enfin les performances de mémoire de travail conditionnent la rétention des messages ATIS. Le rôle de l'expérience dans la qualité de la prise de décision confirme son effet bénéfique dans la performance de pilotage et est à associer à une meilleure évaluation du risque chez les pilotes expérimentés (2002). Enfin, la participation significative de l'impulsivité motrice dans le processus de prise de décision est un résultat inédit en aéronautique, il est à mettre en lien avec l'augmentation de la prise de risque.

L'âge n'a pas été un prédicteur significatif, ni de la performance de pilotage, ni de la décision lors de l'atterrissage. Il faut toutefois prendre des précautions avant de tirer des conclusions définitives. On peut supposer que le choix d'avoir sélectionné une population s'étalant sur l'empan complet de l'âge a limité les effets du vieillissement. Un design en groupes extrêmes (McClelland & Judd, 1993) aurait pu peut être permettre d'observer davantage de FE prédicteurs, mais aussi de faire ressortir un effet plus global, lié à l'âge. Par ailleurs, l'expérience de vol totale était proche d'être corrélée à l'âge, en raison de quelques pilotes instructeurs chez les plus âgés. Ces derniers ont pu vraisemblablement bénéficier des effets de l'expérience (Taylor et al., 2007). Ces effets bénéfiques sont liés à des stratégies acquises avec l'expérience, qui viennent soulager le fonctionnement exécutif.

I.2. Contribution à la compréhension du facteur émotionnel durant l'atterrissage

Des pilotes sont parfois amenés à poursuivre l'atterrissage au mépris des règles de sécurité élémentaires car la perspective d'une remise de gaz est associée à un ensemble de sentiments négatifs. Elle génère une forte anxiété de l'équipage et de l'ensemble des passagers ainsi que des difficultés pratiques pour se réinsérer dans la circulation aérienne. Elle crée également une frustration chez le pilote qui peut vivre cette situation comme une défaite. Enfin, certaines compagnies peuvent exercer une pression à atterrir, en raison des coûts importants engendrés par une remise de gaz. Ainsi, bien que la formation des pilotes pousse désormais à considérer l'atterrissage comme un fait normal, la tendance à vouloir se poser absolument reste un phénomène couramment observé.

L'expérimentation psychophysologique et les données IRMf préliminaires constituent la tentative, en adoptant pleinement les outils de la neuroergonomie, de mieux comprendre les

mécanismes cérébraux pouvant faire passer d'une décision à « froid », rationnelle, à une décision à « chaud », plus émotionnelle. Ce basculement entre les deux types de raisonnement permet d'observer les mécanismes exécutifs en lien avec l'analyse d'une situation complexe et de les comparer avec un type de raisonnement plus orienté vers la maximisation des gains. L'association de la psychophysiology à l'IRMf permet par ailleurs de déterminer des corrélats périphériques à l'activité cérébrale.

Une tâche s'inspirant de façon très simplifiée de la phase d'atterrissage a été développée en utilisant un instrument issu de cockpits d'avions de transport. Les pressions exercées par la compagnie ont été reproduites par une matrice de paiement. L'enjeu financier était réel aux yeux des participants, ceci dans le but de créer une véritable pression émotionnelle. L'étude psychophysiology a montré que la matrice de paiement, biaisée de manière à reproduire certaines pressions poussant à atterrir, incitait avec efficacité les participants à adopter un comportement plus risqué, notamment dans un contexte d'incertitude. Les données psychophysiology ont confirmé dans une certaine mesure la nature émotionnelle du biais généré par la matrice de paiement sur les prises de décisions. En particulier, le rythme cardiaque était significativement plus élevé lorsque la tâche était réalisée en présence de l'incitation financière qu'en situation contrôle. Bien que modeste en amplitude, cette élévation était très significative et allait dans le même sens sur l'ensemble des participants. Cette différence apporte un élément de preuve supplémentaire quant à la participation de processus émotionnels dans la réalisation de la prise de décision. On peut toutefois se demander si la modification du comportement ne repose pas, au moins en partie, sur des mécanismes cognitifs. Des analyses supplémentaires sont actuellement menées dans ce sens, l'expérimentation psychophysiology est réalisée à l'identique avec un système de récompense virtuel. Les analyses des données de neuroimagerie, bien que préliminaires, ont dévoilé des résultats tout à fait en adéquation avec la littérature (Goel & Dolan, 2003). Le passage de la prise de décision « à froid » à la prise de décision « à chaud » s'est traduit par un basculement de l'activation des circuits frontaux dorsolatéraux (siège principal des FE) vers un recrutement de régions frontales ventromédianes (fortement connectées au système limbique, siège des émotions). Par ailleurs, un accroissement de l'activité des aires visuelles V2 (Broadman 18) au cours de la condition sans incitation monétaire a également été retrouvé, suggérant des processus *top-down* en fonction des stratégies mises en place. L'argent rend ainsi « aveugle » le participant lorsque celui-ci est confronté à l'enjeu financier. Ces résultats confirment le fait qu'il est possible d'obtenir des données conformes à la littérature neuroscientifique, tout en adoptant un protocole relativement

réaliste, recréant un contexte aéronautique (être aux commandes d'un avion) en utilisant l'instrumentation d'un avion de ligne comme base aux stimuli supportant la prise de décision.

I.3. Opérationnalisation des résultats

Un dernier objectif de ce travail de thèse était de revenir au plus près du contexte opérationnel du pilote, afin d'effectuer en vol réel les mesures réalisées en laboratoire. Nous l'avons vu, actuellement, la compréhension des causes d'un accident intervient après coup, la détection en ligne d'une situation accidentogène relève encore de la gageure. L'entrée d'un pilote dans un état de stress trop important se traduit pourtant par des précurseurs physiologiques précoces qu'il serait possible de détecter. Nous avons employé un *eye tracker* comme outil de mesure. Il présentait le double avantage d'apporter des informations relatives au comportement (prises d'informations visuelles), ainsi qu'à l'état cognitif et émotionnel (dilatation pupillaire). Les pilotes participant à l'expérience ont réalisé un court scénario de vol réaliste, puis un atterrissage en situation dégradée (simulation de panne moteur). L'objectif étant de comparer les deux types d'atterrissages à partir des mesures réalisées avec l'eye tracker.

Le premier résultat apporté par l'étude a été de démontrer qu'il était possible d'embarquer un eye tracker dans un avion léger sans gêner notablement le pilote et sans compromettre la sécurité. A notre connaissance, il s'agit de la toute première étude oculométrique en vol réel, les expérimentations *in situ* étant extrêmement rares et portant sur des mesures physiologiques comme le rythme cardiaque (Veltman, 2002). Le deuxième résultat important est d'avoir pu vérifier la fiabilité du système à recueillir les fixations oculaires des pilotes, en dépit des conditions de luminosités externes. Ce résultat est basé sur l'enregistrement du comportement oculaire au cours de la « check-list 2000 pieds », qui oblige le pilote à vérifier différents paramètres critiques à cette altitude. Le comportement oculaire des pilotes était tout à fait cohérent avec la procédure idoine, démontrant ainsi la capacité de l'outil à recueillir les prises d'informations visuelles. Un troisième résultat concerne l'identification de patterns visuels différents obtenus lors de la situation d'atterrissage nominale par rapport à la situation dégradée. En particulier, le nombre d'instruments explorés était beaucoup plus restreint pendant l'atterrissage avec simulation de panne. De plus, l'anémomètre qui indique la vitesse air de l'appareil, instrument très important pendant une panne, était l'objet d'une quantité très importante des fixations oculaires, en comparaison des autres instruments. Pour finir, nous avons réussi à retrouver des variations du

diamètre pupillaire moyen différentes en fonction des segments de vol. Ces variations du diamètre pupillaire semblaient cohérentes avec les propos recueillis lors des entretiens réalisés avec les pilotes, évoquant le niveau de stress ou de charge de travail au cours de ces segments. Ces derniers résultats sont toutefois à prendre avec précaution étant donné le faible nombre de participants à l'étude (pour des raisons de sécurité, seuls des instructeurs pouvaient réaliser l'expérimentation). Ces résultats n'en demeurent pas moins encourageants et motivent la réplication d'une telle étude avec un modèle d'eye tracker de type tête portée permettant de recueillir un cône de fixation plus important.

I.4. Contribution générale

Nous avons tenté d'apporter une contribution à la compréhension de certains troubles observés chez des pilotes de ligne et de loisir. Nos résultats ont montré que la performance globale de pilotage était conditionnée par les capacités de raisonnement. L'âge biologique, quant à lui, n'est pas apparu comme étant un prédicteur fiable de cette habileté à piloter. Ces données vont dans le sens d'un certain nombre d'auteurs qui remettent en question les effets précoces de l'âge sur le pilotage (Li et al., 2003; Li et al., 2002). Nous estimons, à la lumière de nos résultats, qu'il est plus pertinent de prédire la capacité d'un individu à piloter en fonction de son « âge cognitif » plutôt que de son « âge biologique ». Par ailleurs, la persistance de certains pilotes à conserver à tort la décision d'atterrir s'est avérée être liée à différents facteurs, cognitifs, émotionnels et psychologiques. Le déclin de la MDT, de la MAJ en particulier, ou encore le passage d'une prise de décision à froid vers une prise de décision à chaud se sont accompagnés de cette tendance à atterrir à tort. Le manque d'expérience, potentiellement générateur d'une sous évaluation du risque pouvant encourager la prise de risque, a également été un facteur favorisant ce comportement.

II. Conclusion

II.1. Du normal au pathologique

Tout au long de ce travail, nous nous sommes efforcés d'aborder certains thèmes ayant trait aux facteurs humains en aéronautique, en utilisant des outils théoriques et pratiques issus des neurosciences et de la neuropsychologie. Le cerveau peut être perturbé dans son fonctionnement normal. En particulier, les habiletés cognitives supérieures telles que les fonctions exécutives, peuvent être fortement altérées par certains facteurs endogènes et permanents comme le vieillissement (Cabeza et al., 2002b; Salthouse, Atkinson, & Berish, 2003), ou exogènes et temporaires comme l'émotion (Ashby et al., 2002) et le stress (Schoofs et al., 2009). De nouvelles techniques, telles que l'imagerie en tenseur de diffusion, ne cessent de mettre en avant l'implication des altérations du cortex préfrontal dans ces dégradations (Grieve, Williams, Paul, Clark, & Gordon, 2007). Ce cerveau de l'individu normal, altéré pourtant, a constitué *ab initio* le fil rouge de notre travail. La science, en particulier la médecine, a depuis toujours séparé le normal du pathologique. Le terme normal entraîne une certaine ambiguïté. Il désigne tout à la fois un état pouvant être décrit par recensement statistique, à partir des mesures moyennes opérées sur un caractère présent chez les individus d'une espèce et démontrant un caractère constant ou dont les écarts sont considérés négligeables ; et un idéal, principe positif d'appréciation au sens de prototype ou de forme parfaite. S'agissant de l'homme, la question est de savoir si nous devons le considérer comme un système de lois, une organisation de différentes propriétés résultantes de l'ordre naturel. Trop souvent, les phénomènes singuliers sont considérés comme des exemplaires proches mais défailants à reproduire l'intégralité supposée de la réalité légale des invariants essentiels des lois de la nature. Sans tomber dans la noétique, ce n'est pas l'objet de cette thèse, nous considérons que des hypothèses du type de celle du continuum cognitif (Pastor, 1999) permettent d'aborder le fonctionnement intellectuel humain tout en s'abstrayant de cette dissociation normal/pathologique parfois artificielle. Dans la perspective du continuum cognitif, normal et pathologique ne s'auto-excluent pas, au contraire, ils dialoguent et se questionnent mutuellement. Bien entendu, cette méthode n'est pas nouvelle, le modèle pathologique sert depuis longtemps de modèle à la compréhension du fonctionnement normal. C'est notamment « grâce » aux lésions cérébrales de Phinéas Gage que le rôle de l'émotion dans la cognition a pu pénétrer le débat cognitif ; c'est « grâce » à la résection bilatérale pratiquée sur

les hippocampes du patient HM que les connaissances sur le fonctionnement mnésique, en particulier la dissociation mémoire à court terme/mémoire à long terme, ont pu faire de si fantastiques bonds en avant. Ce sont également les tristement célèbres leucotomies, pratiquées au milieu du 20^e siècle, qui ont aidé à comprendre l'implication extrêmement importante du cortex frontal, considéré jusqu'alors comme « région muette », dans la pensée abstraite et plus généralement le fonctionnement cognitif humain. Le mérite du continuum cognitif est d'importer ce type de paradigme à l'opérateur humain, dans son activité quotidienne, dans son travail, et d'éliminer les frontières hermétiques dissociant le sujet pathologique et normal, en considérant que des phénomènes inhérents au premier peuvent apparaître temporairement chez le second.

II.2. Du laboratoire au monde réel

L'analogie au réel que tentent de recréer les expérimentations menées en laboratoire est un parti pris dont il est encore très difficile de se défaire. D'un côté, des protocoles de recherches très contrôlés mais excluant une partie de la complexité du réel et de l'intensité de ses effets. De l'autre, des expérimentations plus écologiques, plus propres à la généralisation, mais complexes à maîtriser et débordant de variables parasites. Nous avons tenté de trouver un compromis pour répondre aux questions posées dans ce travail.

Le vieillissement cognitif des pilotes a été évalué au travers d'une batterie de tests neuropsychologiques. L'esprit, confronté à ce type de matériel, tente de réaliser la meilleure performance possible. Les résultats issus de ce type d'évaluation doivent être considérés avec précaution, la sensibilité et la spécificité des tests ne seront en effet jamais parfaites. Le transfert à la vie réelle est une question toute aussi problématique : l'anecdote de l'héminégligent²⁹ réussissant correctement un test après rééducation et se cognant contre le chambranle de la porte en sortant du cabinet médical est parlante. Sans tomber dans cet extrême, il faut toutefois prendre des précautions avant de tirer toute conclusion générale sur des phénomènes particuliers. De même, la performance de pilotage, telle que nous l'avons évaluée sur simulateur de vol, constitue forcément une représentation approximative du monde réel. Mais c'est par ce type d'approche que des mesures scientifiques précises peuvent être dérivées de l'activité de

²⁹ La négligence spatiale unilatérale se définit comme l'incapacité à « détecter, s'orienter vers, ou répondre à des stimuli porteurs de signification lorsqu'ils sont présentés dans l'hémiespace contralésionnel » (opposé à la lésion), généralement l'hémichamp gauche. Voir Gainotti (Gainotti, 1987).

pilotage. Le raisonnement et la mémoire de travail, en particulier la mise à jour et le maintien, sont apparus comme des fonctions intellectuelles cruciales à l'accomplissement de la tâche de pilotage. Ces résultats sont des pistes qui doivent être validées au cours d'études additionnelles qui devraient notamment se focaliser davantage sur certaines FE ayant montré des signes d'altération liés au vieillissement (comme l'inhibition, la flexibilité mentale ou la MAJ). La réalisation d'une tâche de pilotage sur un simulateur de vol encore plus réaliste (véritable cockpit, mouvements sur les trois axes) serait également intéressante d'un point de vue du transfert des résultats au monde réel.

L'étude des effets de l'émotion sur le pilotage s'est déroulée dans des conditions expérimentales que l'on pourrait considérer comme étant encore plus contrôlées que l'expérience sur le vieillissement. La tâche de pilotage a été simplifiée au maximum et le contexte dans lequel le participant la réalise, bardé de capteurs physiologiques ou allongé dans un IRM, s'éloigne fortement de celui des pilotes. Pourtant, nous avons pu observer des phénomènes semblables à ceux qui peuvent être observés dans le monde réel. Des individus ont montré que leur comportement pouvait être modifié par la présence de pressions financières et que ces variations comportementales s'accompagnaient de réponses physiologiques périphériques, indices d'un vécu émotionnel subjectif (Scherer, 2000). De plus, les résultats préliminaires de neuroimagerie semblent indiquer que ce comportement était sous-tendu par une activité cérébrale particulière, selon que les prises de décision étaient réalisées librement ou sous l'influence d'un facteur exogène. Ces résultats sont cohérents avec la littérature neuropsychologique, qui indique l'existence de régions spécialisées dans le traitement d'informations de natures cognitives ou émotionnelles (Bush et al., 2000; Drevets & Raichle, 1998; Goel & Dolan, 2003; Simpson et al., 2001a). Nous pensons que de telles données, extraites d'un environnement très contrôlé, peuvent expliquer au moins dans une certaine mesure, des phénomènes se produisant à plus grande échelle, comme les effets des pressions exercées par les compagnies sur les décisions des pilotes ou le stress généré par l'incertitude d'une approche non stabilisée. Si de simples artifices de laboratoires sont capables d'engendrer certains comportements, on peut penser que la réalité se charge de les contraindre avec encore plus de force.

Ayant conscience de ces limitations, la neuroergonomie incite à déployer de telles expériences dans l'environnement réel de l'opérateur. C'est ce que nous avons tenté de faire par l'étude en oculométrie à bord d'un avion léger. Certes, le nombre de participants est plus restreint, certes les conditions expérimentales sont plus difficiles (variation de la luminosité, difficulté à reproduire des scénarios de pilotage rigoureusement similaires entre les différents

pilotes etc.), mais cette confrontation au réel est riche d'enseignements. Les fixations visuelles ont ouvert une fenêtre sur le comportement du pilote, et étaient conformes aux informations qu'ils devaient recueillir, telles que celles spécifiées notamment dans les check-lists. Les variations du diamètre pupillaire, observées au cours de la panne simulée par rapport à la situation contrôle ont également apporté des informations confortant la pertinence des mesures du SNA pour évaluer l'état interne du pilote, confronté à des situations difficiles et stressantes. Cette étude laisse à penser qu'il sera à l'avenir possible de réaliser des études *in situ* de mieux en mieux maîtrisées, par l'emploi de nouvelles technologies de mesures (oculomètres tête portée) ou l'utilisation d'autres types d'avions, pouvant voler de nuit (vol IFR). Dans un avenir relativement proche, des avions sans verrière, permettant d'outrepasser totalement les problèmes de luminosité, devraient apparaître. L'analyse de la réponse pupillaire, afin, d'adapter par exemple l'interaction en cas de situation critique ou de surcharge, pourrait alors devenir une réalité quotidienne des pilotes. Notre travail constitue, nous l'espérons, une modeste contribution au challenge que constitue celui de la compréhension de l'humain dans son activité ordinaire.

III. Perspectives

III.1. Troubles addictifs dus aux antiparkinsoniens

La tâche d'atterrissage utilisée en psychophysologie et en IRMf a également été réadaptée au domaine de la pathologie et est actuellement employée dans un protocole de recherche mené à l'Inserm U825, en collaboration avec le Centre d'Investigation Clinique, sur la maladie de Parkinson. Chez certains patients, le traitement antiparkinsonien (L-DOPA³⁰) provoque des troubles comportementaux, en particulier, une appétence toute particulière à la récompense et à la gratification. L'objectif global de la recherche est de déterminer comment ce « syndrome de dysrégulation de la dopamine » va interférer avec les fonctions exécutives et éventuellement engendrer des troubles spécifiques, différents de ceux pouvant être occasionnés par la maladie elle-même. Dans ce protocole, deux groupes de participants ont été constitués : le premier intègre des parkinsoniens présentant de tels troubles comportementaux, un deuxième, des patients témoins ne présentant pas ces troubles. Les patients réalisent la tâche deux fois, en état « OFF »

³⁰ Ou levodopa.

(sans médication L-DOPA) et en état « ON » (après une prise de L-DOPA). Notre tâche s'intègre dans la partie comportementale de l'étude et vise :

- A vérifier que les parkinsoniens présentant le syndrome de dysrégulation de la dopamine démontrent effectivement une sur-motivation et une disposition exacerbée envers la recherche de la récompense ;
- A déterminer si la prise de décision sans incitation financière, plus exécutive, car sous le contrôle du préfrontal dorsolatéral d'après nos premières données d'IRMf, est différente dans les deux groupes.

III.2. Adapter l'interaction sur la base du comportement et de l'état physiologique

III.2.1. Drones

Le domaine des IHM fait partie des perspectives de travail de cette thèse. Une première étude vient de débiter et porte sur les stations de contrôle de drones terrestres³¹, développés à l'ISAE. Ces stations de contrôle soulèvent de nombreuses problématiques telles que la sélection de l'information à présenter parmi la grande quantité de données disponibles (Fig. 84). Des premiers travaux visent à introduire des mesures psychophysiologiques en vue d'adapter en temps réel le niveau d'implication de l'opérateur en fonction de son niveau de charge de travail. Cette variation du niveau d'implication passe notamment par l'ajustement en continu de l'autorité entre l'opérateur et le système, ce dernier pouvant se substituer à l'humain lorsque celui-ci n'est plus en mesure de gérer la flotte de drones. Ces points font actuellement l'objet de l'encadrement de trois stagiaires issus d'un master professionnel spécialisé dans les IHM.

³¹ Véhicule sans pilote humain à bord, destiné le plus souvent à des missions de surveillance et de renseignement.



Fig. 84 : À gauche, la version beta du logiciel de la station sol. À droite, le drone Emaxx.

Dans le domaine des IHM plus classiques, des collaborations avec l'ENAC, Ecole Nationale de l'Aviation Civile, située à Toulouse (en particulier le CENA, Centre d'étude de la navigation aérienne), sont dorénavant d'actualité et des résultats expérimentaux ont été publiés (Causse & Hurter, 2009). Les travaux concernent l'évaluation qualitative de l'introduction de nouvelles caractéristiques visuelles dans les interfaces homme machine utilisées par les contrôleurs aériens. Les outils d'investigation vont du recueil de données comportementales aux outils de mesures psychophysiques.

Enfin, des travaux sont en cours avec le LAAS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes). Ils visent à augmenter le confort d'utilisation des humains interagissant avec des robots (Fig. 85). En particulier, différents types de gestes sont évalués et classifiés selon différents paramètres tel que le vécu subjectif, les réactions émotionnelles etc. (Emrah Akin Sisbot, Rachid Alami, Mickaël Causse, & Dehais, 2010). Une fois encore, l'objectif à long terme est d'adapter le comportement du robot via l'enregistrement en continu de paramètres comportementaux et physiologiques de l'humain.



Fig. 85 : Analyses du SNA pendant l'interaction homme robot. Ici le robot tend une bouteille à l'humain selon différentes manières.

III.2.2. Contre-mesures

Les contre-mesures cognitives affichées directement dans l'IHM de l'avion font parti des outils disponibles pour « récupérer » un pilote présentant un état proche de celui de la persévération, focalisant excessivement, par exemple, sur certains instruments au détriment d'autres plus importants. Des contre-mesures actuellement explorées consistent à retirer l'information faisant l'objet de l'obnubilation du pilote puis d'afficher, par exemple, un message présentant les actions à entreprendre. Ainsi, c'est l'interface qui assure le « décrochage » (retrait ciblé d'informations) et l'accrochage attentionnel (envoi d'informations dans le champ visuel). Cependant, le principe du retrait d'informations est encore mal accepté par les pilotes de lignes qui craignent de perdre des informations cruciales.

Nous explorons actuellement une approche complémentaire qui consiste à suggérer le plus rapidement possible l'action à entreprendre, sans masquer pour autant une information déjà existante. Le principe fondateur consiste à exploiter les propriétés des neurones miroirs (Rizzolatti & Craighero, 2004), dont l'existence chez l'homme semble plausible. En cas d'urgence, les contre-mesures se matérialisent par l'affichage de l'action à entreprendre, sous forme d'une animation projetée au sein du cockpit, dans un écran prévu à cet effet (Fig. 86). Le principe est de suggérer efficacement l'action à entreprendre en affichant, par exemple, une main tirant sur le manche. De nombreuses collisions avec le terrain auraient pu être évitées simplement par une action

appropriée du pilote à cabrer. Il est envisageable que la perception d'une telle action pourrait suggérer très rapidement l'action à entreprendre. En effet, selon la théorie des neurones miroirs, la perception d'une action et son exécution implique des populations de neurones communes. L'effet de cette contre-mesure pourrait être efficace grâce à la « pré-activation » de ces neurones via la perception de l'action se déroulant sous les yeux du pilote. A notre connaissance, l'exploitation des propriétés des neurones miroirs n'a jamais fait l'objet d'aucune étude dans le domaine des IHM. Des tests ont déjà été effectués par un stagiaire de l'ISAE que nous avons encadré, et les premiers résultats semblent indiquer que ce principe est d'autant plus rapide à suggérer une action, que les stimuli sont simples et faciles à interpréter. C'est le cas notamment pour la présentation d'une action d'un avatar sur un manche qui amenait les pilotes à réagir beaucoup plus rapidement que lorsque la même alarme était présentée sous forme textuelle (Daaboul, 2009)



Fig. 86 : Dans cette figure, un avatar réalise un appui sur l'interface du pilote automatique pour inciter le pilote à réaliser cette action

Annexes 1

A l'issue des acquisitions, l'expérimentateur dispose d'images anatomiques en petit nombre, et d'images fonctionnelles en très grand nombre. Le protocole que nous avons élaboré fournissait ainsi une image du cerveau entier à une résolution élevée, une image anatomique réalisée à la même résolution que les acquisitions fonctionnelles, et une série de 470 images (235 par run) fonctionnelles. Le travail principal consiste à comparer les images fonctionnelles afin de faire apparaître les zones d'activation. Plusieurs étapes de prétraitement ont été nécessaires, elles sont décrites ci-dessous³².

Formater les images

Les fichiers générés par l'IRM que nous avons utilisée sont au format DICOM³³. En fonction des séquences utilisées, chaque fichier peut contenir les données correspondant à une coupe, ou à une série de coupes. De plus, ils contiennent tous en en-tête l'ensemble des informations caractérisant l'acquisition. Or, le logiciel que nous avons utilisé pour la suite du traitement, SPM5³⁴ requiert des images, au format Analyze (dit « compatible SPM »), formées par un fichier contenant les données ordonnées correspondant à l'ensemble des coupes d'un volume cérébral, accompagné par un fichier séparé correspondant à l'en-tête (ou header) du volume et précisant les paramètres de celui-ci (date, temps d'écho, temps de répétition³⁵ etc.). Transformer des fichiers consiste donc essentiellement à sélectionner les zones contenant les valeurs du signal de chaque voxel, à les concaténer en un fichier par volume lorsque les DICOM ne contiennent qu'une coupe, ou à ordonner les coupes correctement lorsqu'elles sont entrelacées dans les DICOM en mosaïque, puis à les renommer et à leur adjoindre un fichier header. Une étape supplémentaire est nécessaire afin d'opérer un basculement de chaque coupe suivant un plan de symétrie frontal passant au milieu de chaque image. En effet, pour une coupe transversale orientée suivant les conventions radiologiques, les images DICOM commencent par décrire les voxels de gauche à droite de l'image (de droite à gauche par rapport au participant) en commençant par les lignes les plus postérieures (coté occipital), puis en remontant vers le pôle frontal. Le format Analyze

³² Pour une description détaillée des prétraitements de données de neuroimagerie, on peut se référer au manuel « SPM99 : Guide pratique pour l'expérimentateur novice » (Anton Jean Luc, Dauchot Katia, Pelegrini-Issac Mélanie).

³³ Digital Imaging and Communications in Medicine, imagerie et communication numériques en médecine. Standard de communication et d'archivage en imagerie médicale.

³⁴ Statistical Parametric Mapping, développé au Functional Imaging Laboratory, Wellcome Institute de Londres.

³⁵ Très schématiquement, le choix du temps de répétition et du temps d'écho permet d'influencer le contraste de l'image (dit en pondération T1 ou T2).

commence en revanche par le coté de l'image correspondant au pôle frontal. Cette étape a été réalisée par SMP5, qui la prend désormais en charge.

Corriger le décalage d'acquisition entre les coupes fonctionnelles (« Slice timing »)

Lors d'une acquisition fonctionnelle, les différentes coupes d'un même volume ne sont pas acquises simultanément, mais successivement (en mode séquentiel ou entrelacé³⁶) pendant une durée égale au temps de répétition TR. Par exemple, avec un TR = 2.47 secondes³⁷ et une acquisition où les coupes sont acquises du bas vers le haut (ordre ascendant, ce qui était notre cas) du cerveau, la coupe la plus haute est systématiquement acquises 2.47 secondes après la coupe la plus basse. Evidemment l'impact de ce décalage est particulièrement important pour les acquisitions événementielles. Il faut le prendre en compte soit au niveau des prétraitements, soit au niveau des traitements statistiques ultérieurs. SMP5 propose de corriger ce décalage lors du prétraitement des images, ce que nous avons fait. La correction proposée par SMP5 consiste simplement à ramener, par interpolation temporelle, l'instant d'acquisition de toutes les coupes à un instant commun, qui est l'instant d'acquisition d'une des coupes du volume (que l'on qualifiera coupe de référence, typiquement, une coupe occupant une place centrale dans le volume). Lors des analyses statistiques, on considérera ensuite que les coupes du volume ont été acquises simultanément.

Correction du mouvement (« realign »)

L'objectif est de corriger les artefacts dus aux mouvements de la tête du participant, inévitables pendant une acquisition que peut durer plusieurs dizaines de minutes. Si ces mouvements ne sont pas corrigés il peut en résulter des faux positifs dans les cartes d'activation. Ces voxels apparaissent typiquement en périphérie du cerveau (on parle de couronne d'activation). Le principe du recalage consiste à choisir une image de référence au sein de la série temporelle acquise, et à corriger le déplacement des autres images de la série par rapport à cette image de référence. Le déplacement est supposé rigide, composé uniquement de rotation et de

³⁶ Le mode entrelacé permet de ménager un temps de relaxation supplémentaire des moments magnétiques entre deux coupes, ce qui limite les excitations parasites. Il divise également par deux le décalage temporel existant entre l'acquisition du sommet du volume et sa base en faisant l'acquisition par exemple des images impaires puis paires. Ce décalage temporel n'est pas anodin étant donné la nature dynamique du signal BOLD.

³⁷ Attention : il s'agit ici du TR de la machine, il correspond au temps mis par l'IRMf pour acquérir un volume entier, dans notre cas, il était constitué par 38 coupes acquises en 65ms chacune. À ne pas confondre avec le TR retrouvé dans les headers de SPM5 qui correspond au temps mis pour acquérir une seule coupe, donc 65ms dans notre expérimentation.

translation. Le traitement statistique est basé sur la méthode des moindres carré, SPM détermine une matrice de transformation rigide à six paramètres (3 translations, 3 rotations) permettant de rétablir la superposition la plus exacte possible de chaque image acquise sur l'image de référence.

Normalisation spatiale (« normalize »)

Bien que nos analyses ne portent actuellement que sur un seul participant, l'objectif est de superposer toutes les images anatomiques et fonctionnelles des participants dans un espace (ou template) commun. Nous avons utilisé le repère MNI (Montreal Neurological Institute), proche de celui de l'atlas de Talairach. Ceci permet par la suite de déterminer les coordonnées des zones activées dans un repère commun et donc de comparer des activations entre les différents participants en contournant le problème de la variabilité anatomo-fonctionnelle interindividuelle. Les déformations évaluées sont de deux types. Tout d'abord, la meilleure déformation affine est estimée. Elle comporte 12 paramètres, six caractérisant une transformation rigide et six autres concernant des variations d'échelles. Ensuite des déformations non affines sont évaluées afin de minimiser les variations anatomiques relatives entre les différentes zones du cerveau. Cette étape est incontournable pour toutes études de groupe (chose que nous avons initialement prévue).

Lissage spatial (smooth)

Le lissage spatial permet de contourner des problèmes de corrélations spatiales, notamment au moment de l'étape de seuillage des cartes d'activation. En effet, les données d'IRMf présentent des corrélations spatiales, le signal acquis dans un voxel n'est pas indépendant du signal acquis dans les voxels voisins. Les caractéristiques de ces corrélations spatiales sont difficiles à estimer. En pratique, on lisse donc les données avec un filtre passe-bas (*i.e.* qui coupe les hautes fréquences) de façon à ce que, sans les images lissées, les caractéristiques des corrélations spatiales soient connues et imposées par les propriétés du filtre. Sous SPM5, la méthode de seuillage que l'on applique par la suite aux cartes d'activation s'appuie sur la théorie des champs aléatoires gaussiens. Pour que les hypothèses sous-jacentes à cette théorie soient vérifiées, on lisse spatialement les données avec un filtre gaussien. Classiquement, la fréquence spatiale du filtre est de deux à trois fois la taille des voxels acquis. Cette étape permet à la fois de minimiser les défauts résiduels de réalignement et de normalisation et d'augmenter le rapport signal/bruit. En revanche la précision de la localisation des activations peut en être diminuée, notamment par extension.

Annexes 2

Synthèse des régressions linaires et des analyses discriminantes

Tableau 12 : Synthèse de la régression linéaire pas à pas ascendante, étape n°2, pour la variable dépendante écart au cap, mesure de la performance de pilotage. D%C = pourcentage de bonne réponses à la tâche déductive (voir légende complète partie 2 chapitre I).

Variables	Etapes	Degré de Liberté	F exclus.	P exclus.	F inclus.	P inclus.	Effet (état)
D%C	Etape n° 2	1	8,054423	0,010909			Oui
HVT		1			1,127009	0,303264	Non
"HV2ans"		1			0,025660	0,874622	Non
AnneePPL		1			1,072103	0,314976	Non
STAI		1			0,707472	0,411960	Non
Imotr		1			0,776500	0,390502	Non
ICog		1			0,173820	0,681956	Non
INonPlan		1			0,031391	0,861464	Non
vélocité		1			0,826655	0,375952	Non
MWT		1			0,436564	0,517640	Non
MWL		1			0,005180	0,943464	Non
MWA		1			0,064713	0,802248	Non
MWFAT		1			0,267627	0,611594	Non
CU		1			0,303582	0,588814	Non
CD		1			0,075497	0,786806	Non
OU		1			1,802605	0,197052	Non
OD		1			0,231250	0,636729	Non
BR-		1			0,981530	0,335714	Non
BR=		1			2,724590	0,117165	Non
BR+		1			1,952859	0,180252	Non
Age		1			0,374138	0,548851	Non
DRTC		1			0,137220	0,715635	Non
NB0%C		1			1,918885	0,183888	Non
"NB0RTC"		1			3,276750	0,087981	Non
NB1%C		1			1,126586	0,303352	Non
"NB1RTC"		1			3,129054	0,094845	Non
NB2%C		1			0,348580	0,562685	Non
NB2%RTC		1			3,488556	0,079132	Non
WTrials		1			0,377781	0,546932	Non
WTT		1			0,098963	0,756906	Non
Wregles		1			0,028875	0,867074	Non
WENP		1			0,000877	0,976724	Non
WEP		1			0,047436	0,830179	Non
WRTC		1			0,003042	0,956655	Non
SNMRT		1			1,125852	0,303504	Non
SMIRT		1			0,005945	0,939441	Non
SMCRT		1			0,580808	0,456440	Non
Interférence		1			0,278147	0,604734	Non

Tableau 13 : Synthèse de la régression linéaire exhaustive pour la variable dépendante écart au cap, mesure de la performance de pilotage. HVT = variable d'expérience totale ; D%C = pourcentage de bonne réponses à la tâche déductive ; NB2%C = pourcentage de réponses correctes au 2-back (voir légende complète partie 2 chapitre I).

Effet	EcartCap Param.	EcartCap Err-Type	EcartCap t	EcartCap p	-95,00% Lim.Conf	+95,00% Lim.Conf	EcartCap Béta (β)	EcartCap ErTyp.β	-95,00% Lim.Conf	+95,00% Lim.Conf
Ord.Orig.	-0,033412	0,157226	-0,21251	0,834569	-0,36853	0,301707				
Age	-0,360483	0,300487	-1,19966	0,248876	-1,00096	0,279989	-0,359971	0,300060	-0,99953	0,279591
HVT	-0,492885	0,201961	-2,44050	0,027550	-0,92335	-0,062416	-0,502223	0,205787	-0,94085	-0,063599
velocite	-0,144654	0,242902	-0,59552	0,560372	-0,66239	0,373079	-0,146748	0,246419	-0,67198	0,378481
D%C	-0,579210	0,190920	-3,03378	0,008376	-0,98615	-0,172273	-0,581238	0,191589	-0,98960	-0,172876
NB2%C	-0,670094	0,297235	-2,25442	0,039550	-1,30363	-0,036552	-0,684746	0,303734	-1,33214	-0,037352
WEP	-0,025192	0,193140	-0,13043	0,897957	-0,43686	0,386476	-0,025705	0,197073	-0,44576	0,394347
Interference Stroop	-0,029556	0,233275	-0,12670	0,900860	-0,52677	0,467658	-0,027328	0,215689	-0,48706	0,432402

Tableau 14 : Synthèse de l'analyse discriminante pas à pas ascendante, étape n°3, pour la variable dépendante de la décision d'atterrir. NB2%C = pourcentage de réponses correctes au 2-back ; HVT = variable d'expérience totale (voir légende complète partie 2 chapitre I).

Variables	Etapes	Degré de Liberté	F exclus.	P exclus.	F inclus.	P inclus.	Effet (état)
NB2%C	Etape n° 3	1	17,40804	0,000639			Oui
HVT		1	7,86303	0,012199			Oui
"HV2ans"		1			0,028534556	0,867975274	Non
AnneePPL		1			0,127313897	0,725895681	Non
STAI		1			0,108076355	0,746608513	Non
Imotr		1			3,610244163	0,075600174	Non
ICog		1			0,49032135	0,493840998	Non
INonPlan		1			0,243072707	0,628693467	Non
vélocité		1			0,045009457	0,834665726	Non
MWT		1			0,596932639	0,45101383	Non
MWL		1			0,234674414	0,634643923	Non
MWA		1			0,941980298	0,346213515	Non
MWFAT		1			0,86754278	0,365478664	Non
CU		1			0,03897127	0,84599168	Non
CD		1			1,046940717	0,321435021	Non
OU		1			0,317369521	0,581002793	Non
OD		1			0,503269132	0,488277192	Non
BR-		1			1,763499602	0,202822898	Non
BR=		1			2,295090554	0,149288316	Non
BR+		1			1,780499935	0,200768807	Non
D%C		1			0,059849002	0,809844512	Non
DRTC		1			0,551092496	0,468630766	Non
NB0%C		1			1,044593211	0,321961398	Non
"NB0RTC"		1			0,135375488	0,717744522	Non
NB1%C		1			1,959969806	0,180608112	Non
"NB1RTC"		1			1,328794615	0,26595161	Non
Age		1			0,461970399	0,506419863	Non
NB2%RTC		1			2,794822986	0,114008346	Non
WTrials		1			1,853935856	0,192192763	Non
WTT		1			0,570958374	0,460858472	Non
Wregles		1			1,991450768	0,177338355	Non
WENP		1			2,534993412	0,130908774	Non
WEP		1			0,222056048	0,643838886	Non
WRTC		1			0,290811521	0,597125978	Non
SNMRT		1			0,330478219	0,573373119	Non
Interférence		1			1,258500065	0,278489496	Non

Tableau 15 : Synthèse de l'analyse discriminante exhaustive pour la variable dépendante décision d'atterrir ; HVT = variable d'expérience totale ; Imotr = impulsivité motrice ; NB2%C = pourcentage de réponses correctes au 2-back (voir légende complète partie 2 chapitre I).

Effet	1 Param.	1 Err-Type	1 t	1 p	-95,00% Lim.Conf	+95,00% Lim.Conf	1 Bêta (β)	1 ErrTyp β	-95,00% Lim.Conf	+95,00% Lim.Conf
Ord.Orig.	0,586734	0,082442	7,11695	0,000032	0,403042	0,770426				
Age	0,032987	0,151458	0,21780	0,831966	-0,304481	0,370456	0,066379	0,304772	-0,61270	0,745454
HVT	0,435677	0,113326	3,84446	0,003241	0,183171	0,688184	0,937974	0,243981	0,39435	1,481596
Imotr	-0,284146	0,118665	-2,39453	0,037666	-0,548547	-0,019745	-0,565325	0,236090	-1,09137	-0,039284
ICog	0,025756	0,102204	0,25201	0,806140	-0,201968	0,253480	0,051243	0,203340	-0,40183	0,504312
INonPlan	-0,236560	0,110562	-2,13962	0,058072	-0,482907	0,009786	-0,470650	0,219969	-0,96077	0,019471
D%C	-0,038309	0,107422	-0,35662	0,728784	-0,277660	0,201042	-0,068197	0,191230	-0,49428	0,357890
NB2%C	0,745110	0,161528	4,61287	0,000961	0,385202	1,105018	1,567042	0,339711	0,81012	2,323965
WEP	-0,157752	0,109413	-1,44180	0,179934	-0,401539	0,086036	-0,331289	0,229775	-0,84326	0,180681
Interference Stroop	0,130341	0,129912	1,00330	0,339376	-0,159122	0,419803	0,255450	0,254610	-0,31186	0,822756

Références

- Airaksinen, E., Larsson, M., & Forsell, Y. (2005). Neuropsychological functions in anxiety disorders in population-based samples: evidence of episodic memory dysfunction. *Journal of psychiatric research*, 39(2), 207-214.
- Alexander, G. E., Crutcher, M. D., & DeLong, M. R. (1990). Basal ganglia-thalamocortical circuits: parallel substrates for motor, oculomotor, " prefrontal" and " limbic" functions. *Progress in brain research*, 85, 119.
- Allain, P., Chaudet, H., Nicoleau, S., Etcharry-Bouyx, F., Barré, J., Dubas, F., et al. (2007). Étude de la planification de l'action au moyen du test du plan du zoo dans la maladie d'Alzheimer. *Revue neurologique(Paris)*, 163(2), 222-230.
- Allain, P., Kauffmann, M., Dubas, F., Berrut, G., & Le Gall, D. (2007). Fonctionnement exécutif et vieillissement normal: étude de la résolution de problèmes numériques. *Psychologie & NeuroPsychiatrie du vieillissement*, 5(4), 315-325.
- Allain, P., Nicoleau, S., Pinon, K., Etcharry-Bouyx, F., Barre, J., Berrut, G., et al. (2005). Executive Functioning in Normal Aging: A Study of Action Planning Using the Zoo Map Test. *Brain and Cognition*, 57(1), 4.
- Anderson, M. C., & Spellman, B. A. (1995). On the status of inhibitory mechanisms in cognition: memory retrieval as a model case. *Psychological Review*, 102(1), 68.
- Andrade, J. (2001). *Working Memory in Context*. Psychology, Hove, Sussex.
- Andreassi, J. L. (2000). Pupillary response and behavior. *Psychophysiology: Human Behavior and Physiological Response*. fourth ed. Lawrence Erlbaum Association, Mahwah, NJ, 218–233.
- Andrés, P. (2003). Frontal cortex as the central executive of working memory: time to revise our view. *Cortex*, 39(4-5), 871-895.
- Andres, P., & Van Der Linden, M. (2004). Les capacités d'inhibition: une fonction «frontale»? *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 54(2), 137-142.
- Appolonio, I., Rueckert, L., Partiot, A., Litvan, I., Sorenson, J., Le Bihan, D., et al. (1994). Functional magnetic resonance imaging (F-MRI) of calculation ability in normal volunteers. *Neurology*, 44(Suppl 2), 262.
- Arbuthnott, K. D. (1995). Inhibitory mechanisms in cognition: Phenomena and models. *Cahiers de psychologie cognitive*, 14(1), 3-45.
- Ashby, F., Velentin, V., & Turken, A. (2002). The effects of positive affect and arousal on working memory and executive attention. *Emotional Cognition: From Brain to Behaviour*, 245–287.
- Ashendorf, L., & McCaffrey, R. (2008). Exploring age-related decline on the Wisconsin Card Sorting Test. *The Clinical Neuropsychologist*, 22(2), 262.
- Ashendorf, L., & McCaffrey, R. J. (2008). Exploring Age-Related Decline on the Wisconsin Card Sorting Test. *The Clinical Neuropsychologist*, 22(2), 262-272.
- Ayaz, H., Shewokis, P., Bunce, S., Schultheis, M., & Onaral, B. (2009). Assessment of Cognitive Neural Correlates for a Functional Near Infrared-Based Brain Computer Interface System.
- Backs, R. W., & Walrath, L. C. (1992). Eye movement and pupillary response indices of mental workload during visual search of symbolic displays. *Appl Ergon*, 23(4), 243-254.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in cognitive sciences*, 4(11), 417-423.
- Baddeley, A. (2003). *Working memory: looking back and looking forward*.
- Baddeley, A., Della Sala, S., Papagno, C., & Spinnler, H. (1997). Dual-task performance in dysexecutive and nondysexecutive patients with a frontal lesion. *Neuropsychology*, 11(2), 187.
- Baddeley, A., Della Sala, S., Robbins, T. W., & Baddeley, A. (1996). Working Memory and Executive Control [and Discussion]. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 1397-1404.

- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory (Vol. 8). New York: G. A. Bower (ed), Recent advances in learning and motivation.
- Baena, E., Allen, P. A., Kaut, K. P., & Hall, R. J. (2010). On age differences in prefrontal function: the importance of emotional/cognitive integration. *Neuropsychologia*, 48(1), 319-333.
- Baker, S. P., Qiang, Y., Rebok, G. W., & Li, G. (2008). Pilot error in air carrier mishaps: longitudinal trends among 558 reports, 1983-2002. *Aviat Space Environ Med*, 79(1), 2-6.
- Banbury, S., & Tremblay, S. (2004). A cognitive approach to situation awareness: theory and application: Ashgate Pub Ltd.
- Banich, M., Elledge, V., & Stokes, A. (1989). Neuropsychological screening of aviators- A review. *Aviation, space, and environmental medicine*, 60, 361-366.
- Barkley, R. A. (1997). Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: Constructing a unifying theory of ADHD. *Psychological Bulletin*, 121, 65-94.
- Baron, R. (2009). Landing in Extreme Weather: When Getting it on the Ground can Prove Fatal: The Aviation Consulting Group.
- Bayle, F., Bourdel, M., Caci, H., Gorwood, P., Chignon, J., Ades, J., et al. (2000). Factor analysis of french translation of the Barratt impulsivity scale (BIS-10). *Canadian journal of psychiatry. Revue canadienne de psychiatrie*, 45(2), 156.
- Bazargan, M., & Guzhva, V. (2007). Factors contributing to fatalities in General Aviation accidents. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 1(2), 170-182.
- Bazargan, M., & Ross, D. (2004). A Comparative Risk Measure for General Aviation. MCDM, Whistler, BC Canada Aug, 6-11.
- BEA. (2000). Objectif : destination. Technical report, Bureau Enquête Analyse.
- BEA. (2009). La contribution du BEA à la Revue de Sécurité en Aviation Générale
- Beauvois, J., & Joule, R. (1999). A radical point of view on dissonance theory. *Cognitive dissonance: Progress on a pivotal theory in social psychology*, 43-70.
- Bechara, A., Damasio, H., & Damasio, A. (2000). Emotion, decision making and the orbitofrontal cortex. *Cerebral Cortex*, 10(3), 295-307.
- Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. (1997). Deciding advantageously before knowing the advantageous strategy. *Science*, 275(5304), 1293.
- Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. (2005). The Iowa Gambling Task and the somatic marker hypothesis: some questions and answers. *Trends in cognitive sciences*, 9(4), 159-162.
- Belleville, S., Rouleau, N., & Caza, N. (1998). Effect of normal aging on the manipulation of information in working memory. *Memory & cognition*, 26(3), 572.
- Bensi, L., & Giusberti, F. (2007). Trait anxiety and reasoning under uncertainty. *Personality and Individual Differences*, 43(4), 827-838.
- Berg, E. (1946). An objective technique for the measurement of flexibility in thinking: University of Wisconsin.
- Berg, E. A. (1948). A simple objective technique for measuring flexibility in thinking. *The Journal of general psychology*, 39, 15.
- Besson, M., & Faïta, F. (1995). An event-related potential (ERP) study of musical expectancy: Comparison of musicians with nonmusicians. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance*, 21(6), 1278-1296.
- Bestgen, Y., & Van der Linden, M. (2001). Effet du vieillissement sur l'interférence et l'amorçage négatif dans la tâche de Stroop. *Archives de psychologie(Genève)*, 69(270-1), 145-157.
- Birren, J. E., & Botwinick, J. (1955). Speed of response as a function of perceptual difficulty and age. *Journal of Gerontology*, 10(4), 433.
- Blair, K., Smith, B., Mitchell, D., Morton, J., Vythilingam, M., Pessoa, L., et al. (2007). Modulation of emotion by cognition and cognition by emotion. *Neuroimage*, 35(1), 430-440.
- Blatz, W. (1925). The cardiac, respiratory, and electrical phenomena involved in the emotion of fear. *Journal of Experimental Psychology*, 8(2), 109-132.

- Bohlin, G. (1976). Delayed habituation of the electrodermal orienting response as a function of increased level of arousal. *Psychophysiology*, 13(4), 345-351.
- Bongard, S. (1995). Mental effort during active and passive coping: A dual-task analysis. *Psychophysiology*, 32(3), 242-248.
- Bongard, S., & Hodapp, V. (1997). Active coping, work-pace, and cardiovascular responses: Evidence from laboratory studies. *Journal of Psychophysiology*, 11(3), 227-237.
- Booze Jr, C. F. (1977). Epidemiologic investigation of occupation, age, and exposure in general aviation accidents. *Aviation, space, and environmental medicine*, 48(11), 1081.
- Boucsein, W., & Backs, R. (2000). Engineering psychophysiology as a discipline: Historical and theoretical aspects. *Engineering psychophysiology. Issues and applications*, 3-30.
- Boutcher, Y. N., & Boutcher, S. H. (2006). Cardiovascular response to Stroop: Effect of verbal response and task difficulty. *Biological psychology*, 73(3), 235-241.
- Bradley, M., Cuthbert, B., & Lang, P. (1996). Picture media and emotion: Effects of a sustained affective context. *Psychophysiology*, 33(6), 662-670.
- Bradley, M. M., Miccoli, L., Escrig, M. A., & Lang, P. J. (2008). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology*, 45(4), 602-607.
- Braine, M. D. S. (1990). The "natural logic" approach to reasoning. *Reasoning, necessity, and logic: Developmental perspectives*, 133-157.
- Braune, R., & Wickens, C. (1984). Individual Differences and Age-Related Performance Assessment in Aviators. Part 1: Battery Development and Assessment: Report No. EPL-83-4/NAMRL-83-1, Champaign, IL: University of Illinois, Engineering Psychology Laboratory and Aviation Research Laboratory.
- Brewer, J., Zhao, Z., Desmond, J., Glover, G., & Gabrieli, J. (1998). Making memories: brain activity that predicts how well visual experience will be remembered. *Science*, 281(5380), 1185.
- Brosschot, J., & Thayer, J. (2003). Heart rate response is longer after negative emotions than after positive emotions. *International Journal of Psychophysiology*, 50(3), 181-188.
- Brosschot, J. F., & Thayer, J. F. (2003). Heart rate response is longer after negative emotions than after positive emotions. *International Journal of Psychophysiology*, 50(3), 181-187.
- Brouwer, A., Hogervorst, M., Herman, P., & Kooi, F. (2009). Are You Really Looking? Finding the Answer through Fixation Patterns and EEG.
- Brown, N., & Moren, C. (2003). Background emotional dynamics of crew resource management: Shame emotions and coping responses. *The International Journal of Aviation Psychology*, 13(3), 269-286.
- Brown, R. G., & Marsden, C. D. (1990). Cognitive function in Parkinson's disease: from description to theory. *Trends in Neurosciences*, 13(1), 21.
- Brown, S. W. (1997). Attentional resources in timing: Interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks. *Perception & Psychophysics*, 59(7), 1118-1140.
- Bruchon-Schweitzer, M., & Paulhan, I. (1993). Adaptation française et validation du STAI, Forme Y de Spielberger. *Rev. Int. Psychol. Appl.*
- Bruyer, R., Van der Linden, M., Rectem, D., & Galvez, C. (1995). Effects of age and education on the Stroop interference. *Archives de psychologie(Genève)*, 63(247), 257-267.
- BST. (2005). Sortie en bout de piste et incendie de l'Airbus A340-313 F-GLZQ exploité par Air France à l'aéroport international de Toronto/Lester B. Pearson (Ontario) le 2 août 2005.
- Buck, R. (1993). What is this thing called subjective experience? Reflections on the neuropsychology of qualia. *Neuropsychology New York*, 7, 490-490.
- Buckner, R. L. (2004). Memory and Executive Function in Aging and AD Multiple Factors that Cause Decline and Reserve Factors that Compensate. *Neuron*, 44(1), 195-208.
- Bugg, J., De Losh, E., Davalos, D., & Davis, H. (2007). Age differences in Stroop interference: contributions of general slowing and task-specific deficits. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 14(2), 155-167.
- Burgess, P. W., & Shallice, T. (1997). *The Hayling and Brixton Tests*: Thames Valley Test Company Bury St. Edmonds, England.

- Burian, B., Orasanu, J., & Hitt, J. (2000). Weather-related decision errors: Differences across flight types.
- Bush, G., Luu, P., & Posner, M. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in cognitive sciences*, 4(6), 215-222.
- Byrnes, R., & Black, R. (1993). Developing and implementing CRM programs: The Delta experience. *Cockpit resource management*, 421-443.
- Cabeza, R. (2001). Functional neuroimaging of cognitive aging. *Handbook of functional neuroimaging of cognition*, 331-377.
- Cabeza, R. (2002a). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: the HAROLD model. *Psychology and Aging*, 17(1), 85-100.
- Cabeza, R., Anderson, N. D., Locantore, J. K., & McIntosh, A. R. (2002b). Aging gracefully: compensatory brain activity in high-performing older adults. *Neuroimage*, 17(3), 1394-1402.
- Cabon, P., Bourgeois-Bougrine, S., Mollard, R., Coblenz, A., & Speyer, J. (2003). Electronic pilot-activity monitor: a countermeasure against fatigue on long-haul flights. *Aviation, space, and environmental medicine*, 74(6), 679-682.
- Calhoun, V., Carvalho, K., Astur, R., & Pearlson, G. (2005). Using virtual reality to study alcohol intoxication effects on the neural correlates of simulated driving. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 30(3), 285-306.
- Calhoun, V., Pekar, J., McGinty, V., Adali, T., Watson, T., & Pearlson, G. (2002). Different activation dynamics in multiple neural systems during simulated driving. *Human Brain Mapping*, 16(3), 158-167.
- Calhoun, V., Pekar, J., & Pearlson, G. (2004). Alcohol intoxication effects on simulated driving: exploring alcohol-dose effects on brain activation using functional MRI. *Neuropsychopharmacology: official publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 29(11), 2097.
- Callantine, T. J. (2001). The crew activity tracking system: leveraging flight data for raiding, training and analysis.
- Campbell, J., & O'Connor, P. (2009). Coping with stress in military aviation. *Human Performance Enhancement in High-Risk Environments: Insights, Developments, and Future Directions from Military Research*, 169.
- Cannon, W. (1927). The James-Lange theory of emotions: A critical examination and an alternative theory. *The American Journal of Psychology*, 106-124.
- Cao, Y., Vikingstad, E., George, K., Johnson, A., & Welch, K. (1999). Cortical language activation in stroke patients recovering from aphasia with functional MRI (Vol. 30, pp. 2331-2340): *Am Heart Assoc*.
- Capobianco, G., & Lee, M. (2001). *The Role of Weather in General Aviation Accidents: An Analysis of Causes, Contributing Factors and Issues*.
- Carpenter, P., Just, M., & Reichle, E. (2000). Working memory and executive function: Evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology*, 10(2), 195-199.
- Carpenter, P. A., Just, M. A., & Reichle, E. D. (2000). Working memory and executive function: Evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology*, 10(2), 195-199.
- Castaneda, A., Tuulio-Henriksson, A., Marttunen, M., Suvisaari, J., & Lönnqvist, J. (2008). A review on cognitive impairments in depressive and anxiety disorders with a focus on young adults. *Journal of Affective Disorders*, 106(1-2), 1-27.
- Cattell, R. (1963). Theory of fluid and crystallized intelligence: A critical experiment. *Journal of educational psychology*, 54(1), 1-22.
- Causse, M., Dehais, F., Peran, P., Demonet, J., Sabatini, U., & Pastor, J. (2009). Monetary incentive provokes hazardous landing decision making by enhancing the activity of "emotional" neural pathways. *Neuroimage*, 47, 117-117.
- Causse, M., & Hurter, C. (2009). The Physiological User's Response as a Clue to Assess Visual Variables Effectiveness.

- Causse, M., Pavard, B., Sénard, J., Démonet, J., & Pastor, J. (2007). Emotion Induction through Virtual Avatars and its Impact on Reasoning: Evidence from Autonomous Nervous System Measurements and Cognitive Assessment (Vol. 6, pp. 18-20).
- Causse, M., Sénard, J., Démonet, J., & Pastor, J. (2009). Monitoring Cognitive and Emotional Processes Through Pupil and Cardiac Response During Dynamic Versus Logical Task. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 10.1007/s10484-009-9115-0, 1-9.
- Chao, L. L., & Knight, R. T. (1997). Prefrontal deficits in attention and inhibitory control with aging. *Cerebral Cortex*, 7(1), 63-69.
- Charlot, V. (2003). Vieillesse cognitive et processus d'inhibition : leurs effets en mémoire verbale. Université de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- Charlot, V., & Feyereise, P. (2005). Mémoire épisodique et déficit d'inhibition au cours du vieillissement cognitif: un examen de l'hypothèse frontale. *L'année psychologique*, 105(2), 323-357.
- Charlton, R., Barrick, T., Lawes, I., Markus, H., & Morris, R. (2009). White matter pathways associated with working memory in normal aging. *Cortex*.
- Chayer, C., & Freedman, M. (2001). Frontal lobe functions. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 1(6), 547-552.
- Chen, Y., Mitra, S., & Schlaghecken, F. (2008). Sub-processes of working memory in the N-back task: an investigation using ERPs. *Clinical Neurophysiology*, 119(7), 1546-1559.
- Chen, Y. N., Mitra, S., & Schlaghecken, F. (2008). Sub-processes of working memory in the N-back task: An investigation using ERPs. *Clinical Neurophysiology*, 119(7), 1546-1559.
- Cherubini, A., Péran, P., Caltagirone, C., Sabatini, U., & Spalletta, G. (2009). Aging of subcortical nuclei: Microstructural, mineralization and atrophy modifications measured in vivo using MRI. *Neuroimage*, 48(1), 29-36.
- Christie, M. (1981). Electrodermal activity in the 1980s: a review. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 74(8), 616.
- Codispoti, M., Bradley, M., & Lang, P. (2001). Affective reactions to briefly presented pictures. *Psychophysiology*, 38(03), 474-478.
- Cohen, J., Perlstein, W., Braver, T., Nystrom, L., Noll, D., Jonides, J., et al. (1997). Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, 386(6625), 604-608.
- Collette, F., Germain, S., Hogge, M., & Van der Linden, M. (2009). Inhibitory control of memory in normal ageing: Dissociation between impaired intentional and preserved unintentional processes. *Memory*, 17(1), 104-122.
- Collette, F., Olivier, L., Van der Linden, M., Laureys, S., Delfiore, G., Luxen, A., et al. (2005). Involvement of both prefrontal and inferior parietal cortex in dual-task performance. *Cognitive Brain Research*, 24(2), 237-251.
- Connelly, S. L., & Hasher, L. (1993). Aging and the inhibition of spatial location. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 19(6), 1238-1250.
- Conway, A. R. A., Jarrold, C., Kane, M. J., & Towse, J. N. (2007). *Variation in working memory*: Oxford University Press, USA.
- Coricelli, G., Critchley, H., Joffily, M., O'Doherty, J., Sirigu, A., & Dolan, R. (2005). Regret and its avoidance: a neuroimaging study of choice behavior. *Nature neuroscience*, 8(9), 1255-1262.
- Cowan, N. (1993). Activation, attention, and short-term memory. *Memory & cognition*, 21(2), 162.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(01), 87-114.
- Critchley, H., Mathias, C., & Dolan, R. (2001). Neural activity in the human brain relating to uncertainty and arousal during anticipation. *Neuron*, 29(2), 537-545.
- Critchley, H. D. (2002). Electrodermal responses: what happens in the brain. *Neuroscientist*, 8(2), 132-142.
- Daaboul, A. (2009). Mise au point de contre-mesures IHM, rapport PIR: ISAE.
- Damasio, A. (1995). *L'erreur de Descartes* Paris. Éditions Odile Jacob.
- Damasio, A. (2001). Les émotions, source de la conscience. *Sciences Humaines*, 119, 44-47.

- Damasio, A. (2005). Spinoza avait raison. Joie et tristesse, le cerveau des émotions. *Natures Sciences Sociétés*, 13, 335-349.
- Damasio, A., & Larssonneur, C. (1999). Le sentiment même de soi: corps, émotions, conscience.
- Damasio, H., Grabowski, T., Frank, R., Galaburda, A., & Damasio, A. (1994). The return of Phineas Gage: clues about the brain from the skull of a famous patient. *Science*, 264(5162), 1102.
- Dawson, M., Schell, A., & Filion, D. (2000). The electrodermal system. *Handbook of psychophysiology*, 2, 200-223.
- De Luca, C. R., Wood, S. J., Anderson, V., Buchanan, J. A., Proffitt, T. M., Mahony, K., et al. (2003). Normative data from the Cantab. I: Development of executive function over the lifespan. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 25(2), 242-254.
- De Neys, W., & Van Gelder, E. (2009). Logic and belief across the lifespan: the rise and fall of belief inhibition during syllogistic reasoning. *Developmental Science*, 12(1), 123-130.
- De Waard, D. (1996). The measurement of drivers' mental workload. Traffic Research Centre, University of Groningen.
- Decker, S. L., Hill, S. K., & Dean, R. S. (2007). Evidence of construct similarity in executive functions and fluid reasoning abilities. *International Journal of Neuroscience*, 117(6), 735-748.
- Dehais, F. (2004). Modélisation des conflits dans l'activité de pilotage. Mémoire de thèse soutenu le, 24.
- Dehais, F., Causse, M., & Pastor, J. (2008). Embedded eye tracker in a real aircraft: new perspectives on pilot/aircraft interaction monitoring.
- Dehais, F., Lesire, C., Goudou, A., & Tessier, C. (2005). Toward an anticipating agent to help pilots. Paper presented at the AAAI Fall Symposium, From reactive to anticipatory cognitive embodied systems, Arlington, VA, USA, 2005.
- Dehais, F., Tessier, C., & Chaudron, L. (2003). GHOST: experimenting conflicts countermeasures in the pilot's activity. Paper presented at the IJCAI, Acapulco, Mexique.
- Dehais, F., Tessier, C., Christophe, L., & Reuzeau, F. (2009). The perseveration syndrome in the pilot's activity: guidelines and cognitive countermeasures.
- Dehais, F., Tessier, C., Christophe, L., & Reuzeau, F. (2009). The perseveration syndrome in the pilot's activity: guidelines and cognitive countermeasures. Paper presented at the Working Conference on Human Error, Safety and Systems Development - HESSD 2009, 23-25 Sept 2009, Bruxelles, Belgium.
- Dekker, S. (2002). Reconstructing human contributions to accidents: the new view on error and performance. *Journal of Safety Research*, 33(3), 371-385.
- Dekker, S. (2005). Ten questions about human error: A new view of human factors and system safety: CRC.
- Delahaij, R., Gaillard, A., & Soeters, J. (2006). Stress Training and the New Military Environment.
- Demakis, G. J. (2003). A meta-analytic review of the sensitivity of the Wisconsin Card Sorting Test to frontal and lateralized frontal brain damage. *NEUROPSYCHOLOGY-NEW YORK-*, 17(2), 255-264.
- DeSoto, M., Fabiani, M., Geary, D., & Gratton, G. (2001). When in doubt, do it both ways: Brain evidence of the simultaneous activation of conflicting motor responses in a spatial Stroop task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(4), 523-536.
- Dixon, K., Hagemann, K., Basilico, J., Forsythe, C., Rothe, S., Schrauf, M., et al. (2009). Improved Team Performance Using EEG-and Context-Based Cognitive-State Classifications for a Vehicle Crew.
- Dreher, J., Kohn, P., & Berman, K. (2006). Neural coding of distinct statistical properties of reward information in humans. *Cerebral Cortex*, 16(4), 561.
- Dreher, J. C., & Grafman, J. (2003). Dissociating the roles of the rostral anterior cingulate and the lateral prefrontal cortices in performing two tasks simultaneously or successively. *Cerebral Cortex*, 13(4), 329-339.

- Drevets, W., & Raichle, M. (1998). Reciprocal suppression of regional blood flow during emotional versus higher cognitive processes: Implications for interactions between emotion and cognition. *Cognition and Emotion*, 12(3), 353-385.
- Dussault, C., Jouanin, J., & Guezennec, C. (2004). EEG and ECG changes during selected flight sequences. *Aviation, space, and environmental medicine*, 75(10), 889-897.
- Dussault, C., Jouanin, J., Philippe, M., & Guezennec, C. (2005). EEG and ECG changes during simulator operation reflect mental workload and vigilance. *Aviation, space, and environmental medicine*, 76(4), 344-351.
- Dussault, C., Jouanin, J. C., Philippe, M., & Guezennec, C. Y. (2005). EEG and ECG changes during simulator operation reflect mental workload and vigilance. *Aviation, space, and environmental medicine*, 76(4), 344-351.
- Dux, P., Ivanoff, J., Asplund, C., & Marois, R. (2006). Isolation of a central bottleneck of information processing with time-resolved fMRI. *Neuron*, 52(6), 1109-1120.
- Egloff, B., & Hock, M. (2001). Interactive effects of state anxiety and trait anxiety on emotional Stroop interference. *Personality and Individual Differences*, 31(6), 875-882.
- Eling, P., Derckx, K., & Maes, R. (2008). On the historical and conceptual background of the Wisconsin Card Sorting Test. *Brain and Cognition*.
- Elliott, R. (2003). Executive functions and their disorders Imaging in clinical neuroscience. *British Medical Bulletin*, 65(1), 49-59.
- Emrah Akin Sisbot, Rachid Alami, Mickaël Causse, & Dehais, F. (2010). Physiological Evaluation of a Human-Robot Object Hand Over Task. *Robotica* (en cours de soumission).
- Etienne, V., Marin-Lamellet, C., & Laurent, B. (2008). Executive functioning in normal aging. *Revue neurologique*, 164(12), 1010.
- ETSC. (2003). Transport Safety Performance in the EU - a statistical overview. European Transport Safety Council.
- Evans, J. (1972). Interpretation and matching bias in a reasoning task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 24(2), 193-199.
- Fairclough, S., Venables, L., & Tattersall, A. (2005). The influence of task demand and learning on the psychophysiological response. *International Journal of Psychophysiology*, 56(2), 171-184.
- Faw, B. (2003). Pre-frontal executive committee for perception, working memory, attention, long-term memory, motor control, and thinking: a tutorial review. *Consciousness and Cognition*, 12(1), 83-139.
- Fernandez-Duque, D., Baird, J., & Posner, M. (2000). Executive attention and metacognitive regulation. *Consciousness and Cognition*, 9(2), 288-307.
- Festinger, L. (1957). *A theory of cognitive dissonance*: CA: Stanford University Press.
- Finkel, D., Reynolds, C. A., McArdle, J. J., & Pedersen, N. L. (2005). The longitudinal relationship between processing speed and cognitive ability: Genetic and environmental influences. *Behavior genetics*, 35(5), 535-549.
- Finkel, D., Reynolds, C. A., McArdle, J. J., & Pedersen, N. L. (2007). Age changes in processing speed as a leading indicator of cognitive aging. *Psychology and Aging*, 22(3), 558.
- Fisk, J., & Sharp, C. (2004). Age-related impairment in executive functioning: Updating, inhibition, shifting, and access. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 26(7), 874-890.
- Fitts, P. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- Fornette, M.-P., Lefrançois, C., Fradin, J., Massioui, F., Tijus, C., Delor, C., et al. (2007). Etudes des relations entre cognition et émotion et leurs impacts sur la performance de pilotes militaires. : Rapport de recherche IMASSA n° 07-07.
- Fox, E. (1995). Negative priming from ignored distractors in visual selection: A review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2(2), 145-173.
- Fradin, J., & Aalberse, M. (2008). *L'intelligence du stress*: Eyrolles.
- 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.

- Fristoe, N. M., Salthouse, T. A., & Woodard, J. L. (1997). Examination of age-related deficits on the Wisconsin Card Sorting Test. *Neuropsychology*, 11(3), 428.
- Froom, P., Caine, Y., Shochat, I., & Ribak, J. (1993). Heat stress and helicopter pilot errors. *JOM*, 35(7), 721.
- Fu, S., & Parasuraman, R. (2006). 3. Event-Related Potentials (ERPs) in Neuroergonomics. *Neuroergonomics*, 1(9), 32-51.
- Funahashi, S. (2001). Neuronal mechanisms of executive control by the prefrontal cortex. *Neuroscience research*, 39(2), 147-165.
- Fuster, J. (2000). Executive frontal functions. *Experimental Brain Research*, 133(1), 66-70.
- Fuster, J. M. (2001). The prefrontal cortex—An update time is of the essence. *Neuron*, 30(2), 319-333.
- Gabrieli, J., Brewer, J., Desmond, J., & Glover, G. (1997). Separate neural bases of two fundamental memory processes in the human medial temporal lobe. *Science*, 276(5310), 264.
- Gaillard, A. (2001). Stress, workload, and fatigue as three biobehavioral states: A general overview. *Stress, workload, and fatigue*. Mahwah, NJ: L. Erlbaum.
- Gainotti, G. (1987). L'héminégligence. *La recherche*, 18(187), 476-482.
- Gauthier, J., & Bouchard, S. (1993). Adaptation canadienne-française de la forme révisée du State-Trait Anxiety Inventory de Spielberger.
- Gendolla, G. (1998). Effort as assessed by motivational arousal in identity-relevant tasks. *Basic and Applied Social Psychology*, 20(2), 111-121.
- Gendolla, G., & Krüsken, J. (2001). The joint impact of mood state and task difficulty on cardiovascular and electrodermal reactivity in active coping. *Psychophysiology*, 38(03), 548-556.
- Gerathewohl, S. (1977). Psychophysiological Effects of Aging: Developing a Functional Age Index for Pilots: I. A Survey of the Pertinent Literature: Storming Media.
- Gerathewohl, S. (1978). Psychophysiological Effects of Aging-Developing a Functional Age Index for Pilots. II Taxonomy of Psychological Factors: Storming Media.
- Gerathewohl, S. (1978). Psychophysiological effects of aging-Developing a functional age index for pilots: III. Measurement of pilot performance: Storming Media.
- Geser, F., Wenning, G. K., Poewe, W., & McKeith, I. (2005). How to diagnose dementia with Lewy bodies: state of the art. *Movement Disorders*, 20(suppl 12), S11-S20.
- Gilinsky, A. S., & Judd, B. B. (1994). Working memory and bias in reasoning across the life span. *Psychology and Aging*, 9, 356-356.
- Gill, T. M., Sarter, M., & Givens, B. (2000). Sustained visual attention performance-associated prefrontal neuronal activity: evidence for cholinergic modulation. *Journal of Neuroscience*, 20(12), 4745.
- Goel, V., & Dolan, R. (2003). Explaining modulation of reasoning by belief. *Cognition*, 87(1), 11-22.
- Goel, V., & Dolan, R. (2003). Reciprocal neural response within lateral and ventral medial prefrontal cortex during hot and cold reasoning. *Neuroimage*, 20(4), 2314-2321.
- Goh, J., & Wiegmann, D. (2001). Visual flight rules flight into instrument meteorological conditions: An empirical investigation of the possible causes. *The International Journal of Aviation Psychology*, 11(4), 359-379.
- Goh, J., & Wiegmann, D. (2002). Human factors analysis of accidents involving visual flight rules flight into adverse weather. *Aviation, space, and environmental medicine*, 73(8), 817.
- Goverover, Y. (2004). Categorization, deductive reasoning, and self-awareness: Association with everyday competence in persons with acute brain injury. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 26(6), 737-749.
- Granholm, E., & Steinhauer, S. R. (2004). Pupillometric measures of cognitive and emotional processes. *International Journal of Psychophysiology*, 52(1), 1-6.
- Grant, D., & Berg, E. (1948). A behavioral analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card-sorting problem. *Journal of Experimental Psychology*, 38(4), 404-411.

- Gratton, G., & Fabiani, M. (2001). Shedding light on brain function: the event-related optical signal. *Trends in cognitive sciences*, 5(8), 357-363.
- Gratton, G., Fabiani, M., Elbert, T., & Rockstroh, B. (2003). Seeing right through you: applications of optical imaging to the study of the human brain. *Psychophysiology*, 40(4), 487-491.
- Greenwald, M., Cook, E., & Lang, P. (1989). Affective judgment and psychophysiological response: Dimensional covariation in the evaluation of pictorial stimuli. *Journal of Psychophysiology*, 3(1), 51-64.
- Gregoire, J., & Van Der Linden, M. (1997). Effect of age on forward and backward digit spans. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 4(2), 140-149.
- Grieve, S., Williams, L., Paul, R., Clark, C., & Gordon, E. (2007). Cognitive aging, executive function, and fractional anisotropy: a diffusion tensor MR imaging study. *American Journal of Neuroradiology*, 28(2), 226.
- Grosjean, V., & Ribert-Van De Weerd, C. (2005). Vers une psychologie ergonomique du bien-être et des émotions: les effets du contrôle dans les centres d'appels. *Le travail humain*(2005/4), 355-378.
- Gupta, A., Schwiegerling, J., & Straub, J. (2001). Design and use of an infrared Pupilometer for real-time pupil mapping in response to incremental illumination levels. *Vision Science and its Applications*.
- Gyurak, A., Goodkind, M., Madan, A., Kramer, J., Miller, B., & Levenson, R. (2009). Do tests of executive functioning predict ability to downregulate emotions spontaneously and when instructed to suppress? *Cogn Affect Behav Neurosci*, 9(2), 144-152.
- Haarmann, A., Boucsein, W., & Schaefer, F. (2009). Combining electrodermal responses and cardiovascular measures for probing adaptive automation during simulated flight. *Applied Ergonomics*, 40(6), 1026-1040.
- Hagler, D. J., & Sereno, M. I. (2006). Spatial maps in frontal and prefrontal cortex. *Neuroimage*, 29(2), 567-577.
- Hansen, A., Johnsen, B., & Thayer, J. (2003). Vagal influence on working memory and attention. *International Journal of Psychophysiology*, 48(3), 263-274.
- Hardy, D., Satz, P., D'Elia, L., & Uchiyama, C. (2007). Age-Related Group and Individual Differences in Aircraft Pilot Cognition. *The International Journal of Aviation Psychology*, 17(1), 77-90.
- Hardy, D., Slick, D., Satz, P., D'Elia, L., Uchiyama, C., & van Gorp, W. (1998). Neuropsychological test performance in middle-aged aviation pilots.
- Hardy, D. J., & Parasuraman, R. (1997). Cognition and flight performance in older pilots. *Journal of experimental psychology applied*, 3, 313-348.
- Harkey, J. A. Y. (1996). Age-related changes in selected status variables in general aviation pilots. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1517(-1), 37-43.
- Harnishfeger, K. K. (1995). The development of cognitive inhibition. *Interference and inhibition in cognition*, 175-204.
- Harss, C., Kastner, M., & Beerman, L. (1991). The impact of personality and task characteristics on stress and strain during helicopter flight. *The International Journal of Aviation Psychology*, 1(4), 301-318.
- Hartman, M., Bolton, E., & Fehnel, S. E. (2001). Accounting for age differences on the Wisconsin Card Sorting Test: Decreased working memory, not inflexibility. *Psychology and aging*, 16(3), 385-399.
- Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988). Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*, 22, 193-225.
- Head, D., Kennedy, K. M., Rodrigue, K. M., & Raz, N. (2009). Age differences in perseveration: Cognitive and neuroanatomical mediators of performance on the Wisconsin Card Sorting Test. *Neuropsychologia*, 47(4), 1200-1203.

- Heaton, R., Chelune, G., Talley, J., Kay, G., & Curtiss, G. (1993). Wisconsin card sorting test manual: PAR.
- Helmers, K., Young, S., & Pihl, R. (1995). Assessment of measures of impulsivity in healthy male volunteers. *Personality and Individual Differences*, 19(6), 927-935.
- Helmreich, R. (1997). Managing human error in aviation. *Scientific American*, 276(5), 62-67.
- Helmreich, R., Merritt, A., & Wilhelm, J. (1999). The evolution of crew resource management training in commercial aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 9(1), 19-32.
- Hess, E., & Polt, J. (1960). Pupil size as related to interest value of visual stimuli. *Science*, 132(3423), 349-350.
- Hess, E., & Polt, J. (1964). Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving (Vol. 143, pp. 1190-1192).
- Hess, E., Seltzer, A., & Shlien, J. (1965). Pupil response of hetero- and homosexual males to pictures of men and women. *Journal of Abnormal Psychology*, 70(3), 165-168.
- Hester, R., & Garavan, H. (2005). Working memory and executive function: the influence of content and load on the control of attention. *Memory & cognition*, 33(2), 221.
- Heyder, K., Suchan, B., & Daum, I. (2004). Cortico-subcortical contributions to executive control. *Acta Psychologica*, 115(2-3), 271-289.
- Heymann, M., & Degani, A. (2001). On formal abstraction and verification of human-machine interfaces: the discrete event case. NASA Technical Memorandum.
- Higginson, C. I., King, D. S., Levine, D., Wheelock, V. L., Khamphay, N. O., & Sigvardt, K. A. (2003). The relationship between executive function and verbal memory in Parkinson's disease. *Brain and cognition*, 52(3), 343-352.
- Hinson, J., Jameson, T., & Whitney, P. (2003). Impulsive decision making and working memory. *Journal of experimental psychology. Learning, memory, and cognition*, 29(2), 298.
- Hoeks, B. (1995). The pupillary response as a measure of mental processing load: with application to picture naming: Nijmegen.
- Hogan, M. (2003). Divided attention in older but not younger adults is impaired by anxiety. *Experimental aging research*, 29(2), 111-136.
- Hollnagel, E. (2004). Barriers and accident prevention: Ashgate Pub Ltd.
- Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6(2), 65-70.
- Hormann, H., & Maschke, P. (1996). On the relation between personality and job performance of airline pilots. *The International Journal of Aviation Psychology*, 6(2), 171-178.
- Horst, R., & Kay, G. (1991). COGSCREEN- Personal computer-based tests of cognitive function for occupational medical certification.
- Houx, P., & Jolles, J. (1993). Age-related decline of psychomotor speed: effects of age, brain health, sex, and education. *Perceptual and motor skills*, 76(1), 195-211.
- Houx, P. J., Jolles, J., & Vreeling, F. W. (1993). Stroop interference: aging effects assessed with the Stroop Color-Word Test. *Experimental Aging Research*, 19(3), 209-224.
- Hughes, P. K., & Cole, B. L. (1988). The effect of attentional demand on eye movement behaviour when driving. In M. H. F. A. G. Gale, C. M. Haslegrave, P. Smith, & S. P. Taylor (Ed.), *Vision in vehicles II* (pp. 221-230). Amsterdam: North-Holland.
- Hurter, C., Tissoires, B., & Conversy, S. (2009). FromDaDy: spreading data across views to support iterative exploration of aircraft trajectories. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*.
- Hyönä, J., Tammola, J., & Alaja, A. M. (1995). Pupil dilation as a measure of processing load in simultaneous interpretation and other language tasks. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 48(3), 598-612.
- IATA. (2005). Go Around Events, Safety Trend Evaluation, Analysis and Data Exchange System (STEADES). 1, 9-14.
- Imhoff, D., & Levine, J. (1981). Perceptual-Motor and Cognitive Performance Task-Battery for Pilot Selection: Advanced research resources organization washington dc

- Iqbal, S. T., Zheng, X. S., & Bailey, B. P. (2004). Task-evoked pupillary response to mental workload in human-computer interaction.
- Isen, A. (1999). A neuropsychological theory of positive affect and its influence on cognition. *Psychological Review*, 106(3), 529-550.
- Isen, A. (2001). An influence of positive affect on decision making in complex situations: Theoretical issues with practical implications. *Journal of Consumer Psychology*, 75-85.
- Isen, A. (2004). Positive Affect Facilitates Thinking and Problem Solving.
- Izard, C. (1993). Four systems for emotion activation: Cognitive and noncognitive processes. *Psychological review-new york* 100, 68-68.
- Jaeggi, S., Schmid, C., Buschkuhl, M., & Perrig, W. (2008). Differential Age Effects in Load-Dependent Memory Processing. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 99999(1), 1-23.
- James, W. (1884). What is an Emotion? *Mind*, 188-205.
- Janisse, M. (1974). Pupil size, affect and exposure frequency. *Social Behavior and personality*, 2(2), 125-146.
- Jennings, J. R., & van der Molen, M. W. (2005). Preparation for speeded action as a psychophysiological concept. *Psychological bulletin*, 131(3), 434-459.
- Johannsen, P., Jakobsen, J., Bruhn, P., Hansen, S. B., Gee, A., Stødkilde-Jørgensen, H., et al. (1997). Cortical sites of sustained and divided attention in normal elderly humans. *Neuroimage*, 6(3), 145-155.
- Jonides, J., & Smith, E. (1997). The architecture of working memory. *Cognitive neuroscience. Studies in cognition*, 243-276.
- Juhel, J., & Auffray, C. (1998). L'inhibition cognitive chez la personne âgée: une recherche de validation conceptuelle. *European review of applied psychology*, 48(1), 27-32.
- Kahneman, D., & Beatty, J. (1966). Pupillary diameter and load on memory. *Science*, 154, 1583-1585.
- Kalbfleisch, M. L., Van Meter, J. W., & Zeffiro, T. A. (2007). The influences of task difficulty and response correctness on neural systems supporting fluid reasoning. *Cognitive Neurodynamics*, 1(1), 71-84.
- Karwowski, W., Siemionow, W., & Gielo-Periczak, K. (2003). Physical neuroergonomics: the human brain in control of physical work activities. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4, 1(2), 175-199.
- Kasarskis, P., Stehwen, J., Hickox, J., Aretz, A., & Wickens, C. (2001). Comparison of expert and novice scan behaviors during VFR flight.
- Kay, E., Hillman, D., Hyland, D., Voros, R., Harris, R., & Deimler, J. (1994). Age 60 rule research, Part III: Consolidated data base experiments final report: DOT/FAA/AM-92/22). Washington, DC: Federal Aviation Administration Office of Aviation Medicine.
- Kay, G. (1995). *CogScreen: Aeromedical Edition*. Odessa, Florida: Psychological Assessment Resources: Inc.
- Kay, G. (2001). Effects of aging on aviation-related cognitive function in commercial airline pilots. Paper presented at the In Proceedings of the 72nd Meeting of the Aerospace Medical Association, *Aviat Space Environ Med* 2001; 71:241.
- Keilp, J., Sackeim, H., & Mann, J. (2005). Correlates of trait impulsiveness in performance measures and neuropsychological tests. *Psychiatry research*, 135(3), 191-201.
- Kennedy, K., & Raz, N. (2009). Aging white matter and cognition: differential effects of regional variations in diffusion properties on memory, executive functions, and speed. *Neuropsychologia*, 47(3), 916-927.
- Kennedy, K. M., & Raz, N. (2009). Aging white matter and cognition: differential effects of regional variations in diffusion properties on memory, executive functions, and speed. *Neuropsychologia*, 47(3), 916-927.

- Kerick, S., & McDowell, K. (2009). *Understanding Brain, Cognition, and Behavior in Complex Dynamic Environments*.
- Keyser, V., & Woods, D. (1990). *Systems Reliability Assessment*, chapter Fixation errors in dynamics and complex systems: Kluwer Academic Press.
- Kirschbaum, C., Pirke, K., & Hellhammer, D. (1993). The 'Trier Social Stress Test'—a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. *Neuropsychobiology*, 28(1-2), 76-81.
- Knapp, C., & Johnson, R. (1996). F-16 Class A mishaps in the US Air Force, 1975-93. *Aviation, space, and environmental medicine*, 67(8), 777.
- Knutson, B., Adams, C., Fong, G., & Hommer, D. (2001). Anticipation of increasing monetary reward selectively recruits nucleus accumbens. *Journal of Neuroscience*, 21(16), 159.
- Koechlin, E., Corrado, G., Pietrini, P., & Grafman, J. (2000). Dissociating the role of the medial and lateral anterior prefrontal cortex in human planning (Vol. 97, pp. 7651-7656): National Acad Sciences.
- Kondo, H., Osaka, N., & Osaka, M. (2004). Cooperation of the anterior cingulate cortex and dorsolateral prefrontal cortex for attention shifting. *Neuroimage*, 23(2), 670-679.
- Kramer, A. (1991). Physiological metrics of mental workload: A review of recent progress. *Multiple-task performance*, 279-328.
- Kramer, A. F., Humphrey, D. G., Larish, J. F., Logan, G. D., & Strayer, D. L. (1994). Aging and inhibition: beyond a unitary view of inhibitory processing in attention. *Psychology and aging*, 9(4), 491.
- Kramer, J. H., Reed, B. R., Mungas, D., Weiner, M. W., & Chui, H. C. (2002). Executive dysfunction in subcortical ischaemic vascular disease. *British Medical Journal*, 72(2), 217-220.
- Kringelbach, M. (2005). The human orbitofrontal cortex: linking reward to hedonic experience. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(9), 691-702.
- Kutas, M., & Hillyard, S. (1983). Event-related brain potentials to grammatical errors and semantic anomalies. *Memory & cognition*, 11(5), 539-550.
- Kwong, K., Belliveau, J., Chesler, D., Goldberg, I., Weisskoff, R., Poncelet, B., et al. (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89(12), 5675-5679.
- Kyllonen, P., & Christal, R. (1990). Reasoning ability is (little more than) working memory capacity. *Intelligence*, 14(4), 389-433.
- Lane, R., Reiman, E., Bradley, M., Lang, P., Ahern, G., Davidson, R., et al. (1997). Neuroanatomical correlates of pleasant and unpleasant emotion. *Neuropsychologia*, 35(11), 1437-1444.
- Lang, P. (1980). Behavioral treatment and bio-behavioral assessment: Computer applications. *Technology in mental health care delivery systems*, 119-137.
- Lange, C. (1885). *The mechanism of the emotions*. The Classical Psychologists. Boston: Houghton Mifflin.
- Langley, L. K., Vivas, A. B., Fuentes, L. J., & Bagne, A. G. (2005). Differential age effects on attention-based inhibition: Inhibitory tagging and inhibition of return. *Psychology and aging*, 20(2), 356.
- Lazarus, R. (2006). *Stress and emotion: A new synthesis*: Springer Publishing Company.
- Lazarus, R., & Folkman, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping*: Springer Pub Co.
- Le Scanff, C., & Bertsch, J. (1995). *Stress et performance*: Presses universitaires de France.
- LeDoux, J. (1995). Emotion: Clues from the brain. *Annual review of psychology*, 46(1), 209-235.
- LeDoux, J. (1998). *The emotional brain: The mysterious underpinnings of emotional life*: Touchstone books.
- LeDoux, J. (2000). Emotion circuits in the brain. *Annual review of neuroscience*, 23(1), 155-184.
- Lee, Y., & Liu, B. (2003). Inflight workload assessment: Comparison of subjective and physiological measurements. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 74(10), 1078-1084.
- Lefrançois, C. (2009). *Stress et adaptation : vers un nouveau modèle neurocognitif*. Thèse de doctorat en psychologie cognitive. .

- Lehto, J. (1996). Are executive function tests dependent on working memory capacity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, 49, 29–50.
- Lemmon, V. W. (1927). The relation of reaction time to measures of intelligence, memory, and learning: Columbia university.
- Lesire, C., & Tessier, C. (2005). Particle Petri nets for aircraft procedure monitoring under uncertainty. Paper presented at the 26th International Conference on Application and Theory of Petri Nets and Other Models of Concurrency, Miami, Florida, USA.
- Levy, R., & Dubois, B. (2006). Apathy and the functional anatomy of the prefrontal cortex-basal ganglia circuits. *Cerebral Cortex*, 16(7), 916-928.
- Lezak, M. D. (1982). The problem of assessing executive functions. *International Journal of Psychology*, 17(1), 281-297.
- Lezak, M. D. (1995). *Neuropsychological assessment* (1995): New York: Oxford University Press.
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., & Loring, D. W. (2004). *Neuropsychological assessment* 4th ed: New York: Oxford University Press.
- Li, G., & Baker, S. (2007). Crash risk in general aviation. *Jama*, 297(14), 1596.
- Li, G., Baker, S., Grabowski, J., Qiang, Y., McCarthy, M., & Rebok, G. (2003). Age, flight experience, and risk of crash involvement in a cohort of professional pilots. *American journal of epidemiology*, 157(10), 874-880.
- Li, G., Baker, S., Grabowski, J., & Rebok, G. (2001). Factors associated with pilot error in aviation crashes. *Aviation, space, and environmental medicine*, 72(1), 52-58.
- Li, G., Baker, S., Lamb, M., Grabowski, J., & Rebok, G. (2002). Human factors in aviation crashes involving older pilots. *Aviation, space, and environmental medicine*, 73(2), 134-138.
- Li, G., Baker, S., Qiang, Y., Grabowski, J., & McCarthy, M. (2005). Driving-while-intoxicated history as a risk marker for general aviation pilots. *Accident Analysis and Prevention*, 37(1), 179-184.
- Li, G., Baker, S. P., Grabowski, J. G., Qiang, Y., McCarthy, M. L., & Rebok, G. W. (2003). Age, flight experience, and risk of crash involvement in a cohort of professional pilots. *American journal of epidemiology*, 157(10), 874-880.
- Li, G., Baker, S. P., Lamb, M. W., Grabowski, J. G., & Rebok, G. W. (2002). Human factors in aviation crashes involving older pilots. *Aviation, space, and environmental medicine*, 73(2), 134-138.
- Li, S., & Lindenberger, U. (1999). Cross-level unification: A computational exploration of the link between deterioration of neurotransmitter systems and dedifferentiation of cognitive abilities in old age. *Cognitive neuroscience of memory*, 103–146.
- Light, K. C., & Obrist, P. A. (1983). Task difficulty, heart rate reactivity, and cardiovascular responses to an appetitive reaction time task. *Psychophysiology*, 20(3), 301-312.
- Loubinoux, I., Tombari, D., Pariente, J., Gerdelat-Mas, A., Franceries, X., Cassol, E., et al. (2005). Modulation of behavior and cortical motor activity in healthy subjects by a chronic administration of a serotonin enhancer. *Neuroimage*, 27(2), 299-313.
- Lu, C., & Proctor, R. (1995). The influence of irrelevant location information on performance: A review of the Simon and spatial Stroop effects. *Psychonomic Bulletin and Review*, 2, 174-174.
- Luria, A. R. (1976). *The working brain: An introduction to neuropsychology*: Basic Books.
- Luria, A. R., Teuber, H. L., Pribram, K. H., & Haigh, B. (1966). *Higher cortical functions in man*: Basic Books New York.
- Lykken, D., Iacono, W., Haroian, K., McGue, M., & Bouchard, T. (1988). Habituation of the skin conductance response to strong stimuli: A twin study. *Psychophysiology*, 25(1), 4-15.
- MacDonald, A. W., Cohen, J. D., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control (Vol. 288, pp. 1835-1838).
- MacLean, P. (1962). New findings relevant to the evolution of psychosexual functions of the brain. *Journal of Nervous and Mental Disease*, 135(289-301).
- MacLeod, C. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, 109(2), 163-203.

- MacPherson, S. E., Phillips, L. H., & Sala, S. D. (2002). Age, executive function, and social decision making: A dorsolateral prefrontal theory of cognitive aging. *Psychology and Aging, 17*(4), 598-609.
- Maia, T., & McClelland, J. (2004). A reexamination of the evidence for the somatic marker hypothesis: What participants really know in the Iowa gambling task. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 101*(45), 16075.
- Manly, T., Hawkins, K., Evans, J., Woldt, K., & Robertson, I. H. (2002). Rehabilitation of executive function: Facilitation of effective goal management on complex tasks using periodic auditory alerts. *Neuropsychologia, 40*(3), 271-281.
- Martin, L., & Potts, G. (2009). Impulsivity in decision-making: An event-related potential investigation. *Personality and Individual Differences, 46*(3), 303-308.
- Masaoka, Y., Hirasawa, K., Yamane, F., Hori, T., & Homma, I. (2003). Effects of left amygdala lesions on respiration, skin conductance, heart rate, anxiety, and activity of the right amygdala during anticipation of negative stimulus. *Behavior modification, 27*(5), 607.
- Masaoka, Y., & Homma, I. (1997). Anxiety and respiratory patterns: their relationship during mental stress and physical load. *International Journal of Psychophysiology, 27*(2), 153-159.
- May, C. P., Kane, M. J., & Hasher, L. (1995). Determinants of negative priming. *Psychological Bulletin, 118*, 35-35.
- Mayberg, H., Liotti, M., Brannan, S., McGinnis, S., Mahurin, R., Jerabek, P., et al. (1999). Reciprocal limbic-cortical function and negative mood: converging PET findings in depression and normal sadness. *American Journal of Psychiatry, 156*(5), 675.
- Mayes, A. R., & Daum, I. (1997). How specific are the memory and other cognitive deficits caused by frontal lobe lesions. *Methodology of frontal and executive function, 471-487*.
- McBride, T., Arnold, S. E., & Gur, R. C. (1999). A comparative volumetric analysis of the prefrontal cortex in human and baboon MRI. *Brain Behav Evol, 54*, 159-166.
- McClelland, G., & Judd, C. (1993). Statistical difficulties of detecting interactions and moderator effects. *Psychological bulletin, 114*, 376-376.
- McDonald, B. C., Flashman, L. A., & Saykin, A. J. (2002). Executive dysfunction following traumatic brain injury: neural substrates and treatment strategies. *NeuroRehabilitation, 17*(4), 333-344.
- McDowd, J. M., Oseas-Kreger, D. M., & Filion, D. L. (1995). Inhibitory processes in cognition and aging. *Interference and inhibition in cognition, 363-400*.
- McPherson, S., Fairbanks, L., Tiken, S., Cummings, J. L., & Back-Madruga, C. (2002). Apathy and executive function in Alzheimer's disease. *Journal of the International Neuropsychological Society, 8*(03), 373-381.
- Meda, S., Calhoun, V., Astur, R., Turner, B., Ruopp, K., & Pearlson, G. (2009). Alcohol dose effects on brain circuits during simulated driving: An fMRI study. *Human Brain Mapping, 30*(4), 1257.
- Mefici, A. (2008). Sécurité aérienne, Pour Pilotes et Professionnels de l'Aviation.
- Middleton, F. A., & Strick, P. L. (2000). Basal ganglia output and cognition: evidence from anatomical, behavioral, and clinical studies. *Brain and Cognition, 42*(2), 183-200.
- Miller, E., & Wallis, J. (2009). Executive Function and Higher-Order Cognition: Definition and Neural Substrates. *Encycl Neurosci, 4*, 99-104.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for information processing. *Psychological Review, 63*(2), 81-97.
- Mitchell, D., Nakic, M., Fridberg, D., Kamel, N., Pine, D., & Blair, R. (2007). The impact of processing load on emotion. *Neuroimage, 34*(3), 1299-1309.
- Mitchell, R., & Phillips, L. (2007). The psychological, neurochemical and functional neuroanatomical mediators of the effects of positive and negative mood on executive functions. *Neuropsychologia, 45*(4), 617-629.
- Miu, A., Heilman, R., & Houser, D. (2007). Anxiety impairs decision-making: Psychophysiological evidence from an Iowa Gambling Task. *Biological Psychology*.

- 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.
- Monsell, S. (1996). Control of mental processes. *Unsolved mysteries of the mind: Tutorial essays in cognition*, 93–148.
- Moresi, S., Adam, J. J., Rijcken, J., Van Gerven, P. W. M., Kuipers, H., & Jolles, J. (2008). Pupil dilation in response preparation. *International Journal of Psychophysiology*, 67(2), 124-130.
- Morris, N., & Jones, D. (1990). Memory updating in working memory: The role of the central executive. *British journal of psychology(1953)*, 81(2), 111-121.
- Morrow, D., Leirer, V., & Altieri, P. (1992). Aging, expertise, and narrative processing. *Psychology and Aging*, 7(3), 376.
- Morrow, D., Leirer, V., Altieri, P., & Fitzsimmons, C. (1994). When expertise reduces age differences in performance. *Psychology and Aging*, 9, 134-134.
- Morrow, D., Menard, W., Ridolfo, H., Stine-Morrow, E., Teller, T., & Bryant, D. (2003). Expertise, cognitive ability, and age effects on pilot communication. *The International Journal of Aviation Psychology*, 13(4), 345-371.
- Morrow, D., Menard, W., Stine-Morrow, E., Teller, T., & Bryant, D. (2001). The influence of expertise and task factors on age differences in pilot communication. *Psychology and Aging*, 16(1), 31-46.
- Morrow, D., Ridolfo, H., Menard, W., Sanborn, A., Stine-Morrow, E., Magnor, C., et al. (2003). Environmental support promotes expertise-based mitigation of age differences on pilot communication tasks. *Psychology and Aging*, 18(2), 268-284.
- Moscovitch, M., & Winocur, G. (1995). Frontal lobes, memory, and aging. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 769(1 Structure and Functions of the Human Prefrontal Cortex), 119-150.
- Mumaw, R. J., Sarter, N. B., & Wickens, C. D. (2001). Analysis of pilots’ monitoring and performance on an automated flight deck. Paper presented at the 11th biennial meeting of the International Symposium on Aviation Psychology, Columbus, OH, USA.
- Mumenthaler, M., Noda, A., & Hoblyn, J. (2008). Acetylcholinesterase Inhibitor in Combination With Cognitive Training in Older Adults. *The Journals of Gerontology*, 63(5), 236.
- Muthard, E., & Wickens, C. (2003). Factors that mediate flight plan monitoring and errors in plan revision: Planning under automated and high workload conditions.
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Tiitinen, H., Jiang, D., & Alho, K. (1993). Attention and mismatch negativity. *Psychophysiology*, 30, 436-436.
- Nagai, Y., & Critchley, H. (2006). Novel Therapeutic Application of Galvanic Skin Response (GSR) Biofeedback to a Neurological Disorder: Mechanisms Underlying Biofeedback in Epilepsy Management. *New Research on Biofeedback*, 1.
- Nagai, Y., Critchley, H., Featherstone, E., Trimble, M., & Dolan, R. (2004). Activity in ventromedial prefrontal cortex covaries with sympathetic skin conductance level: a physiological account of a “default mode” of brain function. *Neuroimage*, 22(1), 243-251.
- Nagel, I. E., Chicherio, C., Li, S. C., von Oertzen, T., Sander, T., Villringer, A., et al. (2008). Human aging magnifies genetic effects on executive functioning and working memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2.
- Natsopoulos, D., Katsarou, Z., Alevriadou, A., Grouios, G., Bostantzopoulou, S., & Mentenopoulos, G. (1997). Deductive and inductive reasoning in Parkinson's disease patients and normal controls: Review and experimental evidence. *Cortex*, 33(3), 463-482.
- Neill, W. T., Valdes, L. A., & Terry, K. M. (1995). Selective attention and the inhibitory control of cognition. *Interference and inhibition in cognition*, 207–261.
- NEMSPA. (2009). Addendum to “An Opportunity to Improve”. National EMS Pilots Association.
- Neri, D., Oyung, R., Colletti, L., Mallis, M., Tam, P., & Dinges, D. (2002). Controlled breaks as a fatigue countermeasure on the flight deck. *Aviation, space, and environmental medicine*, 73(7), 654-664.

- Nigg, J. T. (2000). On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology: Views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychological Bulletin*, 126(2), 220-246.
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behavior. *Consciousness and self-regulation*, 4, 1-18.
- North, R., & Gopher, D. (1976). Measures of attention as predictors of flight performance. *Human factors*, 18, 1-13.
- NTSB. (2005). National Transportation Safety Board. Accidents, fatalities, and rates, 1986 through 2005, US General Aviation.
- Nyberg, L., Cabeza, R., & Tulving, E. (1996). PET studies of encoding and retrieval: The HERA model. *Psychonomic Bulletin and Review*, 3, 135-148.
- O'Hare, D. (1997). Cognitive Ability Determinants of Elite Pilot Performance. *Human factors*, 39(4).
- O'Hare, D., & Smitheram, T. (1995). "Pressing on" into deteriorating conditions: An application of behavioral decision theory to pilot decision making. *The International Journal of Aviation Psychology*, 5(4), 351-370.
- O'Hare, D., Wiggins, M., Batt, R., & Morrison, D. (1994). Cognitive failure analysis for aircraft accident investigation. *Ergonomics*, 37(11), 1855-1869.
- O'Donnell, R., & Eggemeier, F. (1986). Workload assessment methodology. *Handbook of Perception and Human Performance*, 2.
- Oaksford, M., Morris, F., Grainger, B., & Williams, J. (1996). Mood, reasoning, and central executive processes. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, 22(2), 476-492.
- Oei, N., Everaerd, W., Elzinga, B., Van Well, S., & Bermond, B. (2006). Psychosocial stress impairs working memory at high loads: An association with cortisol levels and memory retrieval. *Stress: The International Journal on the Biology of Stress*, 9(3), 133-141.
- Ogawa, S., Tank, D., Menon, R., Ellermann, J., Kim, S., Merkle, H., et al. (1992). Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: functional brain mapping with magnetic resonance imaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89(13), 5951-5955.
- Ohman, A., Hamm, A., & Hugdahl, K. (2000). Cognition and the autonomic nervous system: Orienting, anticipation, and conditioning. *Handbook of psychophysiology*, 533-575.
- Oldfield, R. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97.
- Orasanu, J., Ames, N., Martin, L., & Davison, J. (2001). Factors in Aviation Accidents: Decision Errors. Linking expertise and naturalistic decision making, 209.
- Orsini, A., Chiacchio, L., Cinque, M., Cocchiaro, C., Schiappa, O., & Grossi, D. (1986). Effects of age, education and sex on two tests of immediate memory: a study of normal subjects from 20 to 99 years of age. *Perceptual and motor skills*, 63(2 Pt 2), 727.
- Osterhout, L., & Holcomb, P. (1992). Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly* 1. *Journal of Memory and Language*, 31(6), 785-806.
- Owen, A., McMillan, K., Laird, A., & Bullmore, E. (2005). N-back working memory paradigm: a meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, 25(1), 46-59.
- Owen, A. M., Roberts, A. C., Hodges, J. R., & Robbins, T. W. (1993). Contrasting mechanisms of impaired attentional set-shifting in patients with frontal lobe damage or Parkinson's disease. *Brain*, 116(5), 1159.
- Parasuraman, R. (1998). *Neuroergonomics: The Study of Brain and Behavior at Work*: Website at <http://www.acad.cua.edu/as/psy/csl/neuroerg.htm>.
- Parasuraman, R. (2003). *Neuroergonomics: Research and practice*. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4(1), 5-20.
- Parasuraman, R., & Mouloua, M. (1996). *Automation and human performance: Theory and applications*: CRC.

- Parasuraman, R., Mouloua, M., & Hilburn, B. (1999). Adaptive aiding and adaptive task allocation enhance human-machine interaction. *Automation technology and human performance: Current research and trends*, 119–123.
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human factors*, 39(2).
- Partala, T., Jokiniemi, M., & Surakka, V. (2000). Pupillary responses to emotionally provocative stimuli.
- Pascual-Leone, A., Bartres-Faz, D., & Keenan, J. (1999). Transcranial magnetic stimulation: studying the brain-behaviour relationship by induction of 'virtual lesions'. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 354(1387), 1229.
- Pastor, J. (1999). *Raisonnement et mécanismes cérébraux sous-jacents, approche par l'intelligence artificielle*. Habilitation à diriger les Recherches, Université de Rennes I.
- Pastor, J., Agniel, A., & Celsis, P. (1998). Artificial Reasoners for the Cognitive Assessment of Patients with Parkinson's disease.
- Pekkala, S., Albert, M., Spiro Iii, A., & Erkinjuntti, T. (2008). Perseveration in Alzheimer's disease. *Dement Geriatr Cogn Disord*, 25(2), 109-114.
- Pelegrib, C., Maho, V., & Amalberti, R. (1995). Pilot age and training performance. *Aviation psychology: Training and selection*, 354-363.
- Peres, M., VAN DE MOORTELE, P., PIERARD, C., LEHERICY, S., SATABIN, P., Le Bihan, D., et al. (2000). Functional magnetic resonance imaging of mental strategy in a simulated aviation performance task. *Aviation, space, and environmental medicine*, 71(12), 1218-1231.
- Perry, R. J., & Hodges, J. R. (1999). Attention and executive deficits in Alzheimer's disease: a critical review. *Brain*, 122(3), 383.
- Philippot, P., Baeyens, C., & Douilliez, C. (2006). Specifying emotional information: Regulation of emotional intensity via executive processes. *Emotion*, 6(4), 560-571.
- Phillips, L., Bull, R., Adams, E., & Fraser, L. (2002). Positive mood and executive function: Evidence from Stroop and fluency tasks. *Emotion*, 2(1), 12-22.
- Phillips, M., Drevets, W., Rauch, S., & Lane, R. (2003). Neurobiology of emotion perception I: The neural basis of normal emotion perception. *Biological Psychiatry*, 54(5), 504-514.
- Pietrzak, R., Sprague, A., & Snyder, P. (2008). Trait impulsiveness and executive function in healthy young adults. *Journal of Research in Personality*, 42(5), 1347-1351.
- Plous, S. (1993). *The Psychology of Judgement and Decision Making*. : McGraw-Hill Inc: New York.
- Porcelli, A., Cruz, D., Wenberg, K., Patterson, M., Biswal, B., & Rypma, B. (2008). The effects of acute stress on human prefrontal working memory systems. *Physiology & Behavior*, 95(3), 282-289.
- Posner, M. (1975). Psychobiology of attention. *Handbook of psychobiology*, 441-480.
- Posner, M., & Raichle, M. (1994). Networks of attention. *Images of mind*, 153-179.
- Posner, M., & Rothbart, M. (2007). *Educating the human brain*: American Psychological Association Washington, DC.
- Posner, M. I., & Dehaene, S. (1994). Attentional networks. *Trends in Neurosciences*, 17(2), 75-79.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2006). Research on attention networks as a model for the integration of psychological science.
- Posner, M. I., Sheese, B. E., Odludas, Y., & Tang, Y. Y. (2006). Analyzing and shaping human attentional networks. *Neural Networks*, 19(9), 1422-1429.
- Prabhakaran, V., Smith, J., Desmond, J., Glover, G., & Gabrieli, J. (1997). Neural substrates of fluid reasoning: An fMRI study of neocortical activation during performance of the Raven's Progressive Matrices Test. *Cognitive Psychology*, 33(1), 43-63.
- Previc, F. (2000). Neuropsychological guidelines for aircraft control stations. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 19(2), 81-88.
- Qin, S., Hermans, E., Marle, H., Luo, J., & Fernández, G. (2009). Acute Psychological Stress Reduces Working Memory-Related Activity in the Dorsolateral Prefrontal Cortex. *Biological Psychiatry*.

- Radanovic, M., Azambuja, M., Mansur, L. L., Porto, C. S., & Scaff, M. (2003). Thalamus and language: interface with attention, memory and executive functions. *Arquivos de neuro-psiquiatria*, 61, 34-42.
- Raichle, M., MacLeod, A., Snyder, A., Powers, W., Gusnard, D., & Shulman, G. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(2), 676.
- Raichle, M., & Snyder, A. (2007). A default mode of brain function: a brief history of an evolving idea. *Neuroimage*, 37(4), 1083-1090.
- Raskin, M. (1975). Decreased skin conductance response habituation in chronically anxious patients. *Biological Psychology*, 2(4), 309-319.
- Raven, J. (1965). *Advanced Progressive Matrices. Sets I and II*. London: HK Lewis. Links.
- Raz, N. (2000). Aging of the Brain and Its Impact on Cognitive Performance: Integration of Structural and Functional Findings. *The handbook of aging and cognition*.
- Raz, N., Gunning-Dixon, F., Head, D., Dupuis, J., & Acker, J. (1998). Neuroanatomical correlates of cognitive aging: evidence from structural magnetic resonance imaging. *NEUROPSYCHOLOGY-NEW YORK-*, 12, 95-114.
- Reardon, M., Smythe, N., Omer, J., Helms, B., & Estrada, A. (1997). Effects of heat stress and an encumbered aviator uniform on flight performance in a UH-60 helicopter simulator: *Storming Media*.
- Reason, J. (1990). *Human error*: Cambridge University Press New York.
- Reason, J. (2000). *Human error: models and management* (Vol. 320, pp. 768-770): *British Medical Journal*.
- Recarte, M. A., & Nunes, L. M. (2003). Mental workload while driving: Effects on visual search, discrimination, and decision making. *JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY APPLIED*, 9(2), 119-133.
- Reitan, R. M. (1958). Validity of the Trail Making Test as an indicator of organic brain damage. *Percept Mot Skills*, 8(271), 76.
- Rhoda, D., & Pawlak, M. (1999). An assessment of thunderstorm penetrations and deviations by commercial aircraft in the terminal area. Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Laboratory, Project Report NASA/A-2, 3.
- Rhodes, M. G. (2004). Age-related differences in performance on the Wisconsin Card Sorting Test: A meta-analytic review. *Psychology and aging*, 19(3), 482-494.
- Richter, M., & Gendolla, G. (2006). Incentive effects on cardiovascular reactivity in active coping with unclear task difficulty. *International Journal of Psychophysiology*, 61(2), 216-225.
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system.
- Robbins, T. W., James, M., Owen, A. M., Sahakian, B. J., Lawrence, A. D., McInnes, L., et al. (1998). A study of performance on tests from the CANTAB battery sensitive to frontal lobe dysfunction in a large sample of normal volunteers: Implications for theories of executive functioning and cognitive aging. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 4(05), 474-490.
- Robinson, M. (1998). Running from William James' bear: A review of preattentive mechanisms and their contributions to emotional experience. *Cognition & Emotion*, 12(5), 667-696.
- Roscoe, A. (1978). Stress and workload in pilots. *Aviation, space, and environmental medicine*, 49(4), 630.
- Roth, W., Ehlers, A., Taylor, C., Margraf, J., & Agras, W. (1990). Skin conductance habituation in panic disorder patients* 1. *Biological Psychiatry*, 27(11), 1231-1243.
- Royall, D. R., Lauterbach, E. C., Cummings, J. L., Reeve, A., Rummans, T. A., Kaufer, D. I., et al. (2002). Executive Control Function A Review of Its Promise and Challenges for Clinical Research. A Report From the Committee on Research of the American Neuropsychiatric Association (Vol. 14, pp. 377-405): *Am Neuropsych Assoc*.
- Ruchsow, M., Grothe, J., Spitzer, M., & Kiefer, M. (2002). Human anterior cingulate cortex is activated by negative feedback: evidence from event-related potentials in a guessing task. *Neuroscience letters*, 325(3), 203-206.

- Russell, J. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of personality and social psychology*, 39(6), 1161-1178.
- Russell, J., & Carroll, J. (1999). On the bipolarity of positive and negative affect. *Psychological bulletin*, 125, 3-30.
- Rypma, B., & D'Esposito, M. (2003). A subsequent-memory effect in dorsolateral prefrontal cortex. *Cognitive Brain Research*, 16(2), 162-166.
- Sahakian, B. J., & Owen, A. M. (1992). Computerized assessment in neuropsychiatry using CANTAB: discussion paper. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 85(7), 399.
- Salthouse, T. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological review*, 103(3), 403-427.
- Salthouse, T., Atkinson, T., & Berish, D. (2003). Executive functioning as a potential mediator of age-related cognitive decline in normal adults. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132, 566-594.
- Salthouse, T. A. (1980). Age and memory: Strategies for localizing the loss. *New directions in memory and aging*, 47-65.
- Salthouse, T. A. (1991). *A theory of cognitive aging*: Elsevier.
- Salthouse, T. A. (1992). Working-memory mediation of adult age differences in integrative reasoning. *Memory and Cognition*, 20(4), 413-423.
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological review*, 103(3), 403-427.
- Salthouse, T. A. (2005). Relations between cognitive abilities and measures of executive functioning. *Neuropsychology*, 19(4), 532-545.
- Salthouse, T. A., & Coon, V. E. (1993). Influence of task-specific processing speed on age differences in memory. *Journal of Gerontology*, 48(5), P245.
- Sambataro, F., Murty, V., Callicott, J., Tan, H., Das, S., Weinberger, D., et al. (2008). Age-related alterations in default mode network: Impact on working memory performance. *Neurobiology of Aging*.
- Sander, D., & Koenig, O. *No Inferiority Complex in the Study of Emotion Complexity: A Cognitive Neuroscience Computational*.
- Sanfey, A. G., Hastie, R., Colvin, M. K., & Grafman, J. (2003). Phineas gauged: decision-making and the human prefrontal cortex. *Neuropsychologia*, 41(9), 1218-1229.
- Multimodal information presentation in support of human-automation communication and coordination, 2 13-35 2002).
- Sarter, N., & Sarter, M. (2003). Neuroergonomics: opportunities and challenges of merging cognitive neuroscience with cognitive ergonomics. *Theoretical issues in ergonomics science*, 4(1), 142-150.
- Scherer, K. (2000). Psychological models of emotion. *The neuropsychology of emotion*, 137, 162.
- Schmederer, A. (2005). Aquila AT01 Flight Manual, Technical report AFM-AT01-1010-100-E, AQUILA GmbH.
- Schnell, T., Macuda, T., Poolman, P., & Keller, M. (2006). Workload Assessment in Flight using Dense Array Eeg.
- Scholz, U., La Marca, R., Nater, U., Aberle, I., Ehlert, U., Hornung, R., et al. (2009). Go no-go performance under psychosocial stress: Beneficial effects of implementation intentions. *Neurobiology of Learning and Memory*, 91(1), 89-92.
- Schoofs, D., Preuß, D., & Wolf, O. (2008). Psychosocial stress induces working memory impairments in an n-back paradigm. *Psychoneuroendocrinology*, 33(5), 643-653.
- Schoofs, D., Wolf, O., & Smeets, T. (2009). Cold pressor stress impairs performance on working memory tasks requiring executive functions in healthy young men. *Behavioral Neuroscience*, 123(5), 1066-1075.
- Schroeder, D., Harris, H., & Broach, D. (1999). Pilot age and performance: An annotated bibliography (1990-1999).

- Schroeder, D., Harris, H., & Broach, D. (2000). Pilot age and performance: an annotated bibliography. Oklahoma City, OK: Federal Aviation Administration, Civil Aeromedical Institute. Human Resources Research Division.
- Schwarz, N. (2000). Emotion, cognition, and decision making. *Cognition & Emotion*, 14(4), 433-440.
- Scott, R., Harrison, J., Boulton, C., Wilson, J., Gregory, R., Parkin, S., et al. (2002). Global attentional-executive sequelae following surgical lesions to globus pallidus interna. *Brain*, 125(3), 562.
- Selye, H. (1950). *Stress: The physiology and pathology of exposure to stress*. Montreal: Acta Medica Publication.
- Selye, H. (1952). *The story of the adaptation syndrome*: Acta.
- Selye, H. (1974). *MD Stress Without Distress*. New York: The New American Library.
- Service, E., Helenius, P., Maury, S., & Salmelin, R. (2007). Localization of Syntactic and Semantic Brain Responses using Magnetoencephalography. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(7), 1193-1205.
- Shiv, B., Loewenstein, G., & Bechara, A. (2005). The dark side of emotion in decision-making: When individuals with decreased emotional reactions make more advantageous decisions. *Cognitive Brain Research*, 23(1), 85-92.
- Shulman, G., Corbetta, M., Buckner, R., Raichle, M., Fiez, J., Miezin, F., et al. (1997). Top-down modulation of early sensory cortex. *Cerebral Cortex*, 7(3), 193-206.
- Sicard, B., Taillemite, J., Jouve, E., & Blin, O. (2003). Risk propensity in commercial and military pilots. *Aviation, space, and environmental medicine*, 74(8), 879-881.
- Siem, F., & Murray, M. (1997). Personality factors affecting pilot combat performance: A preliminary investigation: *Storming Media*.
- Simpson, G. B., & Kang, H. (1994). Inhibitory processes in the recognition of homograph meanings. *Inhibitory processes in attention, memory, and language*, 359-381.
- Simpson, J., Drevets, W., Snyder, A., Gusnard, D., & Raichle, M. (2001b). Emotion-induced changes in human medial prefrontal cortex: II. During anticipatory anxiety. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(2), 688.
- Simpson, J., Snyder, A., Gusnard, D., & Raichle, M. (2001a). Emotion-induced changes in human medial prefrontal cortex: I. During cognitive task performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(2), 683.
- Sinha, R., Lovallo, W., & Parsons, O. (1992). Cardiovascular differentiation of emotions. *Psychosomatic Medicine*, 54(4), 422.
- Skinner, M. J., & Simpson, P. A. (2002). Workload issues in military tactical airlift. *The International Journal of Aviation Psychology*, 12(1), 79-93.
- Sloan, S., & Cooper, C. (1986). *Pilots under stress*: Routledge Kegan & Paul.
- Small, D. M., Gitelman, D. R., Gregory, M. D., Nobre, A. C., Parrish, T. B., & Mesulam, M. M. (2003). The posterior cingulate and medial prefrontal cortex mediate the anticipatory allocation of spatial attention. *Neuroimage*, 18(3), 633-641.
- Smith, E., & Jonides, J. (1997). Working memory: A view from neuroimaging. *Cognitive Psychology*, 33(1), 5-42.
- Snow, R., Kyllonen, P., & Marshalek, B. (1984). The topography of ability and learning correlations. *Advances in the Psychology of Human Intelligence: Volume 2*, 47.
- Sosnowski, T., Krzywosz-Rynkiewicz, B., & Roguska, J. (2004). Program running versus problem solving: Mental task effect on tonic heart rate. *Psychophysiology*, 41(3), 467-475.
- Spreen, O., Risser, A. H., & Edgell, D. (1995). *Developmental neuropsychology*: Oxford University Press, USA.
- Spreen, O., & Strauss, E. (1998). *A compendium of neuropsychological tests: Administration, norms, and commentary*: Oxford University Press, USA.

- Stam, C. J., Visser, S. L., Op de Coul, A. A. W., De Sonneville, L. M. J., Schellens, R., Brunia, C. H. M., et al. (1993). Disturbed frontal regulation of attention in Parkinson's disease. *Brain*, 116(5), 1139.
- Stokes, A., & Kite, K. (1994). *Flight stress: Stress, fatigue, and performance in aviation*: Avebury Aviation.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology: General*, 18, 643-662.
- Stuss, D., Eskes, G., & Foster, J. (1994). Experimental neuropsychological studies of frontal lobe functions. *Handbook of neuropsychology*, 9, 149–185.
- Stuss, D. T., & Alexander, M. P. (2000). Executive functions and the frontal lobes: a conceptual view. *Psychological Research*, 63(3), 289-298.
- Süß, H., Oberauer, K., Wittmann, W., Wilhelm, O., & Schulze, R. (2002). Working-memory capacity explains reasoning ability—and a little bit more. *Intelligence*, 30(3), 261-288.
- Taylor, J., Kennedy, Q., Noda, A., & Yesavage, J. (2007). Pilot age and expertise predict flight simulator performance: A 3-year longitudinal study. *Neurology*, 68(9), 648.
- Taylor, J., O'Hara, R., Mumenthaler, M., & Yesavage, J. (2000). Relationship of CogScreen-AE to flight simulator performance and pilot age. *Aviation, space, and environmental medicine*, 71(4), 373.
- Taylor, J., O'Hara, R., Mumenthaler, M., Rosen, A., & Yesavage, J. (2005). Cognitive ability, expertise, and age differences in following air-traffic control instructions. *Psychology and Aging*, 20(1), 117-133.
- Taylor, S., Welsh, R., Wager, T., Luan Phan, K., Fitzgerald, K., & Gehring, W. (2004). A functional neuroimaging study of motivation and executive function. *Neuroimage*, 21(3), 1045-1054.
- Tisserand, D. J., & Jolles, J. (2003). Special issue on the involvement of prefrontal networks in cognitive ageing. *Cortex*, 39, 1107-1128.
- Travis, L. E., & Hunter, T. A. (1928). The relation between "Intelligence" and reflex conduction rate. *Exper. Psychol*, 11, 342-354.
- Treitz, F. H., Heyder, K., & Daum, I. (2007). Differential course of executive control changes during normal aging. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 14(4), 370-393.
- Tsang, P., & Shaner, T. (1995). Age, expertise, structural similarity, and time-sharing efficiency (of pilots and non-pilots).
- Tsang, P., & Shaner, T. (1998). Age, attention, expertise, and time-sharing performance. *Psychology and Aging*, 13, 323-347.
- Tucker-Drob, E. M., Johnson, K. E., & Jones, R. N. (2009). The cognitive reserve hypothesis: A longitudinal examination of age-associated declines in reasoning and processing speed. *Developmental psychology*, 45(2), 431.
- Tucker, D., & Derryberry, D. (1992). Motivated attention: Anxiety and the frontal executive functions. *Neuropsychiatry, neuropsychology and behavioral neurology*, 5(4), 233-252.
- Uc, E., Rizzo, M., Anderson, S., Shi, Q., & Dawson, J. (2005). Driver landmark and traffic sign identification in early Alzheimer's disease. *British Medical Journal*, 76(6), 764-768.
- Umberto, E. (1982). *Le Nom de la rose*.
- Uttl, B., & Graf, P. (1997). Color-word Stroop test performance across the adult life span. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 19(3), 405-420.
- Van der Linden, M., Bredart, S., & Beerten, A. (1994). Age-related differences in updating working memory. *British journal of psychology*(1953), 85(1), 145-152.
- Van der Veen, F., Van der Molen, M., Crone, E., & Jennings, J. (2004). Phasic heart rate responses to performance feedback in a time production task: effects of information versus valence. *Biological Psychology*, 65(2), 147-161.
- Van Petten, C., Plante, E., Davidson, P. S. R., Kuo, T. Y., Bajuscak, L., & Glisky, E. L. (2004). Memory and executive function in older adults: relationships with temporal and prefrontal gray matter volumes and white matter hyperintensities. *Neuropsychologia*, 42(10), 1313-1335.

- Van Strien, J., Stolk, B., & Zuiker, S. (1995). Hemisphere-specific treatment of dyslexia subtypes: better reading with anxiety-laden words? *Journal of learning disabilities*, 28(1), 30.
- Veltman, J., & Gaillard, A. (1996). Physiological indices of workload in a simulated flight task. *Biological Psychology*, 42(3), 323-342.
- Veltman, J. A. (2002). A comparative study of psychophysiological reactions during simulator and real flight. *The International Journal of Aviation Psychology*, 12(1), 33-48.
- Veltman, J. A., & Gaillard, A. W. (1996). Physiological indices of workload in a simulated flight task. *Biol Psychol*, 42(3), 323-342.
- Venables, P. (1991). Autonomic activity. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 620, 191-207.
- Verhaeghen, P. (1993). Marcoen, A, & Goossens, L. Facts and fiction about memory aging: A quantitative integration of research findings. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 48, 157-171.
- Waldstein, S., & Katzel, L. (2005). Stress-induced blood pressure reactivity and cognitive function. *Neurology*, 64(10), 1746-1749.
- Warner, R. M., & Strowman, S. R. (1995). Cardiovascular reactivity and positive/negative affect during conversations. *Journal of behavioral medicine*, 18(2), 141-159.
- Wason, P. (1960). On the failure to eliminate hypotheses in a conceptual task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 12, 129-140.
- West, R. (2000). In defense of the frontal lobe hypothesis of cognitive aging. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 6(06), 727-729.
- West, R., & Baylis, G. C. (1998). Effects of increased response dominance and contextual disintegration on the Stroop interference effect in older adults. *Psychology and Aging*, 13, 206-217.
- Wiegmann, D., Goh, J., & O'Hare, D. (2002). The role of situation assessment and flight experience in pilots' decisions to continue visual flight rules flight into adverse weather. *Human factors*, 44(2), 189.
- Wiegmann, D., & Shappell, S. (2001). Human error perspectives in aviation. *International Journal of Aviation Psychology*, 11(4), 341-357.
- Wiener, E., & Nagel, D. (1988). *Human factors in aviation: Academic Pr.*
- Wiggins, M., & O'Hare, D. (1995). Expertise in aeronautical weather-related decision making: A cross-sectional analysis of general aviation pilots. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 1(4), 305-320.
- Williams, L., Phillips, M., Brammer, M., Skerrett, D., Lagopoulos, J., Rennie, C., et al. (2001). Arousal dissociates amygdala and hippocampal fear responses: evidence from simultaneous fMRI and skin conductance recording. *Neuroimage*, 14(5), 1070-1079.
- Wilson, G. (2002). An analysis of mental workload in pilots during flight using multiple psychophysiological measures. *The International Journal of Aviation Psychology*, 12(1), 3-18.
- Wilson, G. F., & Eggemeier, F. T. (1991). Psychophysiological assessment of workload in multi-task environments. *Multiple-task performance*, 329-360.
- Wood, J. N., & Grafman, J. (2003). Human prefrontal cortex: processing and representational perspectives. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(2), 139-147.
- Xue, G., Lu, Z., Levin, I., Weller, J., Li, X., & Bechara, A. (2009). Functional Dissociations of Risk and Reward Processing in the Medial Prefrontal Cortex. *Cerebral Cortex*, 19, 1019-1027.
- Yakimovich, N., Strongin, G., Govorushenko, V., Schroeder, D., & Kay, G. (1994). Cogscreen as a predictor of flight performance in Russian pilots.
- Yerkes, R., & JD, D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit formation. *Journal of Comparative neurology and psychology*, 18, 459-482.
- Yerkes, R., & JD, D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit formation. *Journal of Comparative neurology and psychology*, 18, 459-482.
- Yesavage, J., Dolhert, N., & Taylor, J. (1994). Flight simulator performance of younger and older aircraft pilots: effects of age and alcohol. *Journal of the American Geriatrics Society*, 42(6), 577.

- Yesavage, J., Mumenthaler, M., Taylor, J., Friedman, L., O'Hara, R., Sheikh, J., et al. (2002). Donepezil and flight simulator performance: effects on retention of complex skills (Vol. 59, pp. 123-125): AAN Enterprises.
- Yesavage, J., Taylor, J., Mumenthaler, M., Noda, A., & O'Hara, R. (1999). Relationship of age and simulated flight performance. *Journal of the American Geriatrics Society*, 47(7), 819.
- Zacks, R., & Hasher, L. (1997). Cognitive gerontology and attentional inhibition: A reply to Burke and McDowd. *Journal of Gerontology: psychological sciences*, 52(6), P274-P283.
- Zahr, N. M., Mayer, D., Pfefferbaum, A., & Sullivan, E. V. (2008). Low striatal glutamate levels underlie cognitive decline in the elderly: evidence from in vivo molecular spectroscopy. *Cerebral Cortex*.

Influence de la récompense et de l'âge sur la performance de pilotage : une contribution de la neuroergonomie à la sécurité aérienne

Classiquement, les interactions homme - système artificiel (IHSA) ont été étudiées par le seul intermédiaire des changements du comportement humain face à une variation du système. Si cette approche a permis de faire progresser les IHSA, surtout lorsque les observations débouchaient sur de la modélisation descriptive, un pan important de l'interaction reste néanmoins méconnu. En effet, alors que, par exemple dans l'aéronautique militaire, les contraintes physiologiques étaient prises en compte (ex : voile noir), les contraintes cognitives créées par le fonctionnement du cerveau étaient largement méconnues. Dans cette perspective, l'erreur humaine devient un « symptôme » des carences du système. Une approche originale et innovante pour traiter la problématique des interactions homme-système est d'utiliser les outils et les concepts des neurosciences intégratives et de la neuropsychologie. Les travaux de ces disciplines, basées sur l'étude du substrat des mécanismes cérébraux des fonctions cognitives, ont fait progresser les connaissances sur la compréhension des interactions de l'homme avec son environnement. Ces résultats scientifiques suscitent depuis peu l'intérêt pour les facteurs humains et ont donné très récemment naissance à un nouveau courant aux Etats-Unis : la neuroergonomie. C'est dans cette démarche de neuroergonomie que nous avons tenté de mieux comprendre la similarité de certains troubles des fonctions exécutives (FE), capacités cognitives de haut niveau, qui apparaissent chez le sujet diminué (pathologie neurologique, manque de sommeil, prise de certains médicaments etc.) et chez le pilote sain en situation dégradée. En effet, les erreurs de pilotage peuvent être, dans certains cas, attribuées à des perturbations temporaires des FE. Ces constatations plaident en faveur de l'hypothèse de mécanismes cérébraux communs suggérant l'existence d'un continuum cognitif (Pastor, 1999), des performances intellectuelles optimales à un fonctionnement très dégradé, proche de celui retrouvé dans la pathologie. Nous avons réalisé une première étude visant à comprendre l'influence du risque et de la récompense sur la prise de décision en aéronautique, en utilisant un protocole de neuroéconomie, des mesures psychophysiologiques et l'IRMf. Les résultats préliminaires de neuroimagerie indiquent que le passage de la prise de décision « à froid » vers la prise de décision « à chaud » se traduit par un basculement préfrontal dorsolatéral (siège des FE) vers des activations préfrontales ventromédianes (aire connectée aux régions émotionnelles du cerveau). Ce basculement était accompagné d'une augmentation du rythme cardiaque, signe de l'effet émotionnel provoqué par la récompense. Nous avons également mené une étude afin de détecter les perturbations subtiles des FE au cours du vieillissement normal pour définir des indices prédictifs de la capacité à piloter dans l'aviation générale où aucune limite d'âge n'existe. Les résultats ont mis en évidence la grande vulnérabilité de certaines FE aux effets de l'âge et, par ailleurs, que les capacités de raisonnement, de mémoire de travail mais aussi l'expérience de vol et le niveau d'impulsivité trait étaient associés à la performance de pilotage et à l'erreur décisionnelle. Enfin, nous avons opérationnalisé nos résultats par des expérimentations réalisées en vol réel en employant des mesures oculométriques. L'étude a montré la fiabilité du système à collecter les prises d'informations visuelles des pilotes. La dilatation pupillaire semblait également pointer certains effets du stress et de la charge cognitive. Toutes ces recherches illustrent la capacité de la neuroergonomie à nourrir en retour les disciplines dont elle émerge, notamment les facteurs humains.

Mots clés : neuroergonomie, neurosciences, neuropsychologie, facteurs humains, sécurité aérienne, psychophysiologie, vieillissement, accidentologie

Influence of age and reward on piloting performance : a neuroergonomics contribution to aeronautic safety

Traditionally, the human-system interactions (HIS) have been studied through the modification of the human behavior in response to system variations. Although this approach has opened the way to great progresses in HIS framework, especially when observations led to descriptive modeling, an important part of the interaction remains unknown. Indeed, while, for instance in military aeronautics, the physiological constraints were taken into account (eg. grey-out), the cognitive constraints inherent to the brain functioning were largely unknown. In this perspective, human error becomes a symptom of the system deficiency. An innovative and original approach to cope with the problematic of the HIS is to use the tools and concepts of the integrative neurosciences and of the neuropsychology. These researches, based upon the study of the neural substrate of the cognitive mechanisms, have made the knowledge related to the man interaction with his environment grow. These scientific results arouse human factor interest and generated a new discipline in the USA: neuroergonomics. In this framework, we tried to better understand the similarity of some impairment of the executive functions (EFs) which are high level cognitive abilities that appear within the diminished subject (neurological pathology, sleep deprivation, effects of some medications etc.) and within the healthy pilot facing degraded conditions. Indeed, piloting errors may be, in some cases, attributed to temporary perturbations of the EFs. These findings plead in favor of the hypothesis of common cerebral mechanisms and suggest the existence of a cognitive continuum, spanning from optimal intellectual performances to a degraded functioning, as found in pathological subjects. We have performed a first study aiming at understanding the cross influences of the risk and the reward on decision making in aeronautics. This experiment has involved psychophysiological measure, neuroimaging tools (fMRI) and a neuroeconomics experimental protocol. The neuroimaging preliminary results point out that the shift from "cold" reasoning to "hot" reasoning has resulted in a transfer from dorsolateral prefrontal cortex (main center of the EFs) activations toward ventromedial prefrontal cortex (strongly connected to emotional brains areas) activations. This shift was associated with an increase heart rate, sign of the emotional impact of the reward. We have also conducted a research to assess the subtle perturbations of the EFs during normal aging so as to identify predictive clues of the ability to pilot in general aviation, where no age limit is defined. The results showed a stronger vulnerability of EFs to the aging effects and, besides, reasoning, working memory abilities and also flight experience and trait impulsivity were related to piloting performance and poor decision making. Finally, we have operationalized our results by experimentations carried out in real flight with oculometric means. The study revealed the feasibility of collecting visual information taking of pilots in real flight, and the pupil dilation indicated stress and mental load effects. All these researches illustrate the capacity of neuroergonomics to grow beyond the disciplines from which it emerges, in particular human factors.

Keywords : Neuroergonomics, neuroscience, neuropsychology, human factors, aviation safety, psychophysiology, aging, accidentology