



**HAL**  
open science

# Vers une gestion experte des tâches simultanées en aéronautique militaire

Grégory Froger

► **To cite this version:**

Grégory Froger. Vers une gestion experte des tâches simultanées en aéronautique militaire. Sciences de l'Homme et Société. Aix Marseille Université (AMU), 2021. Français. NNT: . tel-04532425

**HAL Id: tel-04532425**

**<https://hal.science/tel-04532425>**

Submitted on 4 Apr 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

..... NNT/NL : 0000AIXM0000/000ED000

# THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue à Aix-Marseille Université  
le 07 décembre 2021 par

## Grégory Froger

### Vers une gestion experte des tâches simultanées en aéronautique militaire.

**Discipline**

Psychologie

**École doctorale**

ED 356 – COGNITION, LANGAGE,  
ÉDUCATION

**Laboratoire/Partenaires de recherche**

Centre de recherche en Psychologie de  
la Connaissance, du Langage et de  
l'Emotion (PsyCLE) U.R. 3273

Centre de recherche de l'école de l'air  
(CREA)

• **Composition du jury**

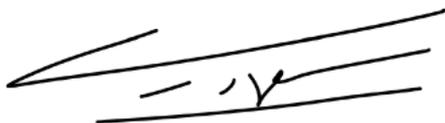
• Jean-Michel Boucheix Rapporteur  
• LEAD CNRS – Université Bourgogne Franche-Comté  
• Samira Bourgeois-Bougrine Rapporteur  
• LAPEA – Université Paris Descartes  
• Fabien Girandola Président du jury  
• LPS – Aix Marseille Université  
• Nathalie Bonnardel Directrice de thèse  
• PSYCLE – Aix Marseille Université  
• Colin Blättler Co-directeur de thèse  
• CREA – Ecole de l'Air et de l'Espace  
• Julien Donnot Examineur  
• CEAM – Armée de l'Air et de l'Espace

# Affidavit

Je soussigné, Grégory Froger, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Nathalie Bonnardel et de Colin Blättler dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect à la fois de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et de la charte d'Aix-Marseille Université relative à la lutte contre le plagiat.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Marseille., le 7 juillet 2021

A handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes. The signature is positioned above a horizontal line that spans the width of the signature.

# Liste de publications et participation aux conférences

## 1. Liste des publications réalisées dans le cadre du projet de thèse :

1. Article publié : Froger, G., Blättler, C., Dubois, E., Camachon, C., & Bonnardel, N. (2018). Time-interval emphasis in an aeronautical dual-task context: A countermeasure to task absorption. *Human factors*, 60(7), 936-946.
2. Article publié : Blättler, C., Fabre, L., & Froger, G. (2020). Display on demand method increases time spent looking outside the cockpit: Testing a training method during visual flight rules flights. *Aviation Psychology and Applied Human Factors*.
3. Article soumis : De la gestion de tâches isolées à la gestion de tâches multiples. Théorie de la dynamique d'évolution de certains mécanismes cognitifs au cours de l'exposition répétée à des situations multitâches.
4. Article en préparation : Objectification of Flight Crews' Cognitive Load: Toward a French Air Force Academy Task Load Index (FAFA TLX)
5. Article en préparation : étude d'identification des tâches exigeantes en aéronautique de combat.

## 2. Participation aux conférences et écoles d'été au cours de la période de thèse :

1. Froger, G., Blättler, C., & Bonnardel, N. (2020). To a COP with FCAS: Cognitive Optimization Program with Future Combat Air System. In: 1st International Conference on Cognitive Aircraft Systems - ICCAS 2020, 18 March 2020 - 19 March 2020 (Toulouse, France). Poster.
2. Froger, G., Blatter, C., Dubois, É., Camachon, C., & Bonnardel, N. (2017). L'apprentissage d'un séquençage visuo-attentionnel pour lutter contre la distraction en contexte aéronautique de double tâche. In Actes du 9ème Colloque de Psychologie Ergonomique-EPIQUE'2017. Communication orale.

# Résumé

Les situations aéronautiques en aviation de chasse sont fréquemment constituées de tâches à réaliser simultanément. La réalisation de tâches présentées en même temps constitue un défi pour l'être humain, de nature à générer de la surcharge cognitive. L'objectif de ce travail est de proposer une approche théorique permettant d'éclairer ces phénomènes en vue de concevoir et d'évaluer des dispositifs de formation permettant de gérer au mieux les situations aéronautiques multitâches. Dans un premier temps nous présenterons des mécanismes cognitifs à l'œuvre dans les situations multitâches. Il s'agira ensuite d'identifier des tâches impliquées dans la surcharge cognitive en situation de vol et plus particulièrement dans le contexte de l'aviation de chasse. Des tâches identifiées comme génératrices de surcharge au sein de l'aviation de chasse serviront enfin à la conception et à l'évaluation de dispositifs de formation visant à renforcer les mécanismes cognitifs à l'œuvre dans des situations multitâches.

Les résultats expérimentaux montrent que les dispositifs de formation testés au cours des études permettent à la fois un apprentissage des tâches après un entraînement en double tâche et apparaissent efficaces pour renforcer des mécanismes cognitifs à l'œuvre en situation multitâche. Une méthode d'évaluation de la charge cognitive reposant sur le protocole des empan complexes présente également des résultats prometteurs en vue d'objectiver la charge cognitive des tâches. La transférabilité des mécanismes renforcés et la méthode d'objectivation de la charge cognitive doivent maintenant être testées dans un contexte plus naturel.

Si le milieu d'étude est ici concentré sur l'aviation, les applications pratiques des résultats observés concernent l'ensemble des domaines constitués de situations multitâches (transports, traduction simultanée, etc.).

Mots clés : multitâche, automatisation, permutation, apprentissage, aéronautique

# Abstract

Aeronautical situations in combat aviation are frequently made up of tasks to be performed simultaneously. The realization of tasks presented at the same time constitutes a challenge for the human being, likely to generate cognitive overload. The objective of this work is to propose a theoretical approach to shed light on these phenomena in order to design and evaluate training devices that allow individuals to manage multitasking aeronautical situations. First, we will present the cognitive mechanisms at work in multitasking situations. We will then identify tasks involved in cognitive overload in flight situations and more particularly in the context of fighter aviation. Tasks identified as generating overload in fighter aviation will finally be used to design and evaluate training devices aiming at reinforcing the cognitive mechanisms at work in multitasking situations.

The experimental results show that the training devices tested in the course of the studies allow both learning of tasks after dual-task training and appear to be effective in reinforcing cognitive mechanisms at work in multitask situations. A method of evaluating cognitive load based on the complex span protocol also shows promising results for objectifying the cognitive load of tasks. The transferability of the reinforced mechanisms and the method of objectifying cognitive load must now be tested in a more natural context.

Although the study environment is focused on aviation, the practical applications of the observed results concern all domains made up of multitasking situations (transportation, simultaneous translation, etc.).

Keywords: multitasking, automatization, switching, learning, aviation

# Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement mon encadrement et en tout premier lieu ma directrice Nathalie qui a accueilli cette aventure avec une constante bienveillance dans les conditions singulières d'un travail à distance. Je remercie mon remarquable co-encadrant Colin, d'une présence de tous les instants, qui m'a fait découvrir que la recherche fait naître les amitiés puissantes. Je remercie le centre de recherche de l'école de l'air, lieu de la majorité de mes expériences, et son directeur. Mes remerciements appuyés rejoignent les escadrons de chasse nancéiens et tout particulièrement le grand « Navarre » au sein duquel j'ai découvert et muri la problématique abordée ici. Je remercie également le service des urgences aéronautiques, au sein duquel je travaillais pendant ces années étudiantes, et je salue la bienveillance et l'engagement aussi puissant que discret de l'ensemble des personnes de ce service.

Je tiens à remercier chaleureusement tous mes proches qui, en me soutenant, ont œuvré à la réalisation de ce travail et ainsi au développement de ma pensée. Ce soutien permanent et tendre m'a été précieux et vous a offert, peut-être malgré-vous, de nouvelles compétences au premier rang desquelles la tolérance et la patience. Merci maman, merci mes frères au ciel et ici et tous ici, merci mes filles. Merci les copains. Merci ma compagne.

*«Felix qui potuit rerum cognoscere causas»*

Bienheureux celui qui a pu pénétrer les causes des phénomènes.

Virgile, 1<sup>er</sup> siècle av. J.C.

# Table des matières

<b>Affidavit .....</b>	<b>2</b>
<b>Liste de publications et participation aux conférences .....</b>	<b>3</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>6</b>
<b>Table des matières.....</b>	<b>7</b>
<b>Contexte et principaux résultats .....</b>	<b>10</b>
<b>Chapitre 1 : Cadre théorique .....</b>	<b>23</b>
<b>Vers une gestion experte des situations multitâches .....</b>	<b>23</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>24</b>
<b>2. La notion de configuration du système cognitif ou <i>task set</i> .....</b>	<b>26</b>
<b>3. L'influence de la répétition sur les connaissances et les habiletés – l'automatisation ...</b>	<b>28</b>
<b>4. La permutation : une habileté générique au cœur de toute situation de tâches multiples.     .....</b>	<b>33</b>
<b>5. Les avantages de l'entraînement en condition de double tâche .....</b>	<b>39</b>
5.1. Le protocole PRP.....	40
5.2. Hypothèse structurale et hypothèse stratégique.....	44
5.3. Situation de double tâche : les effets de l'automatisation d'une seule des deux tâches	45
5.4. L'automatisation tâche par tâche <i>versus</i> l'entraînement en double tâche .....	46
5.5. Structuration de la supertâche.....	48
5.6. Effets de transfert après un entraînement en double tâche.....	49
<b>6. Pourquoi l'expertise ne rend pas plus intelligent .....</b>	<b>52</b>
<b>7. Opérationnalisation du renforcement de la permutation dans la mémoire de travail ...</b>	<b>57</b>
<b>8. Discussion .....</b>	<b>58</b>
<b>9. Problématique .....</b>	<b>59</b>
<b>Chapitre 2 : Étude de terrain .....</b>	<b>63</b>
<b>Identification des tâches exigeantes en aéronautique de combat. ....</b>	<b>63</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>63</b>
Objectif de l'étude .....	63
Méthode .....	64
Résultats .....	64
Conclusion et perspective.....	64
<b>1. Introduction.....</b>	<b>65</b>
Escadron de chasse biplace : deux métiers - un équipage .....	66
Les tâches en aéronautique.....	67
Les tâches simultanées sous contrainte temporelle .....	68
<b>2. Participants.....</b>	<b>70</b>
<b>3. Protocole .....</b>	<b>70</b>

4.	Résultats .....	72
5.	Discussion .....	77
<b>Chapitre 3 : Expérience 1.....</b>		<b>80</b>
<b>L'apprentissage d'une répartition visuo-attentionnelle pour gérer les situations multitâches.....</b>		<b>80</b>
	<b>Résumé.....</b>	<b>81</b>
1.	<b>Introduction .....</b>	<b>83</b>
	Objectifs de l'étude.....	86
	Hypothèses .....	87
2.	<b>Participants.....</b>	<b>88</b>
3.	<b>Protocole .....</b>	<b>88</b>
	Apparatus et stimuli .....	88
	Présentation du monde AFT .....	88
	Procédure .....	90
	Mesure de la performance .....	91
4.	<b>Résultats .....</b>	<b>91</b>
	Violation de la règle des deux secondes (voir Fig. 24).....	91
	Temps de fixation (voir Fig. 25) .....	93
	Performance globale (voir Fig. 26) .....	94
	Performances à la tâche HDT (voir Fig. 27) .....	95
	Performances à la tâche HUT (voir Fig. 28) .....	96
5.	<b>Discussion .....</b>	<b>97</b>
<b>Chapitre 4 : Expérience 2.....</b>		<b>101</b>
<b>Augmenter le temps passé à regarder à l'extérieur du cockpit au cours de l'activité multitâche de vol à vue : étude de la méthode de l'affichage d'informations à la demande .....</b>		<b>101</b>
	<b>Résumé.....</b>	<b>102</b>
1.	<b>Introduction .....</b>	<b>103</b>
2.	<b>Méthode .....</b>	<b>105</b>
3.	<b>Participants.....</b>	<b>106</b>
4.	<b>Apparatus .....</b>	<b>106</b>
5.	<b>Procédure .....</b>	<b>107</b>
6.	<b>Résultats.....</b>	<b>107</b>
7.	<b>Discussion .....</b>	<b>109</b>
<b>Chapitre 5 : Expérience 3.....</b>		<b>111</b>
<b>Objectivation de la charge cognitive des équipages : vers la création d'un indicateur de la charge de travail au sein de l'armée de l'air et de l'espace (FAFA TLX) .....</b>		<b>111</b>
	<b>Résumé.....</b>	<b>112</b>
1.	<b>Introduction .....</b>	<b>113</b>
2.	<b>Méthode .....</b>	<b>117</b>
3.	<b>Hypothèses .....</b>	<b>119</b>
4.	<b>Protocole .....</b>	<b>120</b>
	Participants.....	120
	Apparatus et Stimuli .....	120
	Procédure .....	123
5.	<b>Résultats.....</b>	<b>126</b>
6.	<b>Discussion .....</b>	<b>129</b>
<b>Chapitre 6 : Discussion générale .....</b>		<b>132</b>

<b>1. Synthèse .....</b>	<b>133</b>
<b>2. Limites et perspectives .....</b>	<b>135</b>
Situation écologique <i>versus</i> de laboratoire .....	135
L'acquisition d'une dimension temporelle au sein de la structure schématique de réalisation d'une tâche aéronautique .....	136
L'évaluation de la charge cognitive .....	136
La nouveauté comme outil de renforcement cognitif.....	137
Renforcement cognitif : "domaine spécifique" et "domaine général" .....	138
<b>3. Conclusion .....</b>	<b>139</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>141</b>
<b>Table des figures.....</b>	<b>153</b>
<b>Table des tableaux.....</b>	<b>157</b>

# Contexte et principaux résultats

L'aéronautique de combat consiste souvent à voler à plus de 1000 km/h à 70 m de hauteur jusqu'à 17 kilomètres d'altitude, en supportant de nombreux g (facteur de charge positif ou négatif), dans un aéronef faiblement pressurisé nécessitant un apport en oxygène et soumis à des contraintes thermiques, vibratoires, barométriques, etc. L'équipage est assis sur un siège éjectable, à un mètre d'un réacteur dont la température est de 900°, et il y gère une multitude de tâches (communications radio, gestion de systèmes d'armement, gestion de systèmes de navigation etc.) sous fortes contraintes temporelles permanentes (gestion du pétrole, secourir des troupes amies sous le feu ennemi) avec la responsabilité d'enjeux extrêmes, tels que le risque vital pour soi, son équipe, les civils et l'ennemi. Dans ce contexte singulier, les membres d'équipages déclarent ressentir des difficultés, jusqu'à avoir "la tête en feu", lors de la réalisation de certaines tâches notamment lorsqu'elles sont à réaliser simultanément. Ce phénomène de surcharge cognitive est décrit dès le début de la formation mais également chez l'expert en entraînement ou en opération. Alors qu'il est généralement admis que le développement de l'expertise conduit à la disparition du phénomène de surcharge cognitive, pourquoi ce phénomène persiste-t-il, même chez les membres d'équipage qui ont la plus haute qualification délivrée par l'institution ? Au-delà du constat de la persistance de ce phénomène, la question que cherche à traiter le travail présenté ici est la suivante : quels moyens l'Armée de l'air et de l'espace peut-elle mettre en œuvre pour réduire l'impact de la surcharge cognitive chez les membres d'équipage de l'aviation de chasse ?

En situation multitâche, la réalisation de tâches discrètes présentées de manière synchrone repose sur la mise en œuvre de processus cognitifs génériques et spécifiques<sup>[1]</sup>. La répétition d'épisodes multitâches entraîne un renforcement des processus génériques et spécifiques sollicités ayant pour conséquence une amélioration des performances dans ces mêmes tâches, jusqu'à un état final d'expertise. Or, les performances de l'expert sont attribuées à des processus spécifiques au domaine d'expertise (Ericsson, Krampe & Tesch-Römer, 1993). De plus, le renforcement des processus génériques développé, au cours du cheminement vers l'acquisition de l'expertise, semble avoir disparu. Qu'est-il advenu des processus génériques

renforcés ? En d'autres termes, quelle est l'évolution, la dynamique de renforcement des processus spécifiques et génériques au cours de l'acquisition d'expertise ?

Le chapitre 1, intitulé "De la gestion de tâches isolées à la gestion de tâches multiples au cours de l'acquisition d'expertise" présente la manière dont un individu traite une seule tâche. La notion de configuration du système cognitif en vue de réaliser une tâche (*task-set*) (Rogers & Monsell, 1995) y est centrale et présente les différentes étapes depuis la perception d'un stimulus, l'activation des règles de réponse pour la tâche à réaliser jusqu'à la réalisation en elle-même. La répétition d'une tâche conduit au phénomène d'automatisation (Logan, 1988) qui consiste en l'abandon de la réalisation de la tâche par des processus génériques au profit d'une réalisation par des processus spécifiques sous la forme d'un appel à une réponse connue (comme c'est le cas pour les tables de multiplication par exemple). La suite de ce chapitre est consacrée aux effets de la répétition sur des tâches multiples. Dans ce cas, le mécanisme initial générique qui permet de réaliser deux tâches est la fonction exécutive de permutation (Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, Howerter, & Wager, 2000 ; Monsell, 2003). Plus particulièrement, l'étude se consacre à l'objectivation des temps de réaction lors de la réalisation de tâches doubles au moyen du protocole PRP (*Psychological Refractory Period*) très largement utilisé dans ce contexte (Maquestiaux, 2012 ; Pashler, 1994). L'idée est de décrire comment les capacités d'un individu, par nature limitées, permettent la réalisation de deux tâches discrètes présentées simultanément. Ce modèle, décrit sous l'analogie d'un goulet d'étranglement, interdit initialement le traitement central (i.e. la phase entre stimulus et réponse) de deux tâches discrètes. La répétition de l'exposition à deux mêmes tâches discrètes permet peu à peu, d'une part, l'automatisation de chacune des tâches, mais également le renforcement du processus de permutation (Liepelt, Strobach, Frensch & Schubert., 2011) qui est sollicité jusqu'à ce que les individus associent les règles de résolution de chacune des deux tâches en une seule règle sous la forme d'une *supertâche* (Rogers & Monsell, 1995) ou d'un *chunk* (Gobet & Simon, 1996). Ce chapitre fait ensuite le pont avec le cadre théorique de l'expertise acquise et aborde l'évolution de l'articulation des processus spécifiques et génériques au cours de l'acquisition d'expertise. Ainsi, lorsque les tâches sont nouvelles ou juste familières, les processus génériques tels que la permutation sont sollicités, jusqu'à la création de la supertâche finale du domaine d'expertise. Il y a donc une longue transition depuis une réalisation des situations multitâches reposant exclusivement sur des

processus génériques (lorsque les tâches sont toutes inconnues) vers une réalisation reposant exclusivement sur des processus spécifiques (lorsque l'individu est expert du domaine). Entre ces deux états de novice absolu et d'expert absolu, des processus spécifiques et génériques sont employés pour la réalisation de ces situations multitâches. Depuis l'état de novice jusqu'à l'expertise, les processus génériques sollicités seraient renforcés et la création d'une supertâche aurait pour conséquence l'arrêt de la sollicitation du processus générique de permutation et, de fait, l'arrêt de son renforcement jusqu'à son retour à l'état initial.

Ainsi, d'après cette théorisation, nous pouvons déduire que les membres d'équipages n'ont pas encore atteint l'état d'expert au sens cognitif. En effet, leur surcharge montre bien qu'ils n'ont pas suffisamment développé de supertâche et qu'ainsi ils doivent encore solliciter leur habileté de permutation dans certaines situations exigeantes. Ceci est cohérent avec les travaux de Ericsson, Krampe & Tesch-Römer (1993) qui montrent qu'il faut une dizaine d'années d'entraînement intensif et délibéré pour atteindre cet état d'expertise. Or, les membres d'équipage de l'aviation de chasse rentrent à l'armée une fois adulte et mettent environs quatre ans pour être qualifié "opérationnel" et ainsi partir en mission réelle. Quatre ans supplémentaires sont requis pour obtenir la qualification la plus haute (Chef de Patrouille ou Chef Navigateur). Ainsi, les membres d'équipage sont continuellement en cours d'acquisition d'expertise.

Le deuxième chapitre qui présente une étude de terrain, intitulé "Identification des tâches exigeantes en aéronautique de combat", a consisté en une étude préalable et exploratoire dont le but est d'identifier les tâches les plus à même de produire de la surcharge cognitive chez les membres d'équipages de l'aviation de chasse. Cette identification des difficultés a été réalisée sur la base de Nancy auprès de participants qui sont tous des membres d'équipage sur Mirage 2000D, après des missions de vols réels et de vols simulés. Le but recherché en identifiant les tâches les plus à même de produire de la surcharge cognitive est de déterminer les tâches sur lesquelles focaliser les dispositifs de formation à venir. Au sein de ces tâches, certaines sont en lien direct avec la sécurité des vols, c'est-à-dire celles impliquées dans la prise de risque vital. La tâche qui apparaît comme la plus intéressante est celle appelée "regarder dehors". Cette tâche consiste à rechercher à l'extérieur de l'avion tout élément avec lequel il y aurait un risque de collision (sol, autres aéronefs, oiseaux etc.). En effet, cette tâche identifiée comme exigeante dans cette étude est centrale du début de la formation jusqu'aux

missions opérationnelles, donc du novice à l'expert. C'est pourquoi cette tâche sera centrale dans les expériences conduites et présentées ci-après.

Le troisième chapitre intitulé "Apprentissage d'une répartition visuo-attentionnelle pour gérer les situations multitâches" se base sur un article que nous avons publié dans la revue *Human Factors* (en 2018) et il présente une étude en condition de double tâche, combinant une tâche de type "regarder dehors" avec une autre tâche présentant des similarités avec certains aspects de l'activité de pilotage (voir figure 1). Le but de l'étude est de faire acquérir à des novices de l'aéronautique le comportement recommandé au sein du manuel de travail aérien de l'Armée de l'air et de l'espace quant à la répartition du temps à allouer à chacune de ces tâches. Ces recommandations consistent à ne pas passer plus de deux secondes la "tête dans la cabine", c'est-à-dire à ne pas regarder dehors, tout en passant une proportion de temps à regarder dehors d'au moins deux tiers du temps total de la mission. Les participants étaient répartis en trois groupes qui avaient à réaliser une tâche "regarder dehors", dont les stimuli étaient présentés dans la partie supérieure d'un écran d'ordinateur, et une tâche simulant certains aspects de l'activité de pilotage, dont les stimuli étaient présentés dans la partie inférieure du même écran d'ordinateur. Les groupes expérimentaux recevaient une notification visuelle dès lors qu'ils violaient le temps passé à regarder la tâche du bas, c'est-à-dire lorsqu'ils regardaient la tâche de pilotage plus de deux secondes. Un *eye-tracker* servait à mesurer ce temps et il était synchronisé avec le dispositif d'affichage. Au sein des groupes expérimentaux, en cas de violation de la règle "2 secondes maximum à regarder la tâche du bas", un premier groupe recevait des notifications opaques (groupe non permissif ou NPG) qui cachaient complètement la tâche du bas, tandis qu'un deuxième groupe recevait des notifications transparentes (groupe permissif ou PG) indiquant la violation tout en permettant aux participants de continuer la tâche du bas. Un troisième groupe, le groupe contrôle, ne recevait quant à lui aucune notification visuelle mais était familiarisé avec les consignes à respecter. L'expérience commençait par un pré-test sans notification pour chaque groupe, suivi de six séances d'entraînement de deux minutes avec ou sans notification en fonction de son groupe d'appartenance, puis se terminait par un post-test identique au pré-test. Vingt-quatre heures après, un test de rétention a été réalisée, identique au pré et au post-test.

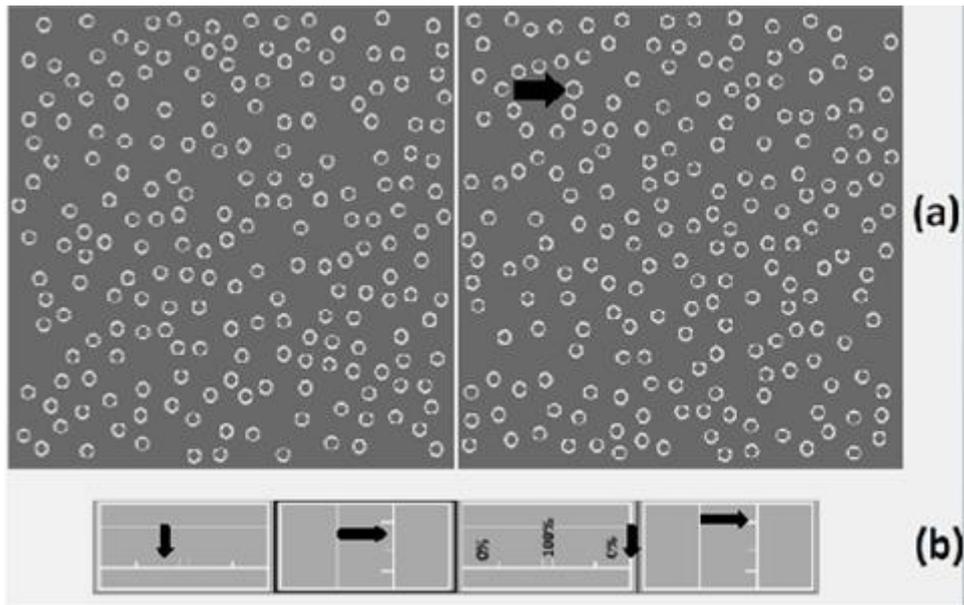


Figure 1. Capture d'écran du dispositif d'affichage de la situation double tâche à réaliser. (a) Le participant doit trouver où est la cible (rond le plus gros). La cible de la tâche tête haute est indiquée ici par une flèche noire. (b) La tâche tête en bas demande de contrôler le mouvement de quatre flèches qui évoluent aléatoirement.

Les résultats montrent (voir figure 2) une amélioration significative du respect de la règle "2 secondes maximum à regarder la tâche du bas" en post-test et en test de rétention (c'est-à-dire le lendemain) uniquement pour le groupe ayant bénéficié de notifications opaques (NPG), c'est-à-dire interdisant la poursuite de la réalisation de la tâche du bas quand l'individu la regarde plus de deux secondes.

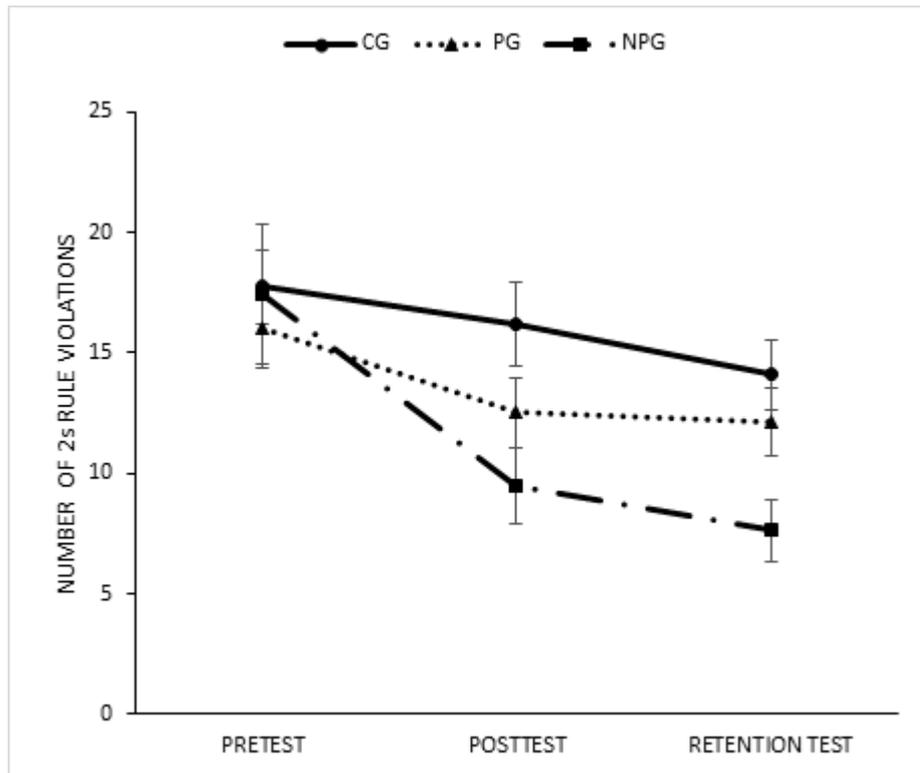


Figure 2. Nombre moyen de violations de la règle “2 secondes maximum à regarder la tâche du bas” pour chaque groupe en fonction des phases. Les barres d'erreur représentent les erreurs standards. CG = groupe contrôle ; NPG = groupe non permissif ; PG = groupe permissif.

Ces résultats montrent qu'un entraînement modeste de douze minutes est de nature suffisante pour faire acquérir au participant une répartition de son temps de regard qui respecte les recommandations du manuel de travail aérien. Ces résultats sont stables 24 heures après l'entraînement. Cette expérience, en imposant un temps maximum de deux secondes pour traiter une des deux tâches, favorise de fait le mécanisme de permutation qui permet de passer d'une tâche à l'autre. La théorie présentée précédemment suggère qu'une exposition répétée à de la permutation entre deux tâches discrètes aboutit à la création d'une supertâche combinant des informations de chacune de ces tâches. Ainsi, le groupe expérimental de la condition opaque (NPG) devrait bénéficier de la construction de la supertâche. Le seul résultat qui soutient cette hypothèse est l'absence de différence de performances entre les groupes lors de la réalisation de la tâche du bas (voir figure 4), alors que le groupe NPG y passe moins de temps puisqu'il passe plus temps à réaliser la tâche du haut (voir figure 3).

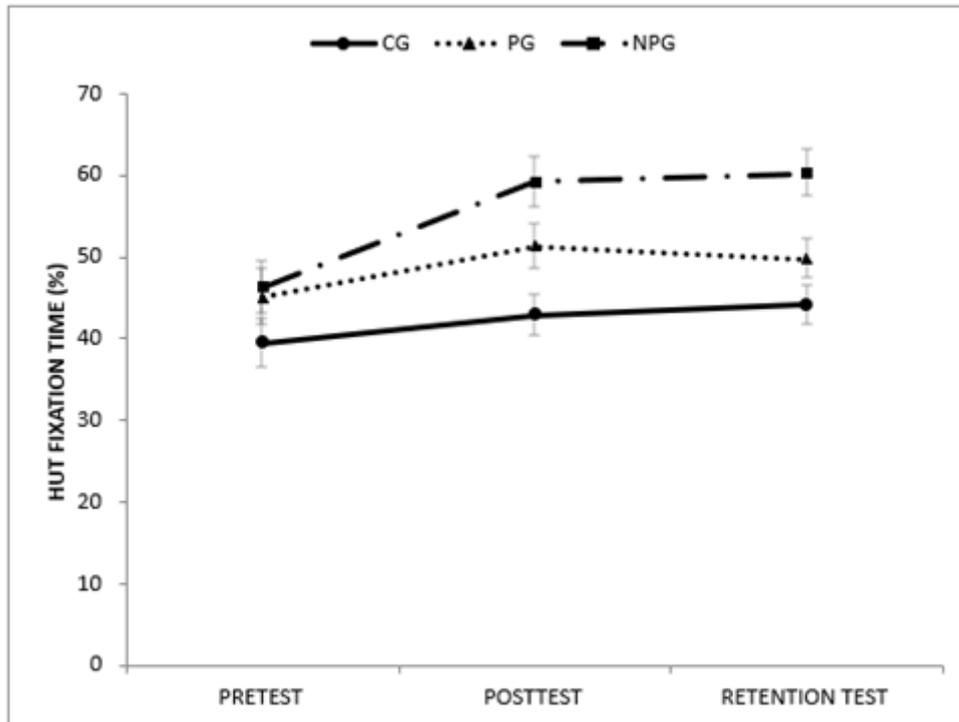


Figure 3. Pourcentage du temps passé à regarder la tâche du haut. Le groupe opaque est le groupe NPG

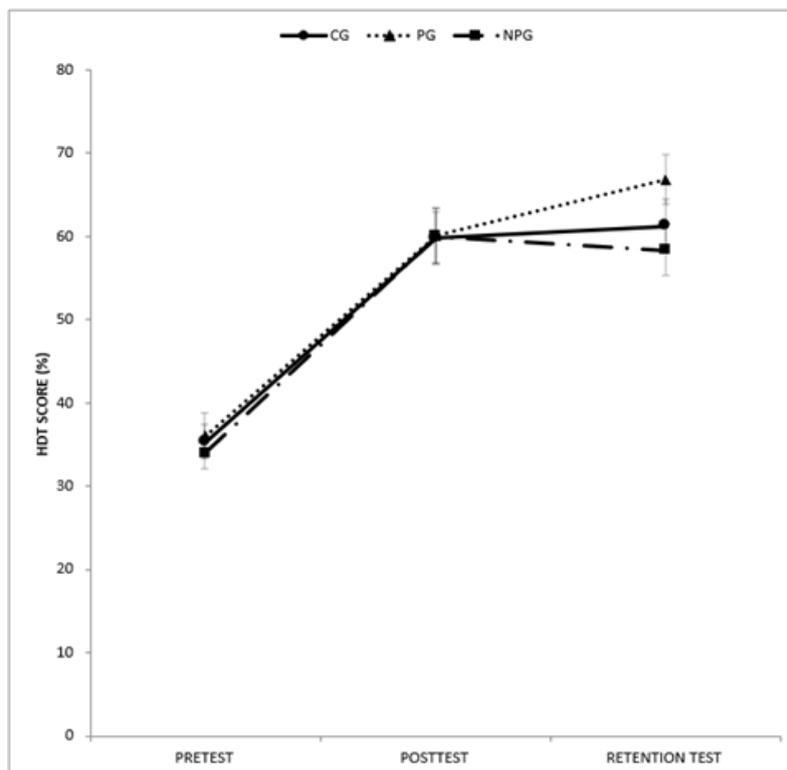


Figure 4. Performance à la réalisation de la tâche du bas. Il n'existe pas de différence significative de performances entre les groupes ni en pré-test, ni en post-test, ni en rétention

Une recommandation issue de cette expérimentation est de développer des simulateurs *low cost* permettant de favoriser la construction d'une supertâche grâce à la permutation répétée

entre deux tâches. Les simulateurs devront être écologiques, se focaliser sur un faible nombre de tâches dont les règles de résolution sont suffisamment simples. En effet, l'automatisation des tâches est d'autant plus difficile à atteindre que le nombre de règles de résolution de ces tâches est important (Schubert & Strobach, 2018). Dans les situations d'apprentissage en vol réel, les apprentis navigants sont confrontés à de nombreuses tâches comprenant de nombreuses règles de résolution de nature à freiner le mécanisme de création de supertâche. La simulation permet de construire des situations d'apprentissage et, particulièrement, de proposer des situations simplifiées favorisant le mécanisme de création de supertâche, et représente ainsi un outil de formation adapté.

Le quatrième chapitre intitulé "Augmenter le temps passé à regarder à l'extérieur du cockpit au cours de l'activité multitâche de vol à vue : étude de la méthode de l'affichage d'informations à la demande", publié dans la revue *Aviation Psychology and Applied Human Factors* (en 2020), poursuit les efforts réalisés dans le papier précédent avec l'idée de les vérifier dans un contexte plus écologique tout en testant une méthode qui permet de supprimer le besoin d'*eye-tracker* du dispositif d'entraînement. En effet, l'utilisation d'*eye-tracker* au cours de la formation en vol (ou en simulateur) présente actuellement trop de contraintes techniques pour être envisageable. Dans l'étude précédente, des notifications visuelles interdisaient au bout d'un certain temps au participant de regarder le *cockpit*. Le participant réalisait ainsi un choix forcé. Dans cette étude, les participants décidaient par eux-mêmes de faire apparaître le cockpit qui sinon restait éteint. Le participant réalisait ainsi un choix délibéré. Des élèves de l'Ecole de l'Air sans aucune expérience de vol devaient apprendre à réaliser des séquences de vol en planeur basiques (e.g., virage, ligne droite). La phase d'entraînement durait une trentaine de minutes durant lesquelles le groupe expérimental avait un *cockpit* éteint (voir Figure 5) mais pouvait demander qu'un des trois instruments (vitesse indiquée, altimètre, cap) soit allumé pendant deux secondes, afin de respecter les consignes du manuel de travail aérien, notamment la règle "passer au moins deux tiers du temps à regarder dehors" dans ce type de vol. Le groupe contrôle avait à sa disposition les trois éléments du *cockpit* allumés (voir Figure 5) en permanence tout en étant familiarisé avec les règles à respecter. Durant une phase de pré-test et de post-test, les participants étaient équipés d'un *eye-tracker* et disposaient des trois instruments du *cockpit*. Le temps passé à regarder les instruments a été significativement réduit dans le groupe expérimental qui faisait

apparaître les instruments à la demande (voir Figure 6), sans modifier les performances lors de la réalisation des tâches de vol, ni modifier la charge de travail ressentie au cours de l’entraînement (la mesure de la charge de travail a été réalisée au moyen de NASA TLX). Cette méthode d’affichage à la demande est exploitable facilement en simulation et pourrait l’être dans les avions modernes qui bénéficient de *glass cockpits*, c’est-à-dire de *cockpits* tout écran. Les résultats de l’expérience précédente sont ainsi reproduits dans une situation plus écologique et avec un dispositif technique plus léger.



Figure 5. Exemple de cockpit, avec informations (à gauche) et sans informations (à droite)

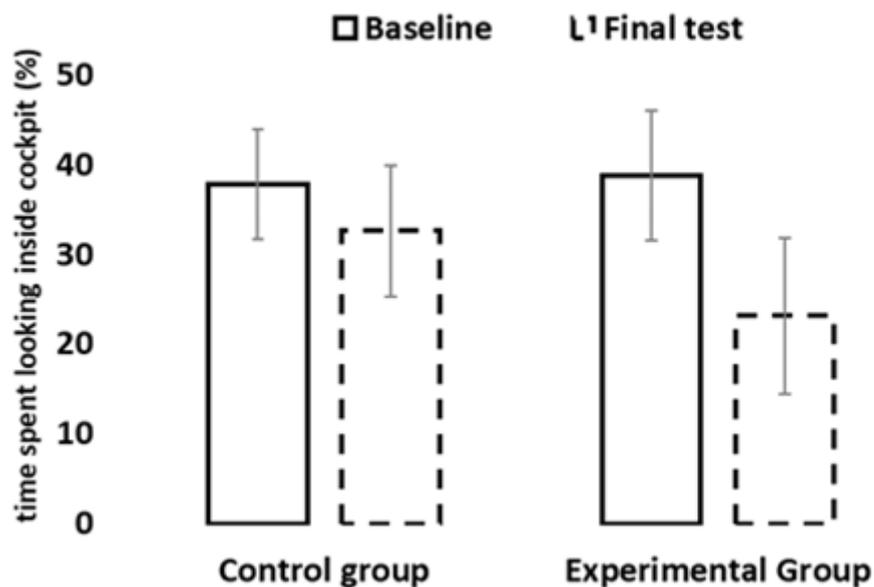


Figure 6. Temps passé à regarder à l’intérieur du poste de pilotage (%) par groupe (contrôle et expérimental) au cours du pré-test et du post-test

Le cinquième chapitre intitulé “Objectivation de la charge cognitive des équipages : vers la création d’un indicateur de la charge de travail au sein de l’armée de l’air et de l’espace (FAFA TLX)” présente l’étude d’une méthode d’objectivation de la charge cognitive associée à la réalisation des tâches en aéronautique. Son ambition est de réussir à objectiver la charge cognitive des tâches réalisées sans outil recueillant des données physiologiques (e.g., eye-

*tracking*, EEG, ECG, EMG, nIRs), dont l'utilisation est délétère à l'activité dans une cabine étroite telle que celle d'un avion de chasse. La méthode déployée repose sur les empan complexes qui s'articulent autour d'une tâche de traitement et d'une tâche de mémorisation (voir figure 7). L'empan complexe est classiquement influencé par deux facteurs de la tâche de traitement : la durée et la charge cognitive qu'elle implique (Barouillet, Bernardin, Camos, 2004 ; Barouillet, Bernardin, Portrat, Vergauwe, Camos, 2007 ; Cowan, 1995, 1999).

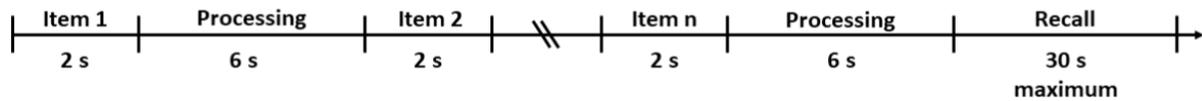


Figure 7. Procédure d'évaluation d'empan complexe. On demande à la personne de mémoriser une liste d'éléments qui sont présentés séquentiellement. Une tâche de traitement est insérée entre les éléments. Après le dernier item, on demande à la personne de rappeler la liste des éléments dans l'ordre de présentation.

Le protocole de l'étude reprend celui de l'évaluation de l'empan complexe en adaptant les items à mémoriser et la tâche de traitement à un contexte aéronautique. Ainsi, la tâche de traitement reproduisait une tâche telle que "regarder dehors" et les items à mémoriser sont des éléments de "navigation" (voir figure 8).

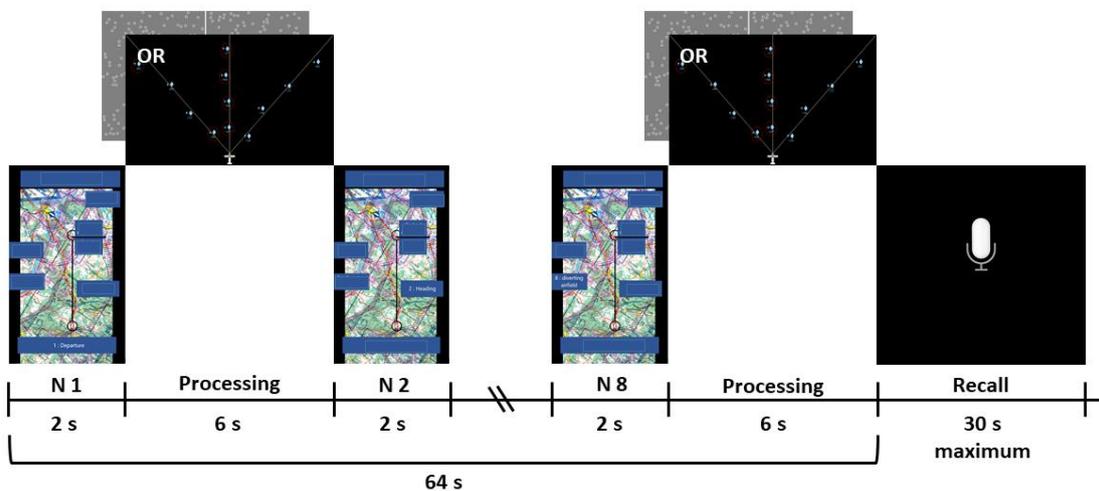


Figure 8. Présentation d'une tâche d'empan complexe réalisée au cours de l'étude. La tâche de mémorisation concerne des éléments de navigations. La tâche de traitement pouvait être soit "regarder dehors", soit "recherche de trajectoire conflictuelle sur écran radar".

Selon les conditions, les participants étaient placés soit en situation de multitâche (comme montré dans la figure 8), soit en situation de tâche simple. Dans la condition tâche simple, les participants réalisaient, selon la temporalité présentée dans la figure 8, soit (1) exclusivement

la tâche de mémorisation des éléments de navigation, soit (2) exclusivement la tâche de traitement (ex : “regarder dehors” ou “recherche de trajectoire conflictuelle sur écran radar”). Pour mesurer l’effet de la réalisation d’une tâche de traitement sur l’empan complexe, une comparaison a été faite entre les situations multitâche et tâche simple (où il n’y a pas de tâche de traitement). Les résultats montrent des empan plus importants en situation simple tâche. Cette diminution de l’empan complexe est le marqueur de la charge cognitive de la tâche de traitement en cours de réalisation. Ce dispositif a donc montré son efficacité en laboratoire avec des tâches simulant partiellement l’activité aérienne. Il reste à s’assurer que cette méthode n’est pas délétère aux tâches aéronautiques (ici les tâches de traitement) avant de la tester au cours d’une activité réelle de vol. Considérant le cadre théorique de la permutation, il est possible de vérifier si la mémorisation des items influence le coût de la réalisation de la tâche de traitement. Rappelons que ce coût est décrit dans la littérature comme se manifestant par un temps de réponse plus long.

Lorsque l’on prend en compte les temps de réponse aux tâches de traitement en situation simple tâche, un résultat tout à fait original en rapport avec la littérature est apparu puisque même dans cette situation un tel coût apparaît. En effet, dans la littérature (Maquestiaux, 2012 ; Maquestiaux, Hartley, Bertsch, 2004 ; Maquestiaux, Lagüe-Beauvais, Behrer & Ruthruff, 2008 ; Maquestiaux, Lagüe-Beauvais, Ruthruff, Hartley & Behrer, 2010 ; Maquestiaux, Ruthruff, Defer & Ibrahime, 2018 ; Monsell, 1996, 2003, 2015 ; Rogers & Monsell, 1995 ; Ruthruff, Hazeltine & Remington, 2006 ; Ruthruff, Johnston & Remington, 2009 ; Ruthruff, Johnston & Van Selst, 2001 ; Ruthruff, Van Selst, Johnston & Remington, 2006), une tâche de traitement répétée successivement présente un coût cognitif plus important seulement lors de sa première réalisation par rapport aux suivantes. Pour les auteurs, ce phénomène est dû à la reconfiguration du *task-set* adapté à la tâche. C’est ce qui est observé dans les résultats de l’étude (voir figure 9).

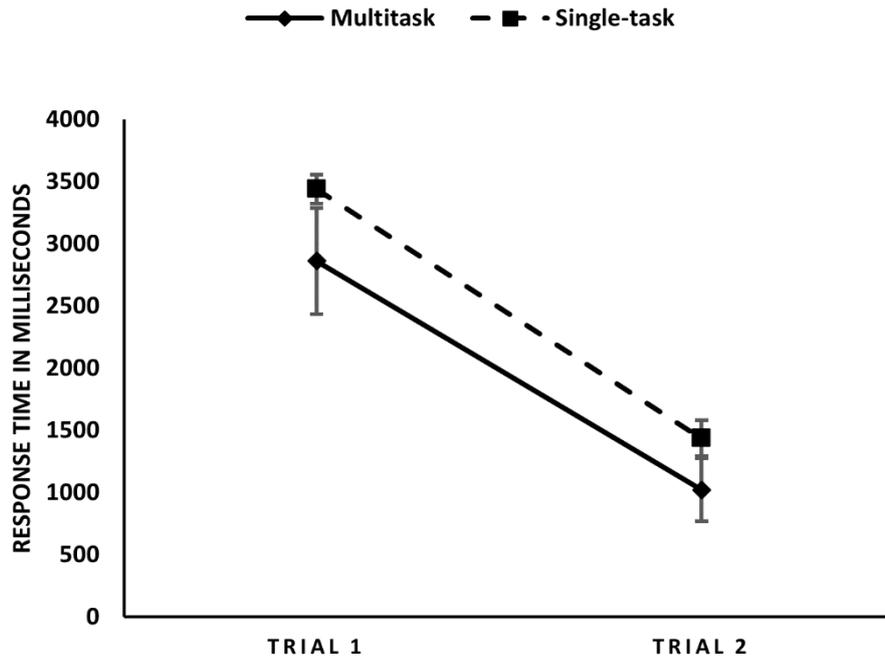


Figure 9. Temps de réponse moyen en situation de permutation (trial 1) et en situation de répétition (trial 2). En situation multitâche, l'individu permute (ce qui implique une reconfiguration du *task-set*) depuis une tâche de navigation de 2 secondes vers la tâche de traitement. En situation simple tâche, l'individu ne permute pas puisqu'il répète les mêmes tâches de traitement avec une absence de stimulus de 2 secondes toutes les 6 secondes.

En effet, le temps de réponse lors du premier "*trial*" est significativement plus long que celui du deuxième "*trial*". Ce qui est surprenant et nouveau par rapport à la littérature est que les participants en simple tâche reproduisent ce pattern de résultats. En effet, ici, en situation simple tâche, les individus répétaient la même tâche de traitement pendant 6 secondes, puis n'avaient pas de stimulus pendant 2 secondes, puis reprenaient la tâche de traitement, et ainsi de suite. En d'autres termes, les participants étaient en situation de répétition, interrompue par une pause de 2 secondes toutes les 6 secondes. Le résultat inattendu est que l'absence de stimulus de 2 secondes suffit à produire un coût comparable à celui provoqué par le changement de tâche comme en situation multitâche. Ce coût est classiquement associé à la reconfiguration du *task-set* lors de la première exposition à une tâche. Les résultats observés ici ouvrent deux cheminements de pensée possibles. Soit tout se passerait comme si une absence de stimulus de 2 secondes suffisait à désactiver le *task-set* de la tâche de traitement, soit le coût observé ne serait pas lié à la reconfiguration du *task-set* comme proposé dans la littérature depuis une trentaine d'années. Dans le 1<sup>er</sup> cas, tout se passerait comme si un mécanisme d'inhibition des règles de résolution d'une tâche s'activait dès l'interruption de la

tâche. Il reste à évaluer précisément le temps à partir duquel cette inhibition est effective. Autrement dit, quel est le temps après lequel il est nécessaire de reconfigurer le *task-set* par la présentation d'un stimulus, c'est-à-dire un acte exogène ? Dans l'étude, les deux situations (simple ou multitâche) nécessitent cet élément exogène pour activer la reconfiguration du *task-set*. Ainsi, la charge cognitive impliquée par la mémorisation d'items n'a pas d'influence particulière sur la configuration du *task-set*. Ce résultat invite à considérer cette méthode comme utilisable en vol réel. De plus, le coût cognitif d'une tâche de traitement peut être évalué *via* l'empan complexe mesuré. Cette méthode est donc prometteuse et compatible avec la sécurité des vols.

A l'issue de ces différents chapitres, une synthèse présentera les principales contributions théoriques et appliquées de l'ensemble des travaux, ainsi que les limites et les perspectives des stratégies abordées de développement de l'expertise dans les situations suffisamment nouvelles.

# Chapitre 1 : Cadre théorique

## Vers une gestion experte des situations multitâches<sup>1</sup>

---

Ce chapitre est une adaptation de l'article : Froger, G. ; Blättler, C. ; Bonnardel, N. (soumis) : Expertise et permutation en situation multitâche : des dynamiques de renforcement croisées. *L'Année Psychologique*.

# 1. Introduction

En situation multitâche, la réalisation de tâches discrètes présentées de manière synchrone repose sur la mise en œuvre de processus cognitifs génériques et spécifiques. La répétition d'épisodes multitâches entraîne un renforcement des processus génériques et spécifiques sollicités ayant pour conséquence une amélioration des performances dans ces mêmes tâches, jusqu'à un état final qui est l'expertise. Or, les performances de l'expert sont attribuées à des processus considérés comme "domaine spécifique" (Ericsson, Krampe & Tesch-Römer, 1993). De plus, le renforcement des processus génériques développé, au cours du cheminement vers l'acquisition de l'expertise, semble avoir disparu. Qu'est-il advenu des processus génériques renforcés ? En d'autres termes, quelle est l'évolution, la dynamique de renforcement des processus spécifiques et génériques au cours de l'acquisition d'expertise ? L'acquisition d'expertise est souvent expliquée par la mise en place de mécanismes d'automatisation, de création de schémas, qui sont des processus centraux dans l'adaptation (et donc la survie) des individus aux situations/tâches qu'ils ont à réaliser. Cependant, la propriété "spécifique" à un domaine de ces mécanismes doit être un frein dans la nature (en dehors du laboratoire) car aucune situation n'est parfaitement identique à une autre. Dans un contexte écologique, la répétition de tâches intégralement similaires, comme réalisées en laboratoire, est en fait impossible. S'il y a toujours une certaine part de nouveauté dans les situations rencontrées, cela devrait avoir pour conséquence de ralentir les processus vertueux d'automatisation et de création de schémas. Il est d'ailleurs constaté que, pour être qualifié d'expert dans une activité réelle, il faut une dizaine d'années de pratique quotidienne. Bien que long et progressif, ce développement de l'expertise se produit. Il y a donc forcément une articulation des processus spécifiques à un domaine, de l'automatisation et de la création de configurations, de schémas, avec des processus génériques qui viennent compenser les limites sus-décrites. Les propriétés d'un mécanisme appelé "permutation" nous invitent à le considérer comme particulièrement prometteur pour lever cet *impedimenta* causé par l'ambiguïté qui sous-tend la notion d'expertise. Cette capacité de permutation est la capacité de passer d'une configuration du système cognitif adaptée à une tâche vers une autre configuration du système cognitif adaptée à une autre tâche. Ce processus est une fonction exécutive (Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, Howerter, & Wager, 2000). Le processus de configuration cognitive spécifique à la tâche à effectuer repose donc sur des fonctions

exécutives qui sont par essence génériques. En effet, les fonctions exécutives sont des processus cognitifs de haut niveau qui contrôlent les processus de niveau inférieur permettant aux individus de réguler leurs pensées et leurs actions lors d'un comportement orienté vers un but (Friedman, Miyake, Altamirano, Corley, Yong, Rhea, & Hewitt, 2016) et, notamment, des processus relevant de la mémoire de travail (tels que le maintien, le traitement et la mise à jour), la capacité à traiter des situations double tâche, la capacité à changer de configuration cognitive pour réaliser des tâches spécifiques.

Après avoir défini la notion de configuration du système cognitif en vue de réaliser une tâche (*task-set*) (Rogers & Monsell, 1995), nous présenterons le mécanisme d'automatisation qui résulte de la répétition intensive de réalisation d'une tâche (Logan, 1988), puis nous développerons ensuite les singularités à l'œuvre lors de la réalisation de plusieurs tâches selon le processus de permutation qui permet de passer d'une configuration cognitive de réalisation d'une tâche à une reconfiguration afin de réaliser une autre tâche (Monsell, 2003). Nous aborderons ensuite les effets résultant de la répétition, de l'entraînement à la réalisation, de deux tâches présentées simultanément (Liepelt, Strobach, Frensch, & Schubert, 2011 ; Maquestiaux, Hartley & Bertsch, 2004 ; Strobach, 2020).

Nous présenterons par la suite des points de vue différents quant au caractère générique du renforcement de l'habileté de permutation après entraînement. En effet, certains auteurs montrent une absence de transfert suite à un entraînement cognitif (Sala & Gobet, 2018) tandis que d'autres montrent cet effet de transfert d'un entraînement vers de nouvelles tâches (Green & Bavelier, 2003 ; Liepelt et al, 2011 ; Strobach, Becker, Schubert, & Kühn, 2015). Ceci pose la question de l'étendue du transfert d'un processus générique suite à un entraînement ayant pour but de renforcer ce même processus. En d'autres termes, le transfert est-il un transfert lointain, c'est-à-dire que cette habileté renforcée le serait dans l'ensemble des domaines où elle peut être sollicitée, dont des domaines discrets de structure dissimilaire (e.g. les mathématiques et le latin), ou bien le transfert est-il proche et ne concernerait que des domaines partageant des structures similaires (e.g. des jeux vidéo et des tâches de laboratoire) (Korbach & Kray, 2009) ?

Enfin, nous proposerons une compréhension des processus cognitifs articulant les résultats présentés dans le souci de lever les apparentes contradictions qui opposent les théories associées.

## 2. La notion de configuration du système cognitif ou *task set*

La notion de set a été développée en psychologie expérimentale, en Allemagne, dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Le contrôle intentionnel et contextuel du set est notamment décrit par von Kries, en 1895, avec l'exemple de l'influence de la clef sur une portée musicale : différentes clefs impliquent en effet que la même note sur la portée corresponde à différentes notes à jouer. Jouer en fonction de la clef, du contexte, la note juste repose bien sur la mise en œuvre d'un contrôle intentionnel.

La configuration du système cognitif est décrite dans la littérature comme *set* ou *task-set* (Allport, 1989 ; Monsell, 1996). Elle caractérise l'intention orientée par un but et implique la mobilisation de différents processus du système cognitif permettant à la fois (i) la mise à disposition des informations et opérations utiles afin d'atteindre ce but et (ii) le maintien de la configuration adéquate du système cognitif permettant d'atteindre ce même but (Bouquet, Bonnin, Gaonac'h, 2013). Cette notion de *set* s'applique dès les tâches les plus simples jusqu'aux tâches les plus complexes.

En effet, Monsell (1996) distingue deux types de tâches auxquelles s'applique cette configuration. Les premières sont les tâches à une seule étape (*single-step task*), pour lesquelles un stimulus particulier correspond une action particulière. Ce sont des tâches fréquemment utilisées au cours des études de laboratoire, telles que répéter un mot, détecter une cible, nommer un objet... La particularité de ces tâches est qu'elles nécessitent un cycle unique des processus configurés au sein du système cognitif pour pouvoir être réalisées. Le second type de tâches désigne celles à plusieurs étapes. Monsell (1996) l'exemplifie avec la tâche "faire une tasse de thé" pour laquelle plusieurs étapes sont nécessaires : localiser le récipient du thé, l'ouvrir, localiser la tasse, prendre un sachet de thé et le mettre dans la tasse, localiser remplir et mettre à bouillir l'eau dans la bouilloire. Certaines de ces étapes doivent respecter un ordre particulier comme mettre l'eau dans la bouilloire puis mettre à bouillir, alors que d'autres étapes peuvent être réalisées avec des ordres variables, que ce soit en séquence ou en parallèle.

Afin de réaliser ces tâches, le *set* comprend la capacité d'activer un ou plusieurs processus, ou modules de traitement d'informations, de les relier entre eux, de les configurer (sélection de l'opération, paramétrage des critères de décision, des critères de réalisation, etc), la

préparation de la réponse et une capacité d'optimisation (Monsell, 1996). La plus simple tâche, par exemple appuyer sur une touche lorsque vous entendez un bruit, nécessite le déploiement d'un *set* (Meiran, 2010 ; Prinz, 1997). Dans le cas des tâches à étapes multiples, le *set* s'enrichit de fonctions additionnelles telles que le choix de l'étape, l'organisation des étapes (réalisables en séquence ou en parallèle). Le *set* mis en place pour résoudre une tâche serait stockable en mémoire sous la forme d'un schéma (*task-set schemata*) et pourrait ainsi être mobilisé lors d'une nouvelle occurrence de cette même tâche (Monsell, 1996). La composition du *set*, reprise par Bouquet et al. (2013), est précisée par Meiran (2010), traduite par nos soins, selon : (a) le but à atteindre ; (b) la sélection des informations pertinentes au moyen de mécanismes attentionnels (incluant les informations pertinentes du stimulus et du feedback) ; (c) l'activation des informations sémantiques pertinentes pour la tâche (e.g. lorsque la tâche exige de classifier des nombres comme pairs ou impairs, les informations numériques idoines doivent être actives) ; (d) l'activation des informations sur les réponses, telles que la préparation motrice de la réponse ; (e) l'activation des règles de réponse (e.g. "si le chiffre est impair appuyez sur la touche gauche") ; (f) l'ordre des actions et leur interdépendance dans les tâches impliquant plusieurs actions. Toutes ces étapes pourraient être décrites comme les paramètres du système cognitif qui changent en fonction de la tâche à réaliser.

Le *set* serait donc à la fois un processus générique, en tant que mis en œuvre pour tous les types de tâche, dès la plus simple (Prinz, 1997), mais également un processus spécifique puisqu'à une tâche particulière correspond un *set* particulier. On peut donc comprendre le mécanisme d'élaboration de *set* comme générique tandis que le *set* en tant que processus à l'œuvre dépend de la tâche et est donc spécifique.

Le *set* serait ainsi une structure schématique comportant des variables, en ce sens il est possible de le renforcer en accessibilité, par la répétition, l'apprentissage, au sein de la mémoire à long terme (MLT). Le *set* présente des similarités avec les modèles développés dans les travaux portant à la fois sur l'acquisition de l'expertise et aussi sur l'expertise acquise. L'identification de structures communes au sein du modèle du *set* et des modèles portant sur l'expertise permet d'enrichir les modèles respectifs, particulièrement sous le prisme de l'acquisition d'habiletés de type domaine général et de connaissances domaine spécifique (chunk, template) (Gobet & Simon, 1996).

Après avoir décrit la tâche et le *set* associé, nous allons présenter les effets de l'entraînement et, plus particulièrement, ceux de la répétition de la réalisation d'une tâche.

### **3. L'influence de la répétition sur les connaissances et les habiletés – l'automatisation**

Au sein de la théorie de l'automatisation par instance, Logan (1988) propose que chaque rencontre avec un stimulus serait encodée, stockée et récupérée séparément. La répétition d'exposition à des épisodes d'une même tâche a pour conséquence une accumulation des traces mnésiques relatives à cette tâche qui permet, lors de la réalisation de cette même tâche, une transition progressive depuis un traitement algorithmique vers un traitement basé sur la mémoire, c'est-à-dire sur la récupération en mémoire à long terme. Les processus de réalisation d'une tâche sont différents si elle est automatisée ou non. Logan décrit le processus de résolution des tâches non-automatisées comme algorithmique. Ce processus algorithmique adapté aux tâches non-automatisées, dont les tâches nouvelles, repose donc sur un processus générique. Un processus de récupération en mémoire, adapté quant à lui aux tâches automatisées, repose sur un processus spécifique. L'automatisation, en tant que conséquence d'une accumulation de traces mnésiques spécifiques à un "épisode répété", à une exposition de multiples fois à une même tâche, est par nature spécifique à cette tâche. Ainsi la pratique améliore les performances sur les stimuli et les "règles du jeu" qui ont été entraînées (Logan, 1988 ; Shiffrin & Dumais, 1981). L'automatisation reflète le développement d'une connaissance, d'une bibliothèque de données, spécifique au domaine entraîné. Les performances aux tâches non automatisées seraient ainsi limitées, selon Logan, plus par un manque de connaissances que par un manque de ressources.

Logan conduit plusieurs expériences afin de vérifier les particularités de l'apprentissage des participants selon deux hypothèses : (a) les participants apprennent une réponse spécifique à un stimulus spécifique, et (b) ce qui est appris se transfère mal avec d'autres stimuli (absence de processus générique).

La première expérience consiste en la réalisation de tâches de décision lexicale. Les participants se voient présenter des séquences de 4 lettres et ils doivent dire le plus rapidement et le plus précisément possible si chaque chaîne de lettres constitue ou non un

mot qui existe. Le groupe expérimental traite 16 blocs constitués de 10 mots et 10 non-mots, où les mots et les non-mots sont identiques dans chaque bloc, tandis qu'au sein du groupe contrôle les mots et les non-mots sont nouveaux au sein de chaque bloc. Un effet de la pratique est constaté pour tous les groupes, c'est-à-dire une diminution du temps de réponse au cours des blocs, à la fois pour les mots et les non-mots. L'effet spécifique de la pratique a été plus fort, c'est-à-dire que le groupe expérimental présente des performances significativement meilleures que le groupe contrôle. Ces résultats sont compatibles avec la notion de *set* (Meiran, 2010 ; Monsell, 1996) décrite précédemment puisque les deux groupes bénéficient d'une répétition de la configuration spécifique du système cognitif pour réaliser la tâche c'est-à-dire le *set* spécifique à la tâche d'identification des mots et des non-mots. Quant à la meilleure performance du groupe expérimental sur le groupe contrôle, Logan l'explique par un renforcement des traces mnésiques des mots et non-mots qui sont identiques au cours des 16 blocs, sous forme de représentations (ou instances), comparativement à des traces mnésiques plus faibles dans le groupe contrôle qui a été exposé à des mots et des non-mots différents. Au cours de deux autres expériences, les participants réalisent à nouveau des tâches de décision lexicale entre des mots et des non-mots. Ces trois expériences montrent un effet significatif de la répétition de l'exposition qui consiste en une diminution significative du temps de réponse et des écarts-types à la fois pour les mots et pour les non-mots. Ces résultats suggèrent que les effets de la répétition sont basés sur la mémoire d'épisodes constitués ici des expositions aux mots et aux non-mots plutôt que dans un module de mémoire sémantique qui ne permettrait l'amélioration de performance qu'au profit des mots. En d'autres termes la performance acquise s'explique par une acquisition en mémoire, c'est-à-dire une connaissance spécifique, renforcée au cours de la répétition sans avoir développé de processus générique.

Une dernière expérience a été conçue pour vérifier la théorie des instances, de l'automatisation, dans un contexte éloigné de celui du champ des tâches de décision lexicale pour laquelle les participants peuvent être familiers ou experts. L'expérience consiste en la réalisation de tâches alphanumériques. Les participants devaient vérifier des équations de la forme  $A + 2 = C$ ,  $B + 3 = E$ ,  $C + 4 = G$ , etc. Pour effectuer cette tâche, les participants devaient compter le nombre de lettres dans l'ordre alphabétique suivant la lettre présentée jusqu'à atteindre le chiffre présenté dans l'addition. La tâche consistait à dire si l'équation présentée était juste ou fautive. Par exemple  $E + 5 = K$  est faux car il faut compter à partir de E

cinq lettres (soit F, G, H, I, J), donc la bonne réponse est J. Les résultats de cette expérience se sont révélés en accord avec ceux des expériences précédentes, en montrant que plus le nombre de répétition des épisodes est élevé, plus le traitement de ces mêmes épisodes est rapide.

Pour Logan (1988), la stratégie de résolution d'une tâche inconnue repose sur une méthode algorithmique (comme compter les lettres dans l'expérience précédente). La répétition de l'exposition à une même tâche renforce les traces mnésiques de la solution au cours de celle-ci, jusqu'à devenir une connaissance récupérable stockée en mémoire à long terme (MLT). Cette connaissance spécifique à la tâche répétée repose sur des représentations/schémas (appelées instances par l'auteur). De plus, la récupération automatique de ces schémas ne sollicite pas la mémoire de travail (MdT) (Logan, 1988). C'est, par exemple, le phénomène expérimenté lors de l'apprentissage des tables de multiplication où initialement compter 3 fois 9 se fait par étapes telles que  $9 + 9 + 9 = 18 + 9 = 27$ , alors qu'après une répétition suffisante la solution 3 fois 9 = 27 est directement accessible en mémoire. L'utilisation d'une information accessible en MLT présente l'avantage d'être plus rapide que la solution arithmétique qui sollicite la MdT.

En fonction de la nature de la tâche, de la variabilité interindividuelle, le nombre de répétitions nécessaire permettant d'obtenir un stockage efficace en MLT est variable. L'automatisation est décrite comme acquise lorsque les individus évitent complètement l'utilisation de l'algorithme de résolution en utilisant la solution adaptée à la tâche stockée en MLT (Logan, 1988). L'automatisation est donc la transition d'une performance basée sur un processus algorithmique vers une performance basée sur un processus de stockage et de récupération en MLT. Sweller (1994) décrit aussi cet aspect progressif de l'automatisation depuis un traitement contrôlé de l'information vers un traitement automatique de la même information. Cette transition repose sur un processus d'apprentissage continu et lent. L'apprentissage permet de créer et stocker en MLT un schéma<sup>2</sup> approprié à une tâche et d'automatiser la récupération de ce schéma, solution adaptée à cette même tâche. Les schémas permettent de traiter un grand nombre d'informations simultanément en associant par un mécanisme de chunking (Gobet & Simon, 1996), plusieurs éléments disjoints en un seul élément.

---

<sup>2</sup> Schéma : selon Sweller (1994), les schémas sont l'unité de base de la connaissance. Des termes alternatifs sont fréquemment utilisés, comme le *chunk* (Miller, 1956) ou le script (Schank & Abelson's, 1977)

Le mécanisme de chunking est obtenu après une exposition répétée à des éléments disjoints. Ainsi, lors de l'apprentissage du jeu d'échecs, le novice réalise plusieurs tâches discrètes telles que déplacer un pion, déplacer un cavalier, une tour... jusqu'à ce que, après avoir été suffisamment exposé à des épisodes de jeu, de parties, les règles de déplacement de chacune des pièces, qui sont autant de tâches avec leurs propres sets, soient stockées dans un schéma spécifique aux règles du jeu d'échecs, dans un set plus vaste. En d'autres termes, le déplacement de chacune des pièces ne représenterait plus un ensemble de tâches discrètes, mais deviendrait une seule tâche "jouer aux échecs" (il en est de même avec de nombreuses activités de la vie quotidienne comme la conduite automobile par exemple). Poursuivre l'exposition à des épisodes de jeu conduit à développer de nouveaux schémas, plus complexes en tant qu'articulation des précédents, structurés d'un noyau où seraient encodées des informations stables et de cases permettant d'encoder des informations variables (Gobet & Simon, 1996). Ces structures schématiques créées par l'exposition répétée dans un domaine spécifique comprenant des informations stables (comme les règles du jeu d'échecs par exemple) et des informations variables (possibilités de mouvement des pièces mais aussi évaluation des plans d'action) sont définies comme des templates (Gobet & Simon, 1996). L'expertise se définit notamment par des connaissances spécifiques reposant sur ces structures de templates (Gobet & Simon, 1996). Classiquement, ces structures sont étudiées sous l'angle perceptif. Un épisode étant constitué pour partie de perceptif, il est théoriquement envisageable de créer des structures schématiques de type template, après une exposition répétée à des épisodes, pour n'importe quel type de tâche comprenant des informations stables (règles de réponse ; i.e. de nature spécifiques) et des informations variables (incertitude du stimulus). En ce sens la notion de template partage des caractéristiques communes avec la notion de set.

Pris ensemble ces résultats montrent que l'exposition répétée à des tâches comprenant de multiples étapes (Monsell, 1996) conduit d'une part à développer l'automatisation spécifique à chacune des étapes (Logan, 1988) et d'autre part à développer une structure de type template combinant des caractéristiques spécifiques et génériques.

L'exposition répétée à des situations de tâches doubles permet d'une part l'automatisation de chacune des tâches mais également la création de templates spécifiques aux tâches entraînées ensemble qui permettent d'activer simultanément des traces mnésiques de chacune des tâches dès l'exposition à l'une d'elle. En d'autres termes, l'automatisation en tant

que résultat d'une exposition répétée aux épisodes (Logan, 1988) deviendrait tout à la fois une automatisation de la tâche effectuée lorsqu'elle est effectuée isolément, mais également une automatisation des tâches effectuées ensemble en permettant non plus l'activation du set de la tâche A puis de la tâche B, mais bien le set de la tâche "A et B" auxquels les participants ont été exposés dans de multiples épisodes. En effet, la théorie du set propose qu'un entraînement en condition double tâche permettrait une intégration efficace des deux tâches entraînées en les combinant ensemble jusqu'à ce qu'elles deviennent une seule super tâche (e.g. Hazeltine, Aparicio, Weinstein, & Ivry 2007 ; Hazeltine, Teague & Ivry, 2002 ; Oberauer & Kliegl, 2004 ; Rogers and Monsell, 1995 ; Ruthruff, van Selst, Johnston, & Remington, 2006). Ainsi, les templates (relevant du cadre théorique de l'expertise acquise) apparaît comme étant des supertâche (relevant du cadre théorique du set). En effet les deux notions sont caractérisées par un but à atteindre (par exemple gagner une partie d'échec / se faire un thé) articulé autour de règles de résolution fixes (par exemple les règles de déplacement des pions au jeu d'échec / les règles physiques à respecter lorsque l'on fait du thé : i.e. faire bouillir l'eau avant d'y plonger le sachet) et de variables (par exemple des enchaînements de mouvements possibles / une fois l'eau en train de bouillir la possibilité de prendre en premier la tasse, le sachet de thé, le sucre ou la cuiller). Ainsi l'expertise doit reposer sur des mécanismes étudiés dans le champ théorique du set. Or le set présente des caractéristiques spécifiques et génériques qui devraient donc être présentes dans l'acquisition de l'expertise.

Le processus qui conduit à l'automatisation peut donc se comprendre comme la transition depuis la mise en œuvre d'un set générique (algorithmique) vers la mise en œuvre d'un set spécifique (adapté à la tâche suffisamment répétée et disponible en MLT). Cependant, comment le système cognitif appréhende les situations multitâches quand il ne n'a pas (encore) de connaissances spécifiques ?

Le mécanisme de permutation d'une tâche vers l'autre offre un cadre théorique adapté pour étudier cette question.

## 4. La permutation : une habileté générique au cœur de toute situation de tâches multiples

Le mécanisme de permutation d'une tâche à l'autre constitue un processus du système cognitif. Ce mécanisme est décrit comme une fonction exécutive (Miyake et al., 2000 ; Miyake and Friedman, 2012) et a été étudié dès la première moitié du 20ème siècle (Jersild, 1927). L'exploration en laboratoire de ce phénomène consiste à examiner le coût de la permutation d'une tâche A vers une tâche B (Bouquet et al, 2013). Mesurer ce coût revient à mesurer le coût du changement de configuration du task set. Classiquement, ce coût est mesuré en comparant le temps de réaction (TR) et le taux d'erreur (TE) lorsque les participants changent de tâche à ceux lorsqu'ils répètent la même tâche. Il s'agit donc de comparer les TR et TE de la tâche A après avoir réalisé la tâche A (répétition AA) avec les TR et TE de la tâche A après avoir réalisé la tâche B (permutation BA). Classiquement, les performances chutent dans le cas de la permutation comparativement au cas de la répétition, c'est pourquoi la notion de coût de permutation est née (ou switch cost).

Dans la version princeps du paradigme de permutation de tâche, Jersild disposait des listes de nombres à deux chiffres auxquels les participant additionnaient ou soustrayaient un même chiffre. Dans une condition, l'opération était toujours la même (par exemple additionner trois à l'ensemble des nombres de la liste) et dans une autre condition il fallait alterner addition et soustraction lors de chaque changement de nombre dans la liste. Les réponses étaient formulées à haute voix. Le temps de réponse observé dans la condition alternance (permutation) a été plus important que celui observé dans la condition répétition. En 1976, Biederman et Spector ont répliqué le paradigme de Jersild et ont trouvé des résultats similaires (Spector & Biederman, 1976). Depuis, de nombreuses expériences ont permis d'affiner l'observation du phénomène de coût de la permutation (Allport, Styles, & Hsieh, 1994 ; Rogers & Monsell, 1995 ; pour des revues voir Bouquet et al., 2013 ; Monsell, 2003, 2015) au moyen de mesures de performance (TR et TE) mais également d'autres mesures telles que l'activité cérébrale (e.g. Ruge, Jamadar, Zimmerman, & Karayanidis, 2013) ou l'oculométrie (Longman, Lavric & Monsell, 2013, 2016) enregistrées au cours de changement de tâches et au cours de répétition de tâches.

Une des premières expériences ayant permis d'affiner la compréhension du phénomène de coût de la permutation est l'expérience "*shifting task set*" (Allport et al., 1994). Au cours de

cette expérience, les stimuli présentés aux participants sont des groupes de 1 à 9 chiffres identiques disposés symétriquement à l'intérieur d'un rectangle (e.g. voir figure 10 : quatre chiffres "3" situés en haut à gauche, en bas à gauche, en bas à droite puis en haut à droite du rectangle).

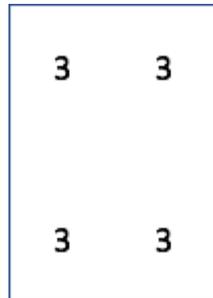


Figure 10. Exemple de stimulus présenté au cours d'un essai de l'expérience 1. Dans cet exemple  $V = 3$  donc impair et inférieur à 5 ;  $G = 4$  donc pair et inférieur à 5. La condition à laquelle doit répondre le participant est présentée avant l'essai. Par exemple "G inférieur/supérieur" auquel il faut répondre dans ce cas inférieur puisque le nombre de caractères (4) est inférieur à 5.

Deux types de dimensions étaient manipulées : la taille du groupe ( $G$ ), c'est-à-dire le nombre d'entiers identiques à l'intérieur du rectangle (e.g.  $G = 4$  sur la figure 10) et la valeur ( $V$ ) des entiers identiques (e.g.  $V = "3"$  sur la figure 10).  $G$  et  $V$  variaient entre un et neuf à l'exclusion de cinq et étaient toujours différents entre les deux dimensions. Deux types de jugement numérique pouvaient être demandés soit sur  $V$  soit sur  $G$  : (1) soit le chiffre était pair ou impair et (2) soit le chiffre était supérieur ou inférieur à cinq. La répétition consiste en l'utilisation du même jugement numérique sur la même dimension pour deux essais consécutifs. La permutation quant à elle est définie comme un changement de jugement numérique et/ou de dimension pour deux essais consécutifs. Il y avait donc quatre situations possibles de répétition ( $V$  pair/impair ;  $V$  supérieur/inférieur à cinq ;  $G$  pair/impair ;  $G$  supérieur/inférieur à cinq) et six situations possibles de permutation de règle : deux pour la situation dimension constante avec permutation de jugement numérique ( $V$  pair/impair vers  $V$  supérieur/inférieur à cinq ;  $G$  pair/impair vers  $G$  supérieur/inférieur à cinq) ; deux pour la situation jugement numérique constant avec permutation de dimension ( $V$  pair/impair vers  $G$  pair/impair ;  $V$  supérieur/inférieur à cinq vers  $G$  supérieur/inférieur à cinq) et enfin deux pour les alternances de jugement numérique et de dimension ( $V$  pair/impair vers  $G$  supérieur/inférieur à cinq ;  $V$  supérieur/inférieur à cinq vers  $G$  pair/impair). Les résultats montrent un ralentissement du

temps de réponse significatif en situation de permutation comparativement à la situation de répétition. Une série d'expérimentations appuie ces premiers résultats.

Rogers et Monsell (1995) apportent un contrôle supplémentaire de l'automatisation des tâches par rapport aux travaux réalisés par Allport et al. (1994). Ces auteurs s'assurent que les participants restent dans le cas où ils traitent bien deux tâches et non pas une seule supertâche. En limitant le développement de processus spécifique dans la réalisation d'une tâche, les auteurs se concentrent sur l'étude des processus génériques à l'œuvre lors de la réalisation de ces tâches.

Au cours de différentes expériences de reconfiguration du *task-set*, Rogers & Monsell (1995) ont développé un nouveau paradigme de permutation, celui d'alternance constante, afin de développer une nouvelle méthode de mesure du coût de la permutation. A la différence du paradigme développé par Jersild (1927) et repris par Alport et al. (1994) qui compare des performances entre des blocs de tâches alternées (i.e. ABABA...) et des blocs de tâches simples (i.e. AAAA... ou BBBB...), Rogers et Monsell développent des blocs de type AABBAABB... Ce paradigme permet d'affiner considérablement les mesures, non plus en comparant des différences globales entre blocs, mais en comparant la performance à la tâche A lorsqu'elle suit la réalisation de la tâche A à la performance à la tâche A lorsqu'elle suit la réalisation de la tâche B. Il en est de même pour la tâche B. En d'autres termes, ce paradigme permet de comparer la performance après une permutation (i.e. AB, BA) à la performance après une répétition (i.e. AA, BB). Les mesures retenues pour comparer les performances demeurent le temps de réaction (TR) et le taux d'erreur (TE).

Les tâches auxquelles sont soumis les participants consistaient à classer un chiffre comme pair ou impair et une lettre comme consonne ou voyelle. Chaque stimulus était constitué d'une paire de caractères présentés côte à côte (voir figure 11). Dans la tâche "lettre", un et seulement un caractère était une lettre (sur les deux caractères présentés) ; le participant devait appuyer sur une touche si la lettre était une consonne et sur une autre touche si la lettre était une voyelle. Dans la tâche "chiffre", un et seulement un caractère était un chiffre (sur les deux caractères présentés) ; le participant devait appuyer sur une touche si le chiffre était pair et sur une autre touche si le chiffre était impair (voir figure 11). Ces tâches pouvaient être présentées en condition sans interférence, c'est-à-dire que le caractère non pertinent de la tâche à réaliser était tiré d'un troisième ensemble de caractères, cette fois-ci non alphanumérique (e.g. #) et appelé l'ensemble "neutre". Puisque ces caractères n'étaient

associés à aucune règle de réponse dans aucune des tâches, chaque couple de caractères de chaque stimulus ne permettait de réponse qu'avec la tâche appropriée (lettre ou chiffre). Dans la condition avec interférence les stimuli étaient constitués d'une lettre et d'un chiffre. La comparaison de la performance aux essais où il y a un caractère neutre, c'est-à-dire dans la condition sans interférence, et de la performance aux essais où les caractères sont une lettre et un chiffre (i.e. la condition interférente) permet d'évaluer dans quelle mesure la présence d'un caractère non pertinent rend cette tâche plus difficile à réaliser. En d'autres termes, dans quelle mesure la présence d'une tâche dont les règles de réponses sont connues et qui n'est pas à réaliser interfère avec la tâche à réaliser.

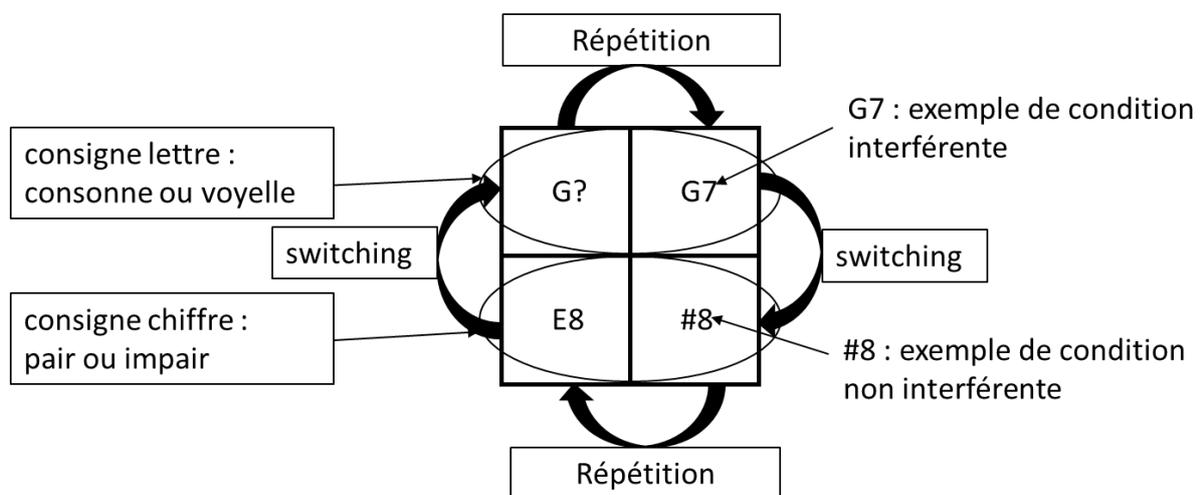


Figure 11. Présentation des conditions en fonction du type d'essai de l'expérience de Rogers & Monsell (1995). Soit l'essai est interférent lorsqu'il est constitué d'une lettre et d'un chiffre, soit il est non interférent lorsqu'un caractère neutre (i.e. non lettre et non chiffre) est présent. Le passage d'un essai à l'autre constitue une répétition lorsqu'il est réalisé horizontalement et un switching lorsqu'il est réalisé verticalement.

La première expérience avait pour but de comparer le coût prévisible de la permutation de tâche, en condition interférente ou non interférente. Les participants voyaient un carré découpé en quatre carrés (voir figure 2 ci-dessus). Au cours de chaque essai, un couple de caractères apparaissait dans un sous-carré. Lorsqu'une réponse était donnée, ou après une absence de réponse de 5000 ms, un autre couple de caractères apparaissait dans le sous-carré adjacent, dans le sens des aiguilles d'une montre. Lorsque les stimuli étaient dans les sous-carrés du haut, les participants répondaient à la tâche lettre ; lorsque les stimuli étaient dans les sous-carrés du bas, les participants répondaient à la tâche chiffre. Les présentations successives des stimuli se déroulant dans le sens des aiguilles d'une montre, chaque bloc proposait une succession de tâches de type AABBAABB... Les résultats corroborent ceux de Allport et al (1994) en montrant un coût classique de la permutation, significativement

supérieur à la répétition (i.e. AB vs AA). De plus, en situation d'interférence, il y a un coût significativement plus élevé de la condition interférente comparativement à la condition non interférente.

Suite à cette réplication, les auteurs ont voulu mettre à l'épreuve les trois hypothèses suivantes. La première hypothèse, concerne l'éventuelle inertie du *task set* (*task set inertia*), et propose que le coût de la permutation de tâche serait dû à l'activation persistante (et/ou son inhibition) du *task-set* de la tâche réalisée précédemment, qui ne peut pas être complètement supprimé malgré la préparation à la réalisation de la tâche qui suit (Allport et al., 1994 ; Yeung & Monsell, 2003). La durée de cette persistance du *task-set* est estimée à environ 1 minute (Allport et al., 1994). La deuxième hypothèse est celle de la micro-pratique qui suppose que la répétition consécutive de la même tâche permet d'améliorer ses performances d'essai en essai (Duncan, 1977). En d'autres termes, au cours d'une micro-série de type AAAA, les participants progresseraient à chaque répétition et devraient présenter la meilleure performance au quatrième A, comparativement au troisième et au troisième comparativement au deuxième. La dernière hypothèse est celle de l'achèvement de la tâche basée sur la perception du stimulus (*stimulus-cued completion*). Cette hypothèse propose, en situation de permutation, qu'un acte endogène (attente de la tâche suivante) déployé avant la présentation du stimulus de la tâche suivante réalise une partie du processus de reconfiguration de *task-set* liée à cette prochaine tâche. L'achèvement de cette reconfiguration de *task-set* serait alors initié par la présentation du stimulus de la tâche à réaliser (acte exogène).

La dernière expérience de Rogers et Monsell (1995) s'assure d'un intervalle réponse - stimulus (i.e. intervalle de temps séparant la réponse à un essai de la présentation du stimulus de l'essai suivant) suffisamment long pour que chaque coût de permutation puisse refléter clairement la composante persistante de ce coût de permutation, i.e. l'activation persistante (et/ou son inhibition) du *task-set* de la tâche réalisée précédemment. Les participants devaient répondre aux mêmes tâches (lettre et chiffre) que dans le protocole expérimental précédent. Cette fois-ci les tâches apparaissaient dans un cercle découpé en 8, un peu comme des parts de pizza, dans le sens horaire, et des indices étaient fournis aux participants pour déterminer à quelle tâche (lettre ou chiffre) ils devaient répondre. Le cercle était séparé en deux parties égales et la séparation se matérialisait par un trait épais. Dans une moitié du cercle les participants réalisaient la tâche lettre et dans l'autre moitié la tâche chiffre. Les participants réalisaient

donc les tâches selon l'enchaînement AAAABBBBAAAA etc. L'hypothèse de l'activation persistante du *task set* de la tâche réalisée lors de l'essai précédent doit se matérialiser par un temps plus long de réalisation de la séquence de tâches B, tant que le *task set* de A reste activé. Les résultats montrent qu'un TR plus élevé attribuable à l'activation persistante du *task set* de la tâche précédente n'est observé que sur le premier essai de la séquence. Ainsi, la persistance du *task set* de la tâche précédente ne dure pas 1 minute comme suggéré par Alport (1994). Tout se passerait comme si la réalisation d'un essai d'une tâche suffisait à désactiver le *task set* de la tâche précédente. Ce même résultat permet d'invalider l'hypothèse de la micro-pratique qui prédisait un TR de plus en plus réduit au fur et à mesure des essais d'une même séquence. En effet, du deuxième au dernier essai au sein d'une même séquence (i.e. AAAA), le TR ne varie plus. Enfin, alors que les participants s'attendent à un changement de tâche (d'autant plus matérialisé par le trait vertical gras), ils subissent néanmoins un coût de permutation lors du premier essai. C'est pourquoi les auteurs privilégient la nécessité d'un acte exogène (présentation du stimulus de la tâche à réaliser) pour finaliser la reconfiguration du *task set*.

Ici les participants n'ont pas automatisé les tâches. Aussi, leur pratique au cours de l'expérience permet de les considérer comme des novices. Dans les situations naturelles plus complexes que les tâches de laboratoire, le novice réalise des tâches séquentiellement (puisqu'il n'a pas encore de *chunk* ou de super-tâche) et subit un coût de reconfiguration du *task set* dès qu'il doit changer de tâche.

Pour résumer, les premières rencontres de toute situation multitâche mettent en œuvre le mécanisme de permutation qui de fait est un mécanisme générique. Autrement dit, le développement de l'expertise en situation multitâche commence nécessairement par la mise en œuvre de ce processus.

Après avoir appréhendé ce mécanisme de permutation, il convient de l'aborder dans les situations de double tâche et d'identifier son évolution éventuelle à l'automatisation. En d'autres termes, comment ce mécanisme adapté à tout type de tâche et donc par essence générique, évolue-t-il après une répétition extensive ?

## 5. Les avantages de l'entraînement en condition de double tâche

La réalisation de tâches présentées simultanément est difficile pour l'être humain. Une expérience communément partagée est celle de la conduite sur une route sinueuse, difficilement compatible avec l'écoute attentive d'une émission radiophonique. Ainsi, certaines activités dynamiques soumettent régulièrement le système cognitif au besoin de réaliser des tâches présentées de manière synchrone. Les mécanismes d'automatisation et de capacité de permutation, que nous venons de décrire, sont particulièrement impliqués pour permettre au système cognitif de s'adapter à ces situations et donc de diminuer cette sensation de difficulté.

Par ailleurs, Maquestiaux (2012) rappelle que cette question trouve une naissance scientifique sous la plume de Frédéric Paulhan dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Paulhan décrivait dans la *Revue scientifique*, au sein d'un article intitulé "la simultanéité des actes psychiques" (Paulhan, 1887), comment il expérimente ce phénomène, en faisant des multiplications tout en récitant de la poésie par exemple avant de conceptualiser cette simultanéité des actes psychiques comme une règle ne souffrant tout au plus que de rares exceptions. Si l'analyse de Paulhan est aujourd'hui dépassée, la problématique qu'il soulevât est toujours d'actualité. C'est en laboratoire qu'elle est abordée au moyen d'un protocole permettant d'une part la réalisation au cours d'un même essai de deux tâches discrètes mais également la manipulation de la distance temporelle inter stimuli (Telford, 1931). Le protocole développé prend le nom de Période Réfractaire Psychologique (PRP), en référence à la phase d'inexcitabilité ou phase réfractaire mise en évidence par le physiologiste Etienne-Jules Marey chez l'animal (Marey, 1876).

L'avantage d'un entraînement en condition de double tâche a été montré dans de nombreuses études : avec une combinaison de tâches simples, par exemple des tâches où les stimuli sont associés à 3 réponses possibles (e.g. Liepelt et al., 2011 ; Strobach, Frensch, Soutschek, & Schubert, 2012), mais également dans une grande variété de tâches telles que deux tâches de mise à jour de la mémoire de travail (e.g. Oberauer & Kliegel, 2004), dans deux tâches de mémoire à long terme (e.g. Strobach, Schubert, Pashler, & Rickard, 2014), une tâche continue et une tâche sensori-motrice (e.g. Bender, Filmer, Naughtin, & Dux, 2017) ou une tâche motrice et une tâche cognitive (e.g. Sisupadol, Siu, Shumway-Cook, & Woolacott, 2006).

## 5.1. Le protocole PRP

Le protocole PRP consiste en l'exposition à une situation de double tâche, c'est-à-dire consistant à faire réaliser deux tâches discrètes au cours d'un même essai. La figure 12 schématise ce type d'essai de double tâche. L'étude en laboratoire de tâches relativement simples, c'est-à-dire dont les règles de réponses à des stimuli comportent peu de possibilités et dont le temps de réponse prend généralement moins d'une seconde, permet de tester plus précisément les hypothèses sur les causes éventuelles d'interférence entre les tâches, en tous cas plus finement que ce ne serait possible avec des tâches plus complexes et nécessitant plus de temps de réalisation (Pashler, 1994). Ainsi, chaque tâche consiste en l'apparition d'un stimulus S explicite (e.g. une forme ou un son), associé à une règle de réponse R vocale ou motrice. Le temps de réponse, c'est-à-dire le temps entre le début de la présentation d'un stimulus et le début de la réponse, est analysé pour chacune des tâches. Chaque tâche peut se décomposer en trois stades : dans un premier temps la perception ou stade amont ou précentral, le deuxième temps est celui du traitement ou stade central (e.g. le choix de la réponse en fonction des règles de réponses), et le dernier stade est celui de la génération de la réponse ou stade post-central ou stade aval. Les stades pré et post-centraux sont aussi appelés stades périphériques (Maquestiaux, 2012).

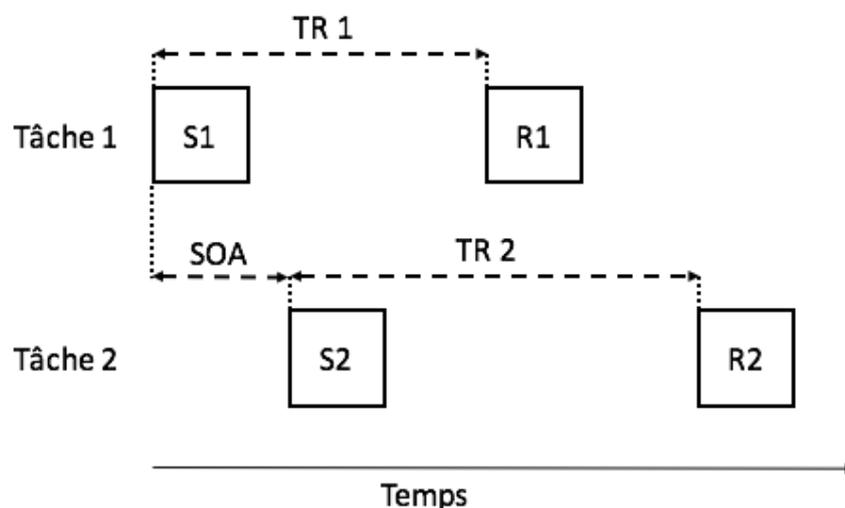


Figure 12. Schéma du protocole PRP consistant en la réalisation de deux tâches discrètes au cours d'un même essai. Pour chaque tâche est présenté un stimulus S appelant une réponse R. La durée séparant la présentation de deux stimuli, appelée SOA (*Stimulus Onset Asynchrony*), est manipulée par l'expérimentateur. Les variables dépendantes de ce protocole sont le temps de réaction TR et le taux d'erreur TE.

Afin de pouvoir étudier précisément les stades éventuels d'interférence au cours de la réalisation des essais, certaines prescriptions expérimentales méritent d'être respectées. Il s'agit en particulier de réduire, voire d'éliminer, au mieux toute autre source d'interférence potentielle.

Cette réduction des interférences potentielles, au niveau des stages périphériques, s'articule sur des modalités et des codages différents de stimulus (e.g. auditive et visuelle, spatial et verbal) et de réponse (e.g. vocale et motrice), selon le principe que deux tâches partageant les mêmes processus cognitifs de perception et de réponse sont plus de nature à interférer que deux tâches qui ne les partagent pas (Brooks, 1968 ; Meyer & Kieras, 1997 ; Wickens, 1984). Par exemple, il semble plus probable qu'écouter deux consignes verbales simultanément soit de nature plus interférente qu'écouter une consigne verbale et de reconnaître une forme géométrique.

D'autre part, la manipulation des intervalles inter-stimuli au cours de différents essais, c'est-à-dire la manipulation du SOA entre la tâche 1 et la tâche 2, permet de constater la présence de l'effet PRP. Plus le SOA est court, plus les interférences de traitement central de réalisation de chaque tâche devraient être importantes. Inversement, plus le SOA est long, plus l'interférence devrait être faible. La comparaison des performances aux tâches en fonction des SOA permet de mesurer le coût de la proximité temporelle dans la réalisation de tâches discrètes. Par exemple, dans le cas de tâches T1 et T2 auditives, Telford (1931) a mesuré la performance à la double tâche au cours de 100 essais et selon quatre durées séparant les stimuli sonores (500, 1000, 2000 et 4000ms) et il a observé les performances les plus faibles dans la condition de SOA 500ms. Les études postérieures ont montré des résultats comparables avec des tâches visuo-motrices (Vince, 1948), puis dans une grande variété de couple de tâches, caractérisés par diverses modalités de stimuli (e.g. visuels, auditifs) (Wickens, 2004) et de réponse (verbale, motrice) (Hazeltine, Ruthruff & Remington, 2006 ; Maquestiaux, 2012).

Enfin, une consigne sur le traitement prioritaire de la tâche 1, par exemple "répondez le plus rapidement et le plus précisément possible aux deux tâches, en répondant d'abord à la tâche 1", permet de "forcer" l'interférence au niveau de la tâche 2 (Maquestiaux, Lagüe-Beauvais, Ruthruff, Hartley, & Bherer, 2010).

Plusieurs centaines d'expériences ont respecté ces prescriptions pour montrer la robustesse de la présence de l'effet PRP, qui se matérialise sous la forme d'un TR à la tâche 2 (TR2) plus

long en condition SOA court qu'en condition SOA long, comme cela est représenté sur la figure 13. La robustesse de l'effet est indépendante des modalités sensorielles des stimuli et des réponses et a été également constatée après un entraînement intensif de plusieurs milliers de répétitions sur une tâche auditivo-vocale (tâche 1 : stimulus sonore, réponse vocale) et une tâche visuo-motrice (tâche 2 : stimulus visuel, réponse motrice) (Van Selst, Ruthruff, & Johnston, 1999).

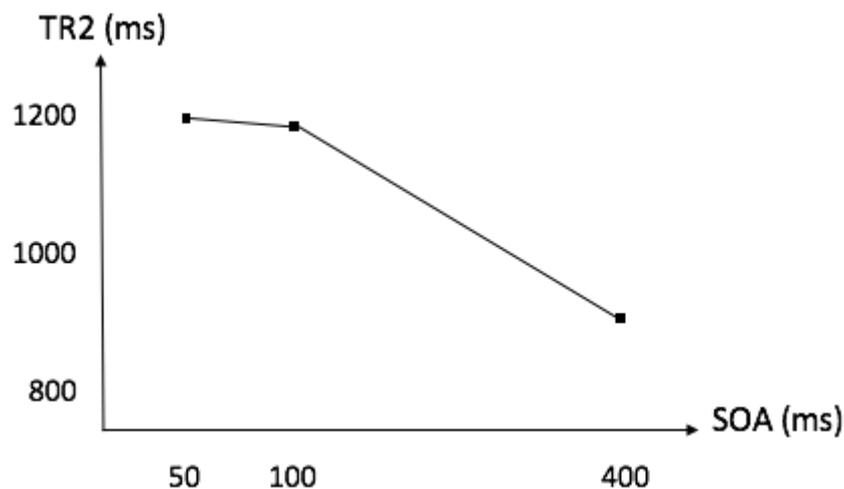


Figure 13. Exemple d'effet PRP, adapté de Strobach et al. (2015). Le temps mis pour répondre à la tâche 2 (T2) est plus long si le temps qui sépare la présentation de la tâches 1 et de la tâche 2 (SOA) est plus court.

Lors de la réalisation de tâches discrètes, des processus discrets à capacité limitée (i.e. un processus par tâche) sont à l'œuvre. Ces processus respectent le modèle du goulet d'étranglement central développé notamment par Welford (1952) selon lequel la simultanéité de traitements centraux est impossible. Ainsi, comme idéalement schématisé sur la figure 14, nous voyons que, dans une condition de SOA court, la réalisation du traitement central de la tâche 2 commence uniquement après le traitement central de la tâche 1. Dans cette condition de SOA court, la réalisation de la tâche 2, le TR2 est donc plus long que dans la condition de SOA long où le stimulus S2 intervient après la fin du traitement central de la tâche 1 entraînant une absence d'interférence.

En respectant ce modèle, il est possible de mettre en équation l'effet PRP, qui n'existe que dans le cas du SOA court, selon la formule suivante (Maquestiaux, 2012 ; Ruthruff, Johnston, & Van Selst, 2001) :

$$\text{Effet PRP} = \text{précentral T1} + \text{traitement T1} - \text{précentral T2} - \text{SOAcourt}$$

Cette équation montre donc, en condition SOA court, que plus les stades précentral et central de la tâche 1 seront longs (et donc plus le TR1 sera long), plus l'effet PRP sera grand.

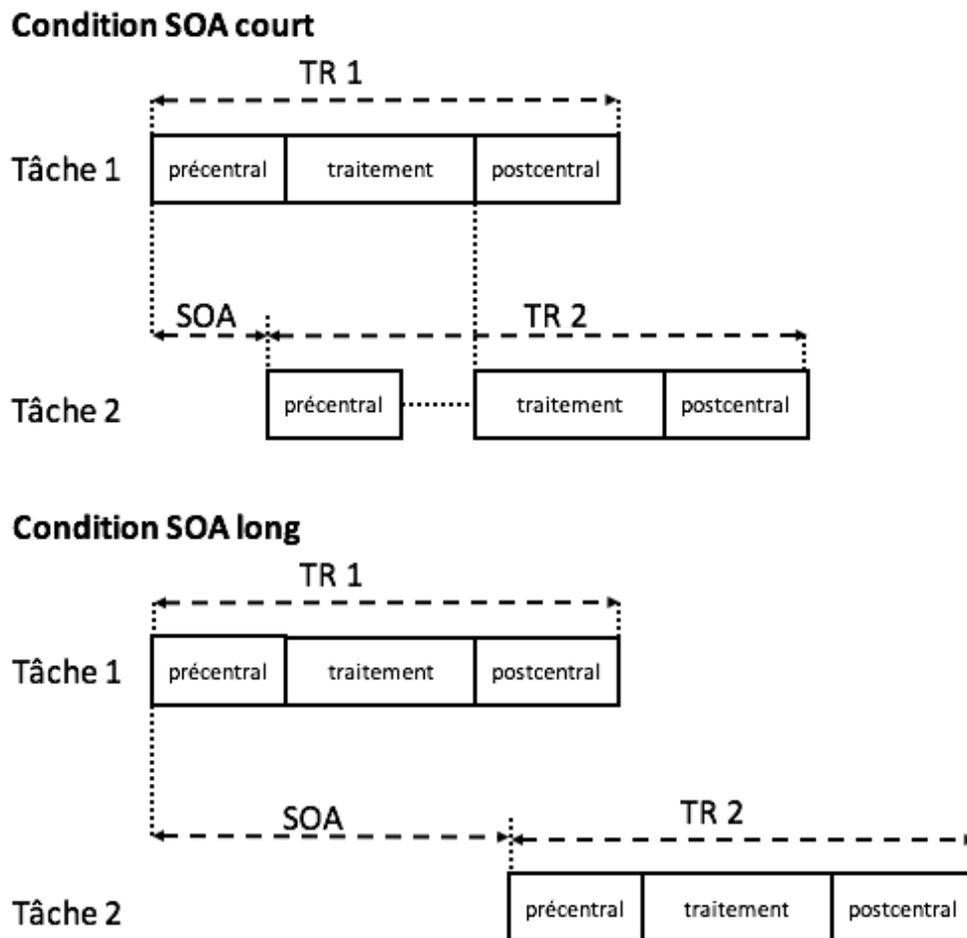


Figure 14. Modèle du goulet d'étranglement central. La réalisation de chaque tâche est décomposée en trois étapes successives depuis le stimulus jusqu'à la réponse. Un stade précentral, un stade de traitement et un stade post central. Le modèle propose que deux stades de traitements de deux tâches discrètes soient impossibles à réaliser simultanément, alors que toute autre combinaison de stades le soit. Dans la condition SOA long le stimulus de tâche 2 arrive après le stade de traitement de la tâche 1 ce qui permet aux trois stades de la tâche 2 de se dérouler sans interruption, contrairement au déroulement des stades de la tâche 2 dans la condition SOA court. Cette absence d'effet PRP en condition SOA long est aussi appelée goulet d'étranglement central latent.

Nous allons maintenant détailler les hypothèses théoriques qui permettraient de comprendre d'une part l'effet PRP mais également pourquoi il y aurait un avantage à suivre un entraînement en condition de double tâche (c'est-à-dire avec SOA suffisamment court) comparativement à entraînement en condition tâche par tâche.

## 5.2. Hypothèse structurale et hypothèse stratégique

Actuellement, il existe deux hypothèses principales permettant d'expliquer l'effet PRP. Celles-ci sont notamment présentées dans la revue de question concernant la simultanéité des actes psychiques (Maquestiaux, 2012) et dans celle sur le DTPA (Strobach, 2020). Une de ces hypothèses est *structurale (ou intégrative)* et spécifique aux tâches entraînées, tandis que l'autre repose sur un mécanisme cognitif *stratégique*, une habileté, de nature générique. Dans l'une comme dans l'autre hypothèse, l'intégrative ou la stratégique, les modèles mettent en avant la nécessité de planifier et d'allouer des ressources cognitives comme prérequis à la résolution des tâches (Szameitat, Lepsien, von Cramon, Sterr, & Schubert, 2006).

### *L'hypothèse structurale*

Les tenants de l'hypothèse structurale (i.e. d'un unique goulet d'étranglement central) proposent que l'amélioration des performances en situation double tâche repose sur l'hypothèse intégrative. Cette hypothèse est celle selon laquelle un entraînement en condition de double tâche permettrait une intégration efficace des deux tâches entraînées en les combinant ensemble jusqu'à ce qu'elles deviennent une seule super tâche (e.g. Hazeltine et al., 2007 ; Hazeltine et al. 2002 ; Oberauer & Kliegl, 2004 ; Rogers and Monsell, 1995 ; Ruthruff et al. 2006). Ainsi, lorsque chaque tâche est réalisée au début de l'entraînement par des processus à capacité-limitée discrets et spécifiques à chacune des tâches, à la fin de l'entraînement la résolution des deux tâches se ferait au moyen de processus à capacité limitée combinant les caractéristiques de résolution des deux tâches.

Cette hypothèse intégrative qui repose sur le modèle du goulet d'étranglement central propose donc une amélioration spécifique aux tâches entraînées proche de ce que nous avons abordé précédemment en développant le concept d'automatisation par instances (Logan, 1988) et de "template" (Gobet, 1996).

### *L'hypothèse stratégique*

Une autre hypothèse, celle de la planification et de l'allocation de ressources ("allocation and scheduling hypothesis") propose que l'entraînement en conditions "double tâche" permettrait de développer une habileté de planification et d'allocation des ressources cognitives en situation de "double tâche". Cette théorie développée par Meyer et Kieras

(1997) dans leur modèle adaptatif du contrôle exécutif propose que les étapes de réalisation de deux tâches puissent être réalisées soit de manière séquentielle, soit de manière parallèle lorsque des "strategic bottlenecks" sont activés. Cette hypothèse est en opposition avec les modèles structuraux du goulet d'étranglement central qui indiquent l'impossibilité d'un traitement central simultané de tâches discrètes, mais posent clairement l'idée d'une compétence générique, d'une habileté à manipuler plusieurs tâches simultanément, qui se renforcerait avec l'entraînement.

L'amélioration de la performance lors de situations en double tâche est abordée soit sous un angle spécifique à la situation entraînée, par automatisation des tâches mais aussi par la création d'une super-tâche ou d'un template, soit sous un angle d'amélioration des performances génériques via le développement de l'habileté de permutation.

### **5.3. Situation de double tâche : les effets de l'automatisation d'une seule des deux tâches**

Afin de pouvoir tester l'hypothèse de l'élimination du goulet d'étranglement central, c'est-à-dire la possibilité de traitement en parallèle de tâches discrètes, Maquestiaux, Lagüe-Beauvais, Ruthruff et Bherer (2008) se sont inspirés du protocole de Ruthruff et al. (2006). L'idée principale est que l'automatisation, par l'exposition à des épisodes répétés, permet le traitement en parallèle des tâches automatisées, c'est-à-dire qu'il ne serait plus observé d'effet PRP dans les situations double tâche impliquant au moins une tâche automatisée. Au cours de leur expérience, les participants ont suivi un entraînement intensif uniquement de la tâche auditivo-verbale (AV) (5040 essais). Ensuite, les participants découvraient en situation de double tâche, la deuxième tâche qui était visuo-motrice (VM). Les tâches AV et VM sont des "single-step task" (Monsell, 1996). L'effet PRP moyen observé sur la tâche AV est considéré par les auteurs comme supportant l'hypothèse d'un goulet d'étranglement central éliminé. Les auteurs concluent que la pratique intensive conduirait à l'automatisation du traitement central, ce qui permet le traitement parallèle avec le traitement d'une autre tâche nouvelle. Cette expérience favorise plus l'hypothèse stratégique que structurale/intégrative car on observe un traitement parallèle alors qu'aucune intégration de deux tâches n'a pu être faite. En d'autres termes, l'effet de traitement en parallèle de deux tâches est observé alors que la construction d'une supertâche est évitée.

Toutefois, ce résultat de la disparition du goulet d'étranglement n'est observé que dans le cas particulier de modalités sensori-motrices compatibles avec la réalisation de tâches doubles, c'est-à-dire à la fois en minimisant les interférences sensorielles de perception et de réponse, mais également sur des associations sensorielles stimulus-réponses particulièrement favorables (Maquestiaux, Ruthruff, Defer, & Ibrahime, 2018 ; Ruthruff, Hazeltine, & Remington, 2006 ; Stelzel, Schumacher, Schubert, & Mark, 2006). Ainsi, Maquestiaux et al. (2018) montrent la possibilité de réalisation parallèle des traitements d'une tâche visuo-motrice et d'une tâche auditivo-verbale est possible, tandis que les tâches visuo-vocale et auditivo-motrice sont incompatibles. C'est pourquoi les auteurs modèrent la portée de l'hypothèse stratégique puisque les résultats ne sont observés que dans des cas très particuliers.

Pour résumer la diminution de l'effet PRP peut être obtenue par l'automatisation d'une des deux tâches à effectuer ensemble, c'est-à-dire par l'intermédiaire d'un processus spécifique. L'intervention de processus génériques comme par exemple ceux qui seraient à l'œuvre dans l'hypothèse stratégique n'est pas ici clairement démontré. C'est pourquoi dans la prochaine section seront présentées des études montrant une diminution de l'effet PRP reposant sur des processus génériques.

#### **5.4. L'automatisation tâche par tâche *versus* l'entraînement en double tâche**

Si dans les expériences précédentes, les protocoles expérimentaux consistaient en l'automatisation d'une seule des deux tâches, les protocoles présentés ici étudient différents types d'entraînement conduisant à l'automatisation de chacune des deux tâches : les tâches sont entraînées soit de manière distincte (c'est-à-dire en s'entraînant d'abord à l'une des tâches, puis à l'autre), soit en situation de double tâche.

Dans ce cadre, Liepelt et al. (2011) comparent un groupe ayant bénéficié d'un entraînement en double tâche à un autre ayant suivi un entraînement en simple tâche. Ces deux groupes effectuent plusieurs sessions d'entraînement sur plusieurs jours. Lors de la dernière session, les deux groupes réalisent les tâches une par une et en double tâche. Deux tâches étaient à réaliser, une visuo-motrice (VM) et une auditivo-verbale (AV). La tâche VM avait pour stimulus l'apparition d'un disque sur une des trois positions possibles sur l'écran (gauche, milieu, ou droite) auquel les participants devaient répondre manuellement avec le doigt correspondant (index, majeur ou annulaire) de la main droite. Pour la tâche AV, les participants répondaient

verbalement aux trois sons possibles entendus dans un casque selon la règle “UN” pour le son grave (350 Hz), “DEUX” pour le son medium (900 Hz) et “TROIS” pour le son aigu (1650 Hz). L’intégralité de la séquence est décrite dans la figure 15.

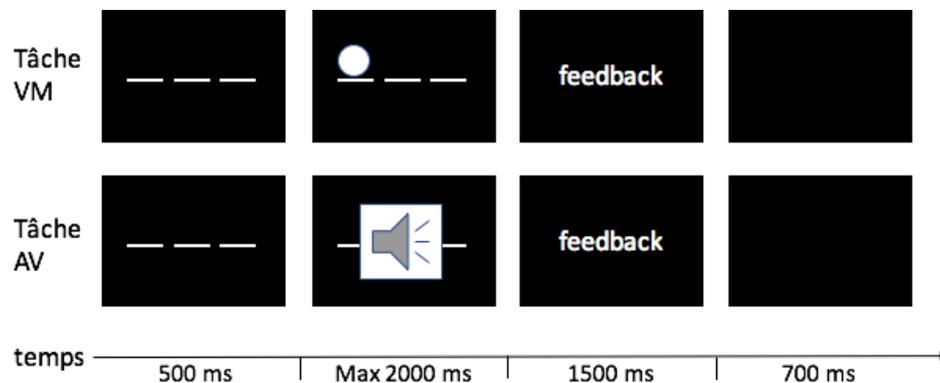


Figure 15. Stimuli présentés pour chaque essai au cours de l’expérience. La tâche visuelle est en haut, la tâche auditive en bas. Les essais commencent par un écran préparatoire sur lequel sont présentés trois traits pendant 500 ms. Ensuite un cercle apparaît sur l’un des trois traits et reste visible jusqu’à ce que le participant appuie sur la touche correspondante ou, en cas d’absence de réponse, pendant 2000 ms. La tâche auditive lorsqu’elle est effectuée seule comporte le même écran préparatoire pendant 500 ms, suivi du son présenté pendant 40 ms. Les traits disparaissent lorsque la réponse est donnée ou après 2000 ms sans réponse. Les temps de réaction sont présentés pendant 1500 ms au cours de la séquence Feedback qui est suivie d’un écran vide pendant 700 ms avant que ne recommence un nouvel essai.

Puisque l’effet PRP s’observe préférentiellement sur la tâche 2 (ici la tâche AV), les résultats sur la tâche AV sont ceux qui indiquent une amélioration de la réalisation de tâches doubles. Le groupe entraîné aux tâches doubles réduit significativement son temps de réponse à la tâche AV, ce qui reflète une diminution de l’effet PRP en situation double tâche. Le deuxième résultat est que le groupe entraîné en simple tâche répond plus vite à la tâche AV, en situation de double tâche, après entraînement que le groupe double tâche avant entraînement. Ce résultat est attribué à l’automatisation des tâches. Cependant, toujours en situation double tâche et après entraînement, le groupe entraîné en double tâche est plus rapide que le groupe entraîné en simple tâche. L’entraînement aux situations double tâche présente un avantage cumulatif de l’automatisation et d’une amélioration des processus de permutation inter tâche.

Cette amélioration des processus de permutation inter-tâche est-elle de nature générique, spécifique ? En effet, si seuls des processus spécifiques sont à l’œuvre, comme proposé par l’hypothèse intégrative, alors des participants entraînés à une situation double tâche ne présenteraient pas de diminution de l’effet PRP dans une nouvelle situation double tâche

comprenant des tâches exclusivement nouvelles (cette partie est développée dans le 4.5). Toutefois, si des processus génériques étaient renforcés, une telle diminution serait observée dans une situation nouvelle (cette partie est développée dans le 4.6).

### **5.5. Structuration de la supertâche**

Dans les protocoles vus précédemment, l'objet d'étude était principalement l'automatisation spécifique aux tâches et le développement d'une habileté de permutation transférable à des situations nouvelles. Le développement éventuel de la supertâche, bien que théorisé, ne pouvait pas être observé dans un protocole qui confond l'effet de l'automatisation et de l'habileté de permutation. Le protocole de Orscheshek, Strobach, Schubert et Rickard (2019) est plus à même de montrer un effet unique de création de supertâche en développant un entraînement de double tâche qui évite de stimuler l'habileté de permutation. Au cours de l'expérience d'Orscheshek et al., les participants devaient associer un ensemble de "mots stimuli" à des réponses vocales (mots) et motrices (touche clavier). La moitié des mots stimuli était entraînée en tâche double, c'est-à-dire que la réponse des participants exigée comportait à la fois la réponse vocale (mot associé) et l'appui sur la touche correspondante. L'autre moitié des mots stimuli était entraînée en tâche simple, c'est-à-dire que la réponse des participants exigée après la présentation du mot stimulus était soit vocale (mot associé), soit l'appui sur la touche correspondante. Après plusieurs sessions d'entraînement, lorsque la tâche nécessitait de donner à la fois une réponse verbale et motrice (double tâche), les participants répondaient en parallèle si les stimuli étaient ceux entraînés alors que si les stimuli avaient été entraînés en simple tâche (soit réponse verbale soit réponse motrice), les participants répondaient en séquence. Lorsque les stimuli étaient nouveaux, les participants répondaient en séquence également. Ainsi, pris ensemble, ces résultats montrent que les participants qui s'entraînent dans ces conditions de double tâche ne développent pas d'habileté "domaine général" et associent les règles de réponse (ici, verbale et motrice). Tout se passe comme si, après une exposition répétée aux situations de double tâche, se construisait une structure accessible combinant des informations de l'une et de l'autre tâche, appelée *chunk* par les auteurs (Nino & Rickard, 2003 ; Orscheshek et al. 2019, Strobach, Schubert, Pashler & Rickard, 2014). Cette expérience soutient donc l'hypothèse intégrative et la théorie de la supertâche (Strobach, 2020).

Ce mécanisme de chunking est ici montré au cours d'un apprentissage. Au-delà de la proximité lexicale, ce mécanisme est comparable au chunking employé dans le cadre de l'expertise acquise (e.g. Simon & Gobet, 1996). En effet une des propriétés fondamentales du chunk est son caractère domaine spécifique.

Après avoir constaté la validité de l'hypothèse intégrative, nous allons voir dans quelle mesure l'hypothèse stratégique l'est également. En d'autres termes nous allons étudier les capacités de transfert après un entraînement double tâche.

### **5.6. Effets de transfert après un entraînement en double tâche**

L'entraînement en situation double tâche articule les bénéfices de l'automatisation et de du renforcement de la capacité de permutation. L'hypothèse intégrative (création d'une supertâche spécifique) et le renforcement de l'habileté générique de permutation jusqu'au développement d'une capacité à traiter en parallèle deux tâches (e.g. hypothèse stratégique) constituent les pistes explorées ici. La première expérience de Liepelt et al. (2011) ne permet pas de distinguer, dans l'amélioration des performances lors de la réalisation des tâches double, ce qui tient des processus spécifiques et ce qui tient des processus génériques. Dans une autre expérience, les auteurs apportent des éléments d'information à ce sujet. En effet, les auteurs reprennent le protocole expérimental vu précédemment pour tester la transférabilité de l'habileté de permutation à des tâches nouvelles. Les auteurs reprennent leur protocole expérimental et y ajoutent une session de transfert à la fin de l'expérience. Dans la session de transfert, soit la tâche VM est modifiée soit la tâche AV est modifiée. La tâche VM est modifiée en présentant des triangles petit, moyen ou gros en lieu et place des disques qui pouvaient apparaître à gauche, au milieu ou à droite. Les règles de réponses de la tâche AV ont été changées selon répondre "DEUX" pour le son grave, "UN" pour le médium et "TROIS" pour le son aigu. Cette modification implique donc un changement à la fois des règles de réponses mais aussi des stimuli. Les résultats montrent que le groupe entraîné en double tâche présente une diminution de l'effet PRP significative, ce qui n'est pas le cas du groupe entraîné en simple tâche lors de la réalisation de la tâche AV. En d'autres termes, le groupe entraîné en situation double tâche, c'est-à-dire le groupe ayant eu l'opportunité de renforcer sa capacité de permutation, est meilleur dans des situations double tâche nouvelles. Cet effet de transfert observé est en faveur du renforcement de processus génériques de l'habileté de permutation.

D'autres études montrent également cet effet de transfert de l'habileté de permutation. Par exemple, la pratique régulière de certains types de jeu vidéo de nature à favoriser la sollicitation du processus de permutation depuis et vers de nombreuses tâches (e.g. jeux de combats où l'on voit la scène au travers les yeux du personnage contrôlé) a pour conséquence le renforcement d'une habileté de permutation (Strobach, Frensch, & Schubert, 2012). Au cours de cette étude, les auteurs ont entraîné (environ 10h) un groupe à faire une activité qui ne sollicite pas l'habileté de permutation (Tetris<sup>®</sup>) et un autre groupe à faire une activité qui sollicite l'habileté de permutation (jeu de tir à la première personne : Medal of Honor<sup>®</sup>). Ces deux groupes ont ensuite réalisé une double tâche similaire à celle de Liepelt et al. (2011). Le groupe ayant été entraîné dans le jeu vidéo sollicitant l'habileté de permutation (i.e. Medal of Honor<sup>®</sup>) présente une diminution significative de l'effet PRP par rapport au groupe Tetris<sup>®</sup>. Ces résultats montrent un effet de transfert d'une situation plus écologique que classiquement observé dans le laboratoire vers une situation contrôlée de laboratoire. Ces résultats sont également observés depuis une situation parfaitement écologique (milieu professionnel) vers une situation contrôlée de laboratoire. Ainsi, les interprètes simultanés (Strobach et al., 2015), comparativement aux interprètes non simultanés montrent un effet PRP significativement réduit dans des tâches de laboratoires très proches de celles décrites précédemment (Liepelt et al., 2011).

Ces résultats se retrouvent dans d'autres études (e.g., Green et Bavelier, 2003). Pour autant, certains auteurs en critiquent la portée. En effet, comme le soulignent Sala et Gobet (2019), un résultat bien connu de la psychologie est que tous les tests qui mesurent les habiletés mentales sont corrélés positivement les uns avec les autres, ce qui a conduit les chercheurs à proposer l'existence d'un facteur latent appelé l'habileté cognitive générale (GCA ou intelligence). Le modèle Cattell-Horn-Carroll (voir figure 16) propose qu'il existe des habiletés cognitives intermédiaires entre les tests cognitifs et l'habileté cognitive générale. Ce modèle se décline ainsi en trois niveaux (appelés *stratum*) allant du plus spécifique (tests cognitifs de laboratoire ou *stratum 1*) vers le plus générique (habileté générale ou *stratum 3*). Le *stratum* intermédiaire comprend des habiletés telles que la capacité à résoudre de nouvelles situations (ou fluidité), qui repose sur l'habileté de permutation et qui est donc sollicitée dans les expériences que nous avons précédemment décrites. La capacité de transfert peut être considérée comme lointaine dès lors qu'une amélioration significative sur un *stratum 1* se constate sur un *stratum* supérieur. Or, pour Sala et Gobet (2019), les expériences de Green et

Bavelier (2003) ou de Strobach et al. (2015) présentent du transfert intra-stratum qui ne peut donc pas être considéré comme transfert lointain. Pour les auteurs, tout se passe comme si la généralisation du renforcement de l'habileté de permutation n'était pas à même de produire un effet domaine général. Ces éléments conduisent Sala et Gobet à conclure qu'il faudrait éviter un entraînement cognitif de type domaine générale au profit d'un entraînement de type domaine spécifique, plus à même d'améliorer les performances des individus. Or nous avons vu que la capacité de permutation pouvait être significativement renforcée au cours d'une activité écologique (e.g. interprètes simultanés). Il reste à observer dans quelle mesure le renforcement de l'habileté de permutation affecte le stratum 2 (e.g. la fluidité, mémoire de travail, etc).

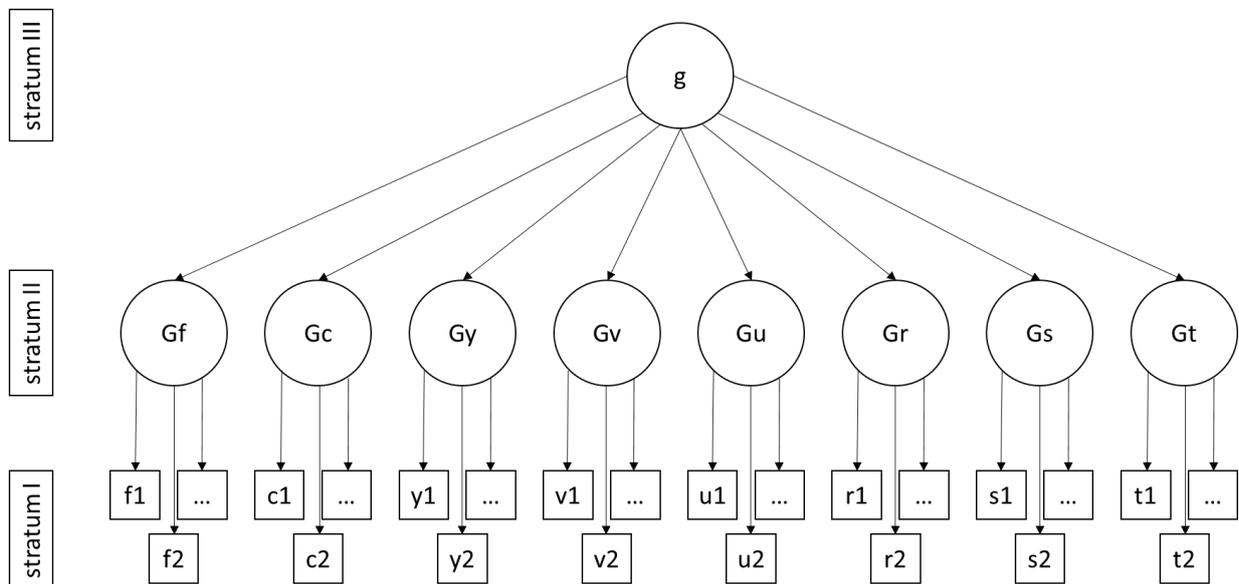


Figure 16. Modèle Cattell-Horn-Carroll (CHC) : l'habileté générale ou intelligence (stratum III) repose sur des habiletés intermédiaires telles que la fluidité ou Gf (Stratum II). Les habiletés intermédiaires se mesurent au moyen de plusieurs tests spécifiques (stratum I). Par exemple, la fluidité ou Gf serait calculé en fonction des résultats à l'ensemble des tests spécifiques de type f (f1, f2, etc.)

En d'autres termes, la capacité de transfert de l'habileté de permutation est-elle ou pas de nature lointaine ? Les tests d'intelligence permettent d'identifier la localisation (stratum 1, 2 ou 3) de l'éventuel transfert suite à un entraînement. Certains travaux montrent l'influence de l'activité professionnelle ou de jeu vidéo sur le renforcement de stratum 1 (tâche de laboratoire Strobach et al, 2012, 2015). D'autres travaux montrent l'influence de la pratique du jeu d'échecs sur le renforcement des habiletés verbales et numériques (i.e., stratum 2, Franck

et D'Hondt, 1979). Dit autrement, certaines activités renforcent les strata 1 et 2, c'est pourquoi certains entraînements cognitifs pourraient être de nature domaine général. Gobet et Campitelli (2014) concluent que (p6) que la réalisation répétée de parties d'échecs sous contrainte temporelle peut être de nature à développer des habiletés généralisables qui se matérialisent par des performances aux tests de QI significativement supérieures à la moyenne (les auteurs proposent également que le talent puisse être à l'origine de ces meilleures performances). Ainsi, les résultats de Frank et d'Hondt (1979) et les conclusions de Campitelli et Gobet (2004) semblent en contradiction avec les conclusions de Sala et Gobet (2019). Pour autant, cette apparente contradiction pourrait reposer sur la nature fugace du renforcement ou bien sur un renforcement insuffisant pour obtenir un effet de transfert sur les strata 2 et 3 (Anguera et al, 2013).

La prochaine section est dédiée à l'articulation des processus génériques et spécifiques à l'œuvre dans le développement de l'expertise.

## **6. Pourquoi l'expertise ne rend pas plus intelligent**

Les théories sur les mécanismes cognitifs sous-jacents qui expliquent les changements liés à la pratique font largement défaut et sont sous-représentées dans la littérature (Strobach 2020 ; Strobach & Karbach, 2016 ; Taatgen, 2013). L'approche originale qui est ici abordée est celle de l'articulation des processus "domaine spécifique" et "domaine générique" au cours du développement de l'expertise. En effet, les théories sur l'expertise acquise mettent principalement en avant la structuration de processus spécifiques et la grande difficulté de montrer des composantes génériques chez l'expert. De plus, la littérature sur le renforcement cognitif peine aussi à montrer des effets de transfert, ce qui a même conduit certains auteurs (e.g., Green & Bavelier, 2008) à parler de "malédiction de la spécificité" dans l'apprentissage. Néanmoins, les idées fondatrices des approches "domaine spécifique" et "domaine générique" sont présentes dès la fin des années 1980 chez Logan. En effet, dans sa théorie de l'automatisation, qui peut être comprise comme concourant au développement de l'expertise, il présente la compétition de processus algorithmiques et de mémorisation ou connaissance. Le processus algorithmique, en tant qu'adapté à la résolution de toute tâche nouvelle, est par essence générique. Le processus de mémorisation est, quant à lui, par

essence spécifique. Logan présente d'ailleurs cette compétition entre les processus génériques et spécifiques comme une course de chevaux impliquant le cheval algorithmique et le cheval mémorisation, qui, au fur et à mesure des expositions, renforce le cheval mémorisation jusqu'à le faire gagner systématiquement s'il y a eu un nombre suffisant d'expositions. Pour poursuivre la métaphore de la course hippique, l'intérêt théorique du travail présenté ici revient à poser la question suivante : le cheval algorithmique se renforce-t-il avant de perdre systématiquement contre le cheval mémorisation ? De manière moins métaphorique, les processus génériques se renforcent-ils pendant le renforcement des processus spécifiques ? Dans la vie de tous les jours, les tâches nouvelles pour un individu sont des tâches complexes, i.e., des tâches à plusieurs étapes (e.g., apprendre à conduire). Ainsi, il faut de nombreuses expositions pour obtenir la construction de *chunks* relatifs à l'ensemble des étapes puis l'ensemble des tâches. Tant que ces *chunks* ne sont pas développés, l'individu doit activer le processus algorithmique, lequel est constitué de processus impliqués dans les fonctions exécutives, dont la permutation.

Le processus de permutation, qui est générique, se renforce au cours des sollicitations en laboratoire (Liepelt et al, 2011), mais également dans les situations écologiques comme montré dans l'expérience comparant les performances en permutation des interprètes simultanés et des interprètes non simultanés (Strobach et al., 2015). Cette expérience permet d'analyser les performances en permutation d'individus qui pratiquent une activité favorisant le mécanisme de permutation et qui n'ont pas atteint le stade d'expert. En effet, leur activité est d'environ 150 heures par an pendant 5 ans alors que selon Ericsson, Krampe, Tesch-Römer, et Clemens (1993) des performances d'expert requièrent une pratique intensive et prolongée pendant au moins 10 ans. Les interprètes simultanés peuvent être ainsi considérés comme se trouvant en cours de renforcement de processus de permutation puisqu'ils n'ont pas acquis le niveau d'expertise cognitif de leur activité (en d'autres termes ils n'ont pas automatisé et "chunké" l'ensemble des tâches de l'activité). Les résultats observés sur le test classique de permutation montrent une performance significativement meilleure des interprètes simultanés comparativement aux interprètes non simultanés, ce qui va dans le sens de l'hypothèse d'un renforcement de l'habileté de permutation avec la pratique d'une activité de nature à favoriser la permutation et avant l'acquisition d'expertise.

Chez l'expert, c'est-à-dire lorsque les individus ont "chunké" l'ensemble des tâches requises lors de leur activité, le processus de permutation ne devrait plus être sollicité. En effet, la

répétition intensive d'exposition à des épisodes de permutation entre deux tâches A et B conduit à la création d'une supertâche. Cette supertâche (ou "chunk" ou encore "template") combine des informations relatives aux tâches A et B et est spécifique aux tâches A et B. Une fois cette supertâche créée, l'habileté de permutation ne devrait plus être sollicitée (voir figure 17) puisqu'il n'est plus nécessaire de changer de configuration cognitive "task-set" spécifique à la tâche A vers une configuration cognitive spécifique à la tâche B, au bénéfice d'une répétition de la configuration cognitive spécifique à la supertâche. Cette absence de sollicitation devrait être de nature à annuler peu à peu le renforcement du processus de permutation accumulé au cours de la phase d'acquisition d'expertise. En d'autres termes, la mise en œuvre de processus spécifiques est suivie par la décroissance du processus générique. En effet, le processus de permutation étant générique, son renforcement devrait provoquer une augmentation du facteur g (de l'intelligence). Or les études chez l'expert ne sont pas en faveur de cette assertion. Il n'existe actuellement pas d'étude montrant directement la décroissance de l'habileté de permutation. Ce défi d'observation reste donc à mener.

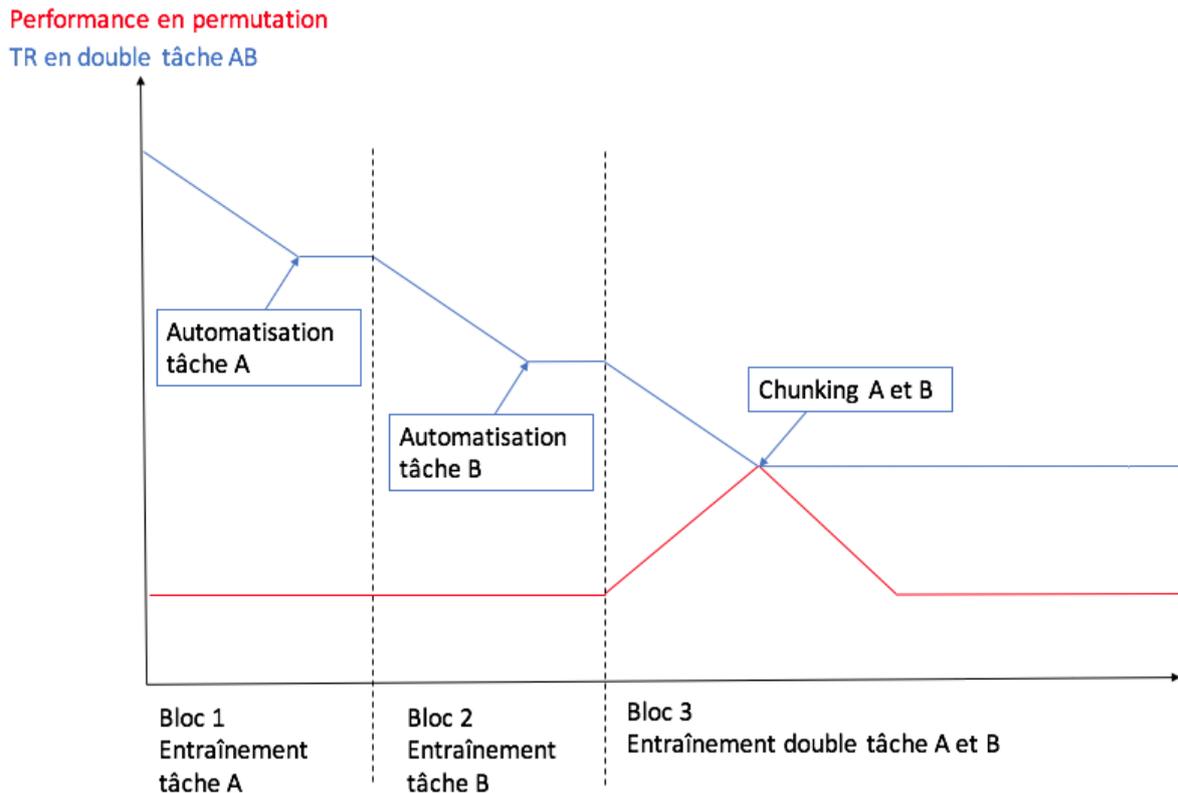


Figure 17. Modèle idéalisé d'évolution de l'habileté de permutation en fonction de l'exposition répétée à des épisodes simple tâche (bloc 1 et 2) et double tâche (bloc 3). Dans le bloc 1 est représenté un TR lors de double tâche A et B alors que seule la tâche A est entraînée. Dans le bloc 2 est représenté un TR lors de double tâche A et B alors que seule la tâche B est entraînée après automatisation de la tâche A. Dans le bloc 3 est représenté un TR lors de double tâche A et B. Après un nombre suffisant d'expositions aux situations double tâche, les tâches A et B deviennent une supertâche grâce au mécanisme de chunking. L'habileté de permutation nécessaire pour passer d'une tâche à l'autre n'est renforcée que lorsqu'elle est sollicitée, c'est-à-dire en entraînement double tâche. Une fois la supertâche créée, le mécanisme de permutation n'est plus sollicité et la performance en permutation reviendrait peu à peu à son niveau initial.

Le modèle présenté propose d'une part le renforcement du processus de permutation au cours de la réalisation de l'activité, de situations multitâches, et d'autre part la décroissance de ce renforcement successivement au mécanisme de chunking des tâches répétées ensemble, c'est-à-dire lorsque les tâches répétées ensemble deviennent une supertâche. Si l'on poursuit le raisonnement d'un renforcement du mécanisme de permutation grâce à des expositions répétées à des tâches doubles nouvelles, du moins suffisamment nouvelles pour que le mécanisme de chunking n'ait pas eu lieu, il est alors concevable de renforcer "indéfiniment" ce mécanisme de permutation (voir figure 18). En effet, les expériences sur le renforcement du mécanisme de permutation exposent les participants à des doubles tâches identiques pendant une dizaine d'heure. Ainsi, dans ces études les participants sont en cours d'automatisation. Que se passerait-il si les participants étaient exposés à des tâches nouvelles

régulièrement afin de solliciter davantage le mécanisme de permutation ? Quelle est l'ampleur possible du renforcement du mécanisme de permutation ?

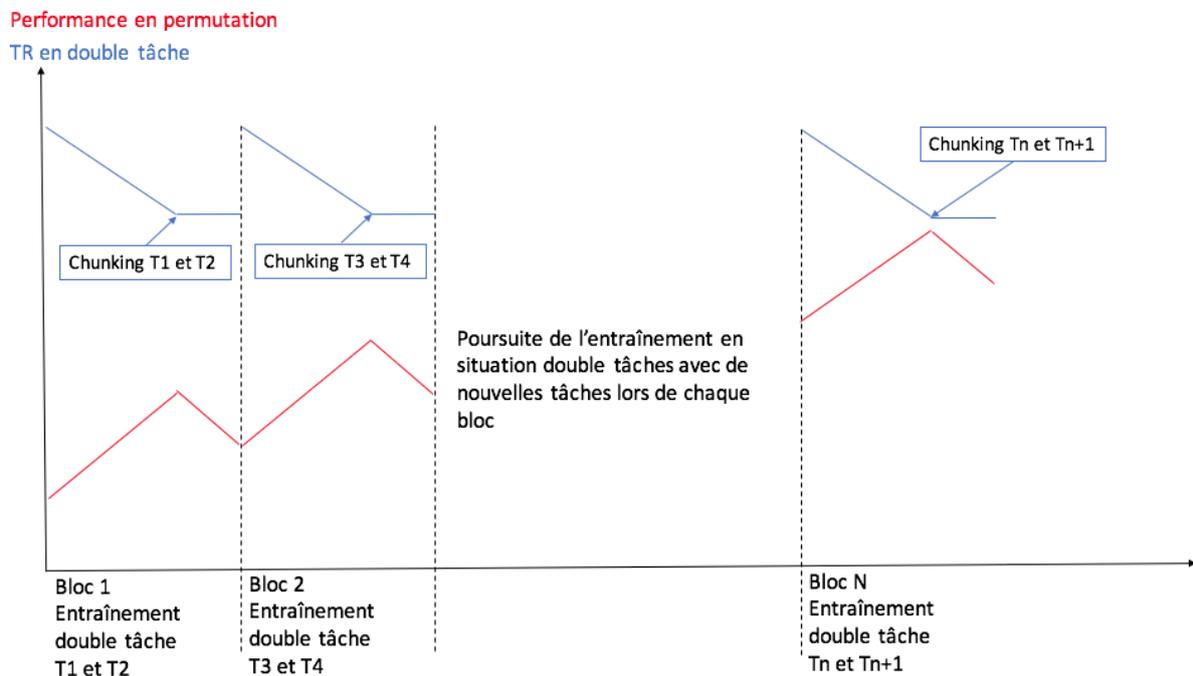


Figure 18. Modèle idéalisé d'évolution de l'habileté de permutation en fonction de l'exposition répétée à des épisodes double tâche. Chaque nouveau bloc comporte une tâche nouvelle, inconnue, obligeant le participant à solliciter l'habileté de permutation.

L'amélioration de l'habileté de permutation permettrait, en situation de double tâche, de mieux gérer les tâches nouvelles ou inconnues. Cette habileté correspondrait à un processus agissant au cœur de la mémoire de travail dans les situations de tâches doubles (i.e. suffisamment nouvelles pour que les individus n'aient pas "chunké" les deux tâches en une supertâche). L'objectif de la partie suivante est de présenter l'articulation de ce mécanisme au sein de la mémoire de travail en vue de proposer des applications concrètes de ce renforcement dans la vie de tous les jours.

## 7. Opérationnalisation du renforcement de la permutation dans la mémoire de travail

La mémorisation et la permutation sont abordées dans le modèle de partage des ressources temporelles (TBRS) de la mémoire de travail (Barouillet, Bernardin, & Camos, 2004 ; Barouillet & Camos, 2007 ; Camos, 2017) qui implique des empan complexes. Alors que l'empan mnésique est classiquement mesuré par le nombre d'items que l'individu est capable de se rappeler, les empan complexes sont caractérisés par l'introduction de tâches à réaliser entre chaque item présenté (voir Fig. 19). L'empan complexe nécessite donc une alternance entre mémorisation et traitement. La capacité à réaliser des tâches d'empan complexe repose nécessairement sur l'utilisation du mécanisme de permutation (Cowan, 1999).

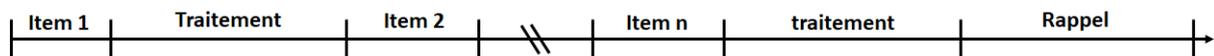


Figure 19. Procédure d'évaluation de l'empan complexe. On demande à l'individu de mémoriser une liste d'éléments qui sont présentés de manière séquentielle. Une tâche de traitement est insérée entre les éléments. Après le dernier élément, on demande à l'individu de rappeler la liste d'éléments dans l'ordre de présentation.

Deux facteurs influencent les performances en empan complexe, en provoquant un déclin des traces mnésiques des items (Barouillet et al., 2004) : la longueur des intervalles entre les items, et la charge cognitive induite par la tâche de traitement. Ainsi, les traces mnésiques chargées en mémoire de travail se dégraderaient lorsqu'elles ne sont pas activées au niveau du stade central (Barouillet & Camos, 2009 ; Cowan, 1999) et pourraient être réactivées grâce à un mécanisme de focalisation, comme cela a été empiriquement constaté pour des items verbaux ou visuospatiaux (e.g. Cowan, 1992 ; Vergauwe, Camos, & Barouillet, 2009, 2010). Dans le cas d'une situation de double tâche, et particulièrement dans les tâches d'empan complexe, selon le modèle du goulet d'étranglement central, cette réactivation d'une tâche A peut être réalisée au cours des stades périphériques d'une tâche B (i.e. perception du stimulus et réponse). Des études en neuroimagerie suggèrent que la réactivation d'une tâche A pourrait être réalisée au cours de courtes pauses du stade central d'une tâche B (e.g. Raye, Mitchell, Reeder, Greene, & Johnson, 2008). La fonction exécutive de permutation devrait donc être particulièrement sollicitée afin de maintenir actives les traces mnésiques de chacune des tâches. Les auteurs du modèle TBRS évoquent un processus rapide et incessant de permutation entre les stades centraux, de traitement de la tâche A et de stockage de la

tâche B, permettant de maintenir actives les traces mnésiques de chacune des tâches A et B, complétant le modèle de dégradation et de réactivation des traces mnésiques proposé par Cowan (1992).

Les tâches d'empan complexe permettent de plus d'opérationnaliser un entraînement aux situations en double tâche avec une tâche de mémorisation et une tâche de traitement, tout en favorisant le renforcement du mécanisme de permutation. Ces types de tâches (mémorisation et traitement) peuvent se rencontrer dans de nombreuses activités de la vie de tous les jours, comme la conduite automobile.

## 8. Discussion

L'objectif de cette recherche est d'essayer de déterminer l'évolution, la dynamique de renforcement des processus spécifiques et génériques au cours de l'acquisition d'expertise. Tout au long de l'acquisition d'expertise, plusieurs mécanismes sont à l'œuvre.

Le modèle présenté ici propose que l'individu qui découvre une nouvelle tâche (e.g., conduite automobile) sollicite des mécanismes génériques (tels que la permutation) qui se renforcent tant qu'ils sont sollicités. Au fur et à mesure des expositions, le système cognitif intègre des données spécifiques à la tâche sous forme de "chunk". Durant cette élaboration, le système cognitif bascule peu à peu d'une sollicitation principalement basée sur des mécanismes génériques vers une sollicitation principalement basée sur des mécanismes spécifiques. Ce modèle explique donc pourquoi l'expert ne peut pas transférer ses compétences en dehors de son domaine d'expertise. En effet, selon ce modèle, l'expert utilise principalement des connaissances spécifiques à son domaine d'activité, raison pour laquelle il n'a plus besoin de solliciter des mécanismes génériques qui sont les seuls transférables. Les mécanismes génériques n'étant plus sollicités, ils décroissent. C'est pourquoi il est impossible d'observer un transfert de compétence en dehors du domaine d'expertise de l'expert : tout se passe comme si l'expert retrouvait son niveau initial de compétence générique, c'est-à-dire le niveau qu'il avait lorsqu'il était novice.

Toutefois, il n'existe pas actuellement de données expérimentales mesurant directement la décroissance des mécanismes génériques une fois l'expertise acquise. Il y a donc un enjeu important à développer un protocole expérimental permettant d'observer la dynamique de cette hypothétique décroissance.

Ainsi, dans le cadre de formation pour des activités multitâches complexes (ex : conduite automobile, chirurgie, activités scolaires, etc.), il peut être recommandé en plus de la répétition des tâches, de travailler sur le renforcement de l'habileté de permutation qui permet de mieux gérer des nouvelles tâches et donc facilite les apprentissages.

## 9. Problématique

Les ambitions de ce travail de recherche sont de répondre à certaines difficultés cognitives rencontrées par les navigants de l'aéronautique de combat. En effet, au cours des vols, les navigants ont à réaliser une multitude de tâches (communications radio, gestion de systèmes d'armement, gestion de systèmes de navigation etc.) présentées simultanément, contextualisées dans un environnement extrême (facteur de charge élevé, pressurisation faible nécessitant un apport en oxygène continu, contraintes thermiques, vibratoires, barométriques, etc.) sous fortes contraintes temporelles (vitesse très élevée) avec un enjeu vital pour eux-mêmes (éviter les collisions avec des obstacles immobiles, comme le terrain, et mobiles, comme les autres aéronefs) mais également un enjeu vital pour autrui (troupes amies et adverses, populations civiles).

Dans ce contexte singulier, les membres d'équipages déclarent ressentir des difficultés, jusqu'à avoir "la tête en feu", lors de la réalisation de certaines tâches notamment lorsqu'elles sont présentées simultanément. Ce phénomène de surcharge cognitive est décrit dès le début de la formation mais également chez l'expert en entraînement ou en opération. Alors qu'il est admis que le développement de l'expertise conduit à la disparition du phénomène de surcharge cognitive, pourquoi ce phénomène persiste-t-il, même chez les membres d'équipage qui ont la plus haute qualification délivrée par l'institution ? Au-delà du constat de la persistance de ce phénomène, la question générale à laquelle le travail présenté ici contribue à répondre est la suivante : quels moyens l'Armée de l'air et de l'espace peut-elle mettre en œuvre pour réduire l'impact de la surcharge cognitive chez les membres d'équipage de l'aviation de chasse ?

En effet, les navigants de l'aviation de chasse ne peuvent pas être experts au sens cognitif du terme. Comme nous l'avons vu, l'expertise cognitive est considérée comme acquise après 10 ans de pratique intensive et délibérée. Si cette expertise est envisageable dans de nombreux domaines (échecs, musique, etc.) où l'entraînement peut se faire jusqu'à 10 heures par jour,

les navigants, en raison des contraintes physiques et de préparation de mission, volent environ 200 heures par an soit 1h tous les deux jours. Puisque les navigants ne sont pas experts, ils ne sont pas arrivés à un niveau de structuration de supertâche de leur activité en vol. Leur activité de vol est ainsi composée de nombreuses tâches discrètes, présentées souvent simultanément, qu'ils ont à traiter en sollicitant l'habileté de permutation. D'autre part, les tâches présentant une charge cognitive importante sont celles qui ne sont pas encore assimilées dans la supertâche de l'état expert. C'est pourquoi leur identification est un besoin préalable pour décider quelles sont les tâches les plus pertinentes à entraîner en vue de construire la supertâche de l'état expert. Le chapitre 2 s'attelle à identifier les tâches de nature à générer de la surcharge de travail au cours de l'activité aéronautique de combat. Ce recueil des tâches vécues comme exigeantes par les navigants de l'aviation de chasse s'est appuyé sur la méthode des entretiens et des questionnaires. Au cours de ce recueil, une tâche présentant un enjeu vital pour les navigants a été identifiée comme pouvant générer de la surcharge cognitive : la tâche visant à surveiller le ciel afin de détecter un éventuel obstacle. En effet, au sein de l'activité aéronautique de combat, la grande majorité des vols comprend des phases de vol à vue, à proximité du sol et à proximité d'autres aéronefs (vol en patrouille). Dans ce contexte, la tâche de surveillance du ciel présente deux caractéristiques précieuses ayant conduit à la considérer comme incontournable : d'une part elle est présente dans la quasi-totalité des vols, d'autre part elle est directement associée à l'enjeu vital d'évitement des collisions à très haute vitesse. C'est pourquoi cette tâche a été choisie comme la tâche centrale autour de laquelle les autres doivent être organisées dans le but de création d'une supertâche adéquate. L'habileté de permutation est le processus qui permet, lorsqu'il est sollicité de manière répétée entre deux tâches, de conduire à la création d'une supertâche de ces deux mêmes tâches. Cette répétition d'exposition à des tâches discrètes est réalisable facilement dans un environnement contrôlé, comme un laboratoire ou un simulateur, alors que l'activité de vol se réalise dans un environnement dynamique ne permettant ce niveau de maîtrise de la répétition des tâches auxquelles les navigants sont exposés (e.g. il est possible d'être interrompu par une communication radio ou une autre des nombreuses tâches à réaliser). De plus l'environnement contrôlé permet de simplifier les tâches à réaliser, en réduisant le nombre des règles de réalisation de ces tâches, ce qui permet d'en minorer la charge cognitive et favorise donc l'apprentissage.

Afin de respecter un temps de regard important à l'extérieur du cockpit, il s'agit de répondre à la question : La répétition de l'exposition à des situations double tâche est-elle compatible avec l'intégration d'une organisation temporelle ?

C'est pourquoi dans le chapitre 3 nous avons proposé aux individus un entraînement à des situations de double tâche comprenant une tâche simulant l'activité de surveillance du ciel avec une autre tâche simulant celle de pilotage (le pilotage fait également partie des tâches identifiées comme exigeantes) tout en respectant une règle de répartition du temps de regard entre les deux tâches (issue des recommandations du manuel de travail aérien des professionnels de l'aéronautique). Le dispositif technique en vue de réaliser cet entraînement repose notamment sur l'utilisation d'un *eye-tracker* permettant de notifier en temps réel les violations des recommandations du manuel de travail aérien. La notification en temps réel a montré son efficacité lorsque les individus étaient forcés à respecter la règle (notification opaque). Cependant l'utilisation d'un tel dispositif technique est impossible en vol réel.

La deuxième question de recherche posée est : la répétition de l'exposition à des situations double tâche est-elle compatible avec l'intégration d'une organisation temporelle dans un environnement plus écologique et sans utilisation de l'*eye-tracker* ?

Une méthode alternative a été développée dans l'expérience présentée au chapitre 4 dans le souci d'un entraînement aux mêmes tâches, dans un environnement plus écologique (simulateur de vol) et en utilisant le dispositif d'*eye-tracker* uniquement pour contrôler l'efficacité de la méthode sans y avoir de principe actif (comme c'était le cas des notifications du chapitre 3). La méthode du chapitre 4 propose aux participants d'avoir accès aux informations permettant de piloter exclusivement sur demande verbale, c'est à dire en forçant les individus à respecter les règles (du manuel de travail aérien) à l'instar du chapitre 3. Cette méthode est vue comme un moyen d'activer les règles de résolution de la tâche de pilotage au cours de la réalisation de la tâche de surveillance du ciel, ce qui consiste en la sollicitation de l'habileté de permutation.

La troisième question de recherche posée est : l'utilisation de la mesure de l'empan complexe permet-elle de mesurer objectivement le coût cognitif des tâches aéronautiques ?

C'est pourquoi dans le chapitre 5, deux tâches de surveillance du ciel (l'une à vue, l'autre au moyen d'un radar) ont été combinées à une tâche de mémorisation d'éléments de navigation. Le protocole a reproduit le protocole d'empan complexe qui articule tâche de traitement (ici surveillance du ciel ou surveillance radar) et tâche de mémorisation (ici éléments de navigation). Ce protocole présente deux caractéristiques intéressantes compte tenu de notre approche théorique : d'une part, il repose sur la réalisation de situations en double tâche et sollicite ainsi l'habileté de permutation ; d'autre part, il permet de mesurer le coût cognitif des tâches selon le modèle *Time Based Resource Sharing Model* qui propose que plus la tâche de traitement est coûteuse plus l'empan sera faible.

## Chapitre 2 : Étude de terrain

### Identification des tâches exigeantes en aéronautique de combat.<sup>3</sup>



Photo 1. Photographie de deux Mirage 2000D au roulage. Un équipage constitué d'un pilote (en place avant) et d'un navigateur (en place arrière) est à bord de chaque avion.

### Résumé

#### Objectif de l'étude

Cette étude a pour objectif d'explorer les tâches vécues comme exigeantes par les équipages français de Mirage 2000D (voir photo 1), en situation.

<sup>4</sup>Ce chapitre est une adaptation de l'article en préparation : Froger, G. ; Blättler, C. ; Bonnardel, N. Identification des tâches exigeantes en aéronautique de combat.

## **Méthode**

34 participants âgés de 22 à 43 ans ont participé à cette étude au cours de 45 vols (11 réels et 34 simulés). Tous les participants étaient des membres d'équipage sur Mirage 2000D.

Un questionnaire original a été développé pour recueillir les tâches considérées comme exigeantes. Le questionnaire était rempli après le vol, réel ou simulé avec un observateur ayant participé au vol.

## **Résultats**

29 tâches exigeantes ont été identifiées. Certaines tâches sont exigeantes en elles-mêmes, d'autres sont exigeantes lorsqu'elles sont réalisées ensemble.

## **Conclusion et perspective**

L'identification subjective des tâches de nature à générer de la surcharge cognitive en vol permettra de construire des expériences articulant ces mêmes tâches en vue de développer des apprentissages centrés sur ces difficultés, dans le souci prioritaire de la sécurité des vols afin de maximiser les chances de survie des équipages. Le développement de méthodes d'objectivation de la surcharge cognitive adaptées à l'environnement d'un cockpit d'avion de chasse demeure un défi à relever.

# 1. Introduction

En aéronautique, et particulièrement en aéronautique de combat, les opérateurs ont à gérer de multiples tâches telles que le pilotage, la navigation, les communications radio, la situation tactique, l'environnement météorologique etc. L'ensemble de ces tâches doit souvent être géré simultanément et chacune d'elle évolue dans des contraintes temporelles singulières. Ainsi, le navigant est concentré sur le "très court terme" lorsqu'il vole en très basse altitude et que la tâche principale consiste à ajuster sa trajectoire en évitant le sol. Les phases de vol en haute altitude permettent de prendre en compte le "moyen terme", c'est-à-dire d'anticiper, de préparer, les prochaines phases de vol. Au-delà de la gestion des tâches prévues dans un environnement dynamique, peuvent surgir à tout moment de nouvelles tâches à gérer. C'est notamment le cas lors des pannes, des situations tactiques avec une urgence vitale comme lorsque les troupes amies sont sous le feu ou dans l'adaptation du vol à la météorologie évolutive. Dans le quotidien de l'entraînement des équipages, par exemple, les cumulonimbus sont des nuages où la circulation d'air et de grêle est très violente et très dangereuse pour tous les appareils volants et qui doivent donc absolument être évités.

Les navigants, dans la gestion de mission en vue de son accomplissement, sont des superviseurs de systèmes qui font appel à différentes modalités, à différents codages selon la catégorisation de Wickens (1984, 2000, 2002). Les informations qui leurs parviennent sont de différentes natures. Les informations peuvent être auditives, comme c'est le cas avec les communications radios ou le bruit de l'avion. Les communications se déclinent au sein de différents systèmes : le dialogue équipage entre les membres d'équipages d'un même avion, avec les équipages qui sont dans d'autres avions, avec les organismes de gestion et de contrôle de l'espace ou encore les communications tactiques avec les troupes déployées au sol. Les informations peuvent également être proprioceptives avec les vibrations, les variations thermiques et l'exposition aux accélérations (facteur de charge). En dehors du retour de force simulé dans le manche et des interactions haptiques avec les systèmes embarqués, les données proprioceptives sont fortement limitées en simulation. Enfin, les informations sont visuelles, symboliques au sein des différentes interfaces homme-système (dont la symbologie est différente en fonction des systèmes) ou subsymboliques avec la perception de l'environnement géographique et météorologique. Les membres d'équipages sont des opérateurs qui intègrent toutes ces informations externes en mémoire de travail, effectuent

des opérations de tri, de mise en relation entre elles dans le but de la réalisation de la mission. Un des buts de l'opérateur est de construire un monde interne cohérent à partir de systèmes qui ne communiquent pas. L'opérateur est donc au centre de l'interaction de tous ces systèmes discrets et il crée du sens en les interconnectant.

Au sein de ces systèmes dynamiques, il s'agit dans cette étude d'identifier les tâches dont la réalisation est difficile pour les navigants, c'est-à-dire les tâches les plus à même de produire de la surcharge cognitive. Cette identification des difficultés permettra de proposer à l'Armée de l'air et de l'espace de développer des dispositifs de formation qui les prennent en compte, dans le souci du maintien de la sécurité aérienne à son niveau optimum.

### **Escadron de chasse biplace : deux métiers - un équipage**

Au sein d'un escadron de chasse biplace, il existe deux métiers de navigants. Au cours d'un vol, les deux personnes qui exercent ces métiers constituent un équipage qui a de nombreuses tâches à réaliser, parfois simultanément. L'équipage partage donc ces tâches fréquemment. Cette répartition des tâches s'organise entre le pilote en place avant et le navigateur en place arrière. Le pilote est en charge du pilotage de l'avion, de la conduite à court terme de la mission (e.g. adaptation des trajectoires) et des communications radios avec les organismes de contrôle de la circulation aérienne. Le navigateur, en place arrière, est en charge de la préparation des systèmes et de l'armement, de la conduite de la mission à moyen terme (e.g. prochaines étapes du vol), du pilotage des munitions guidées et des communications radios tactiques. La responsabilité de la mission confiée incombe au responsable de mission qui est soit le pilote, soit le navigateur. Dans les escadrons de chasse français, il existe actuellement deux types d'avions biplace accueillant un pilote et un navigateur : le Rafale et le Mirage 2000D. Le contexte sociotechnique pris en considération ici concerne le Mirage 2000D.

Pour exécuter des missions opérationnelles, les membres d'équipage ou navigants bénéficient d'une formation qui est séquencée en une succession d'apprentissages de complexité croissante. Les navigants obtiennent une licence opérationnelle qui leur permet d'accomplir leur métier environ quatre ans après le début de leur formation aéronautique. Quelques années supplémentaires sont nécessaires pour atteindre la dernière étape de la formation qui est la qualification de chef de patrouille ou chef navigateur (environ huit ans après le début de formation). L'acquisition de compétences concerne le contenu la formation aéronautique proprement dite mais également l'adaptation à l'environnement de travail (ex : le cockpit) qui

est en constante évolution (nouvelles fonctionnalités, nouveaux systèmes). Les navigants de l'aéronautique de combat sont ainsi constamment confrontés à de nouvelles tâches.

## **Les tâches en aéronautique**

Dans la conduite d'un aéronef, les principales tâches des navigants, ainsi que les compétences et les connaissances qui y sont associées, sont multiples et complémentaires (Martin, Hourlier, & Cegarra, 2013). Faire voler un avion nécessite ainsi une attention constante (Boy, 2005) et consiste à conduire un processus dynamique et à risques (Martin et al, 2013). Une situation est considérée comme dynamique lorsqu'elle évolue en dehors des actions de l'opérateur et si l'évolution spontanée de cette situation peut être imprévisible (Hoc, Amalberti, Cellier, & Grosjean, 2004). Ces situations dynamiques sont soumises à des facteurs relevant du monde extérieur à l'avion (météorologie, oiseaux, trafic aérien) ou du monde intérieur à l'avion (évolution du carburant, pannes, etc.). Il est primordial que les équipages aient acquis des automatismes, des patterns de répartition du focus attentionnel du monde extérieur et du monde intérieur afin de pouvoir s'adapter à ces situations dynamiques (Boy, 2005).

Au sein de ces situations dynamiques, c'est-à-dire qui évoluent sans action de l'opérateur, les navigants réalisent des tâches discrètes, présentées soit de manière séquentielle, soit de manière parallèle. Un exemple de gestion parallèle est la réalisation simultanée de la navigation, du pilotage et de communications radios. Un exemple de gestion séquentielle est la succession des communications radios avec la tour de contrôle puis avec l'avion équipier (ces communications ne peuvent pas être réalisées simultanément). Les équipages perçoivent en effet de nombreuses données aux origines multiples. Ces données peuvent provenir du monde extérieur à l'avion, que ce soit l'environnement naturel (relief, météorologie) ou l'environnement construit (espaces aériens, trafic aérien), et du monde intérieur à l'avion que nous avons détaillé. Les navigants doivent réaliser leur mission dans cet ensemble conséquent de données qui interagissent.

Selon Martin, Hourlier et Cegarra (2013), le pilote et le navigateur sont impliqués dans deux modes de contrôle différents :

«- Le contrôle de conformité aux attentes (conduite de processus). Les membres d'équipage se créent une représentation mentale du futur probable de la situation afin d'économiser leurs ressources cognitives. Leur stratégie consiste à vérifier la conformité de l'état du système par rapport à leur représentation initialement construite.

- La recherche de cohérence en situation dégradée (résolution de problème). »

La conduite de missions de combat implique la réalisation d'un ensemble de tâches discrètes, c'est-à-dire indépendantes les unes des autres. Ces tâches complémentaires et indispensables à la réalisation de la mission sont d'autant plus concurrentielles lors de situations sous fortes contraintes temporelles. La résistance de l'opérateur à cette dimension concurrentielle, c'est-à-dire la capacité de l'opérateur à réaliser plusieurs tâches simultanément, s'appuie sur une priorisation des tâches. Il est important de souligner que cette priorisation évolue au cours de la mission et en fonction du temps disponible.

Afin d'acquérir un niveau de compétence permettant d'atteindre les objectifs d'une mission opérationnelle, les équipages bénéficient d'une formation qui leur permet dans un premier temps d'intégrer ce qui est appelé les "basics". Les basics correspondent à des compétences « socle » relatives à des situations, étudiées de manière dissociée, que les équipages peuvent être amenés à rencontrer quel que soit le vol (ravitaillement en vol, déroutement, gestion de panne, vol en formation...). Les équipages complètent ensuite leurs compétences en gestion tactique, en responsabilité de mission et de patrouille de plusieurs avions. Enfin, l'intégralité des tâches effectuées en aéronautique de combat se réalise dans l'acceptation des risques aéronautiques et de guerre.

Au cours d'un vol, de nombreuses tâches sont à réaliser dans le respect des objectifs de formation ou de maintien en compétence pour les vols d'entraînement, dans le respect des objectifs militaires pour les vols opérationnels, et dans le respect de la sécurité des vols pour tous les vols. Au cours du vol, la réalisation de tâches présentées simultanément est de nature à créer de la surcharge cognitive pour les membres d'équipage. Des modèles théoriques éclairent sur ces difficultés.

### **Les tâches simultanées sous contrainte temporelle**

La réalisation de tâches discrètes présentées simultanément sous contrainte temporelle est complexe pour l'être humain. Par exemple, la conduite automobile sur une route sinueuse mal éclairée, de nuit, sous la pluie, est difficilement compatible avec une conversation téléphonique main libre et le suivi des embranchements à prendre dans le respect des indications du GPS. Le modèle 4D (Wickens, 1984, 2000, 2002) éclaire sur les raisons de ces difficultés. Les tâches y sont classiquement décomposées en trois étapes : la perception, la

cognition et la réponse. Les stimuli perçus y sont classifiés selon une modalité auditive ou visuelle comportant des informations de nature spatiale ou verbale. Les réponses y sont soit manuelles et spatiales, soit vocales et verbales (voir figure 20). Wickens propose que les tâches étant les plus proches, c'est-à-dire partageant la même classification, sont de nature concurrentielle. Par exemple, deux tâches impliquant la perception auditive d'informations verbales (e.g. deux conversations simultanées) seront plus concurrentielles, c'est-à-dire interféreront plus, qu'une tâche auditive et une tâche visuelle (e.g. participer à une conversation et suivre une balle de tennis).

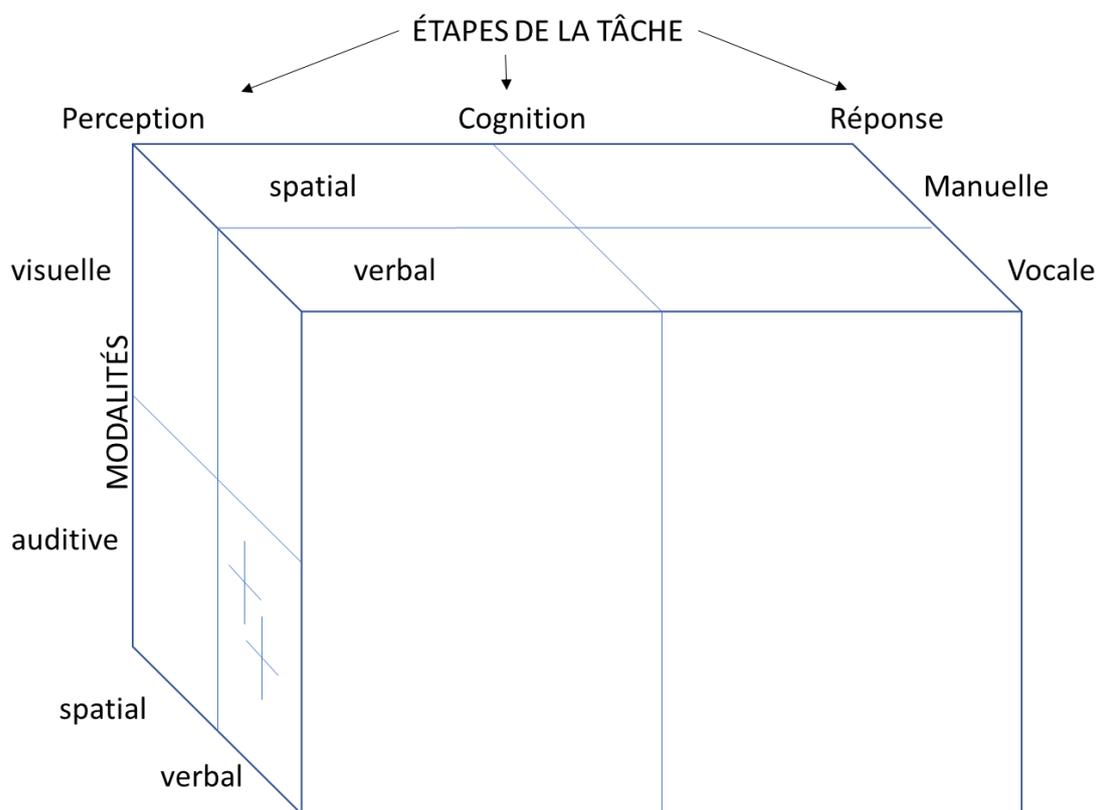


Figure 20 – d'après le modèle 4D de Wickens (1984). Plus les tâches partagent des proximités de classification, c'est-à-dire si elle se situent dans les mêmes subdivisions du cube, plus elles seront difficiles à exécuter ensemble. Par exemple, deux conversations à suivre en même temps se situent dans la même subdivision de perception, ce qui est matérialisé par les deux croix dans la figure. En d'autres termes, plus les tâches sont proches, plus elles sont concurrentielles.

Ce modèle permet de comprendre pourquoi la réalisation de certaines tâches discrètes présentées simultanément est particulièrement difficile. Le but de cette étude est d'identifier les tâches vécues comme exigeantes par les opérateurs de l'aviation de chasse.

## 2. Participants

Au cours de 45 missions, 34 navigants (17,17% de la population totale des navigants de la base aérienne 133) ont été interrogés, dont 4 femmes et 30 hommes, d'âge compris entre 22 et 43 ans. Certains navigants ont participé à plusieurs missions. Les participants étaient des pilotes et navigateurs de Mirage 2000D de toutes les qualifications : PC, NC, PO, NO, SCP, SCN, CP, CN4. Ils ont été interrogés par un observateur ayant participé à la mission (en vol réel ou en vol simulé) dans l'heure qui a suivi la fin de la mission.

## 3. Protocole

Une présentation générale de l'objectif de l'étude a été faite à l'ensemble des membres d'équipages présents sur le site de l'étude. Un expert, un chef navigateur ou un chef moniteur simulateur (c'est-à-dire de la plus haute qualification délivrée) et disposant d'au moins 5 ans d'expérience sur Mirage 2000D était en charge de l'observation du vol réel ou simulé puis réalisait l'entretien permettant de remplir le questionnaire (voir figure 21).

Préalablement à chaque mission observée (une mission se décompose en briefing, puis vol, puis débriefing), que la mission soit réelle (i.e. vol réel) ou simulée (i.e. effectuée au simulateur), une nouvelle présentation des objectifs de l'étude était réalisée au profit des participants. La mission était observée par un expert ayant participé à la mission, conformément à une technique d'observation participante ou désengagée. Au cours du vol, l'expert observateur identifiait les moments où les participants semblaient en difficulté sur une feuille de papier (facilement transportable dans la cabine étroite du Mirage 2000). Le questionnaire était ensuite rempli au plus tard dans l'heure qui suivait la fin de mission (i.e. après le débriefing) avec l'expert observateur.

Le remplissage du questionnaire se déroulait en plusieurs étapes. Au cours de la première étape, l'expert lisait la première question et écrivait les réponses du participant après les avoir reformulées ; puis il lisait la deuxième question et écrivait les réponses du participant après les avoir reformulées.

La deuxième étape reposait sur la mise en application de la technique dite du « Pourquoi ? Comment ? » (Bisseret, Sébillotte & Falzon, 1999). Par exemple, l'observateur indiquait au

---

<sup>4</sup>PC, NC, PO, NO, SCP, SCN, CP, CN : pilote de combat, navigateur de combat, pilote opérationnel, navigateur opérationnel, sous-chef de patrouille, sous-chef navigateur, chef de patrouille, chef navigateur

participant : « j'ai observé que tu mettais plus de temps que d'habitude pour répondre au message radio au moment qui précédait l'arrivée sur la zone d'objectif, si tu t'en souviens est-ce que tu peux m'expliquer pourquoi ? ». Les verbalisations du participant étaient reformulées puis écrites.

Une fois le questionnaire rempli, l'observateur et le participant lisaient ensemble les retranscriptions du participant afin de s'assurer de leur conformité.

Une fois les 45 missions observées, la partie identification des variables de tâches exigeantes a pris la suite. Chaque variable tâche exigeante identifiée devait être identique d'un participant à l'autre, c'est-à-dire que chaque tâche exigeante identifiée chez les pilotes et les navigateurs avait la même définition pour chacun d'entre eux.

Date :				Mission :			
Surnom :		Age :		Sexe :		qualification :	
HDV totales :		HDV 2000D :		Ancienneté dans l'armée de l'air :			
<p>1) Au cours de la mission, quelles sont les tâches qui ont représenté la charge de travail la plus élevée (exigence mentale et/ou pression temporelle) ?</p> <p>2) Avez-vous constaté des tâches dont l'exécution simultanée pouvait être particulièrement difficile/impossible (avec éventuellement une nécessité de choix dans la tâche à réaliser) ?</p>							

Figure 21 - questionnaire d'identification des tâches exigeantes rempli dans l'heure suivant la fin de la mission. Le bandeau du questionnaire comprend les informations relatives au navigant. La question (1) permettait d'identifier les tâches exigeantes en elles-mêmes. La question (2) permettait d'identifier les difficultés ressenties par le participant lors de la réalisation de deux tâches. Le questionnaire était rempli par l'observateur, après reformulation, puis relu par le participant pour validation.

## 4. Résultats

Les résultats que nous présentons portent sur 45 missions, dont 11 missions de vol réel et 34 missions de simulation.

Chaque invariant de tâche exigeante est associé à une description des exigences cognitives liées à cette tâche. La description de l'activité s'articule autour de l'action générale entreprise (colonne buts) et des processus cognitifs mis en œuvre dans la réalisation de cette activité (colonne sous-but). Le récapitulatif des tâches identifiées comme exigeantes est présenté dans le tableau 1 ci-dessous.

Les tâches peuvent être exigeantes de manière isolée, c'est-à-dire que l'activité mise en œuvre pour réaliser cette tâche indépendamment de toute autre tâche a été associée à une charge de travail élevée en termes d'exigence mentale et/ou de pression temporelle.

Les tâches peuvent être exigeantes de manière simultanée, c'est-à-dire que l'activité mise en œuvre pour réaliser simultanément deux ou plusieurs tâches a été considérée comme particulièrement difficile voire impossible.

Tableau 1. Description des variables "tâches exigeantes"

Variables	Description	Buts	Sous-but
ENV	gestion de l'environnement	gérer les évolutions au sein d'une zone plan horizontal et vertical	Percevoir - identifier: se représenter une situation spatiale évolutive : 3D, de la zone, la position présente et future de l'avion Décider – agir : sur une gestion de trajectoire avion en fonction de la représentation construite
TRAJ	gestion de trajectoire	identifier une trajectoire plan H et Z compatible avec les contraintes de la mission et de l'avion	identifier : les contraintes environnementales et d'avion élaborer : une stratégie de navigation dans le respect de ces contraintes
MTO	gestion météorologique	adapter le profil de vol prévu en fonction de la météo	comprendre : les évolutions de la situation météo par rapport à la situation prévue, élaborer : en cas de modification défavorable la recherche d'alternatives : nouvelle trajectoire, déroutement, calcul pétrole...
PIL	pilotage	piloter l'avion manuellement dans le respect de son enveloppe de vol en fonction des	piloter : l'avion dans l'enveloppe de vol prévue manuellement

		charges sous voilures, et dans le respect des consignes imposées par le contrôle / procédure	
PIL TBA	pilotage TBA/TTBA	piloter à une hauteur inférieure à 150m voire 75m et appliquer les procédures vol à vue : IFF, auto-information	piloter : le pilotage de l'avion (feed-back des paramètres de vol via la visualisation tête haute) surveiller : le ciel
NAV	navigation	naviguer à la carte/photographie : reconnaître un objet selon une image de cet objet prise sous un angle différent	identifier : la reconnaissance d'objets (villes, forêts, ...) perçus tardivement : corrélation visualisation de la carte et visualisation du sol surveiller : le ciel
NAV TBA	navigation TBA/TTBA	naviguer à la carte à une hauteur inférieure à 150m voire 75m et appliquer les procédures vol à vue : IFF, auto-information	identifier : la reconnaissance d'objets (villes, forêts, ...) perçus tardivement : corrélation visualisation de la carte et visualisation du sol surveiller : le ciel
PAT	gestion de la patrouille	gérer ou comprendre la position dans l'espace de 1 à 3 avions (formation, vitesse, altitude, pente, inclinaison...)	Se représenter une situation spatiale évolutive : la surveillance de la position des avions équipiers, dans le respect des formations briefées calculer : gestion des contraintes de pétrole de chaque appareil au sein de la patrouille communiquer : communications radios régulières d'actualisation des informations des équipiers (objectifs traités oui/non, pétrole restant...)
IMP	impromptu	adapter le profil de vol en fonction d'éléments surgissant imposés par le responsable de la mission : nouvelle trajectoire, calcul pétrole et prise en compte de la météo	comprendre : l'objectif à atteindre élaborer : l'élaboration d'une stratégie permettant d'atteindre cet objectif communiquer : transmission radio de cette stratégie aux autres membres de la patrouille
ANT	anticipation des phases futures du vol	réfléchir à un plan permettant de s'adapter à un élément surgissant	élaborer/adapter : en vol une stratégie afin de réaliser les objectifs de la mission
DRT	déroutement	se poser sur un terrain suite à une panne réelle ou simulée au sein de la patrouille	élaborer : l'identification du terrain (piste d'atterrissage) où dérouter l'avion/la patrouille le plus adéquat élaborer : adapter la trajectoire permettant de rejoindre ce terrain

			calculer : actualiser le pétrole nécessaire calculer : vérifier que la masse prévue à l'atterrissage est inférieure à la masse maximale autorisée
COMP	compréhension	comprendre une communication complexe	comprendre : une stratégie élaborée par autrui en vol, et transmise par radio
MEM	mémorisation	retenir une procédure communiquée par radio jusqu'à son exécution	mémoriser : une procédure/une stratégie transmise par radio
RDO	gestion de la radio	recevoir et transmettre des communications précises (possibilité de saturation de fréquence)	comprendre et communiquer : possibilité de communications multiples, fenêtre de parole réduite
PARA	surveillance des paramètres	vérifier le maintien de l'avion dans son enveloppe de vol et le respect des éléments prévus (vitesse, altitude, pente, inclinaison)	surveiller : l'évolution des paramètres de vol adapter : le pilotage pour rester dans l'enveloppe de vol prévue
CIEL	surveillance du ciel	regarder et chercher à l'extérieur des éléments ayant une trajectoire potentiellement conflictuelle et/ou un objectif	surveiller : le ciel à la recherche d'obstacles ou d'éléments conflictuels
REC	réalisation de recalages inertiels	préparer et réaliser des recalages du système de navigation inertiel	appliquer : procédure de préparation du système de navigation identifier : des objets à vue ou sur une piste radar appliquer : procédure de recalage
RAD	travail radar	gérer l'identification radar d'un appareil et éventuellement une procédure de suivi de cet appareil	identifier représentation spatiale évolutive
SYST	gestion du système	préparer le système de navigation et d'armement : <i>timing, waypoints, armement, ...</i>	appliquer : procédure de préparation du système d'armement
SDT	suivi de terrain	surveiller et gérer le système lors d'une mission de suivi de terrain (potentiellement en vol sans visibilité, à très grande vitesse : 1000 km/h, et très basse hauteur : 100m)	surveiller : l'évolution des paramètres de vol et du système en navigation suivi de terrain appliquer : des procédures spécifiques à la mission de suivi de terrain en respectant un timing contraignant

TIR réel	réalisation d'une passe de tir	délivrer de l'armement air-sol réel sur un champ de tir : vérifier le mode de tir prévu, coordonnées de l'objectif, vitesse, altitude	identifier : reconnaissance d'objets/cibles par rapport à une photo aérienne ou une carte piloter : pilotage dans le respect de l'enveloppe prévue pour une passe de tir appliquer : procédure de préparation du système d'armement
TIR simulé	réalisation d'une passe de tir	délivrer de l'armement air-sol fictif sur un objectif : vérifier le mode de tir prévu, coordonnées de l'objectif, vitesse, altitude	identifier : reconnaissance d'objets/cibles par rapport à une photo aérienne ou une carte piloter : pilotage dans le respect de l'enveloppe prévue pour une passe de tir appliquer : procédure de préparation du système d'armement
PTL	gestion du pétrole	identifier le pétrole restant disponible et le comparer avec celui prévu pour réussir la mission, adapter le profil de vol (monter par exemple afin d'économiser du kérosène) si nécessaire peut entraîner des contraintes de gestion de zone et de communication radio	identifier : comparer le pétrole disponible avec le pétrole prévu calculer : en fonction de la consommation instantanée et du temps de trajet prévu élaborer : une stratégie de réalisation de la mission dans le respect des minima carburant
CALC	calcul	faire des opérations de calcul mental	
TIMING	gestion d'un timing précis	respecter des contraintes temporelles précises	surveiller : l'évolution de l'avance/retard sur les points de navigation élaborer : une stratégie de "mise à l'heure" changement de trajectoire, accélération
NOTE	copier des informations	comprendre une communication et écrire les informations	
TAC	compréhension d'une situation tactique	avoir une <i>situation awareness</i> (SA) en adéquation avec la situation réelle qui concerne l'équipage	comprendre : la situation dans son ensemble et celle qui concerne l'équipage ou la patrouille dans l'immédiat et dans le futur par radio et/ou liaison de donnée tactique et/ou information contre-mesure avoir la SA

TEMPO	pression temporelle	hiérarchiser et réaliser des actions sous forte contrainte temporelle	comprendre : l'importance de chaque problématique hiérarchiser : ces problématiques élaborer : une stratégie de résolution de ces problématiques en temps contraint appliquer : la stratégie élaborée
PRIO	gestion des priorités	hiérarchiser en temps contraint des tâches à effectuer et les réaliser par ordre de priorité (urgence, timing)	comprendre : l'importance de chaque problématique hiérarchiser : ces problématiques élaborer : une stratégie de résolution dans le temps
PAN	gestion de panne	identifier la panne 1 procédures critiques 2 trouver lire et appliquer la check 3 adaptation éventuelle du profil de vol en fonction des contraintes liées à la panne (DRT, altitude max, ...)	identifier : corréler les informations visuelles et sonores de l'IHS avec une panne appliquer : une procédure d'abord réflexe (nécessité de connaissance) puis lecture/action de la check list
PIL PAN	pilotage d'un avion en panne	piloter manuellement ou à l'aide de moyen de secours (TRIM, SEC CARB) ou sans les moyens d'aide au pilotage (VTH) suite à une panne	piloter : l'avion dans l'enveloppe de vol prévue manuellement et dans une situation dégradée
CHECK	gestion de la checklist	trouver la page en lien avec la panne et la lire	identifier : la panne subie identifier : la page correspondante dans la check list appliquer : la procédure de la check list
PROG	apprentissage – progression	assimiler et restituer des compétences nouvelles (potentiellement dans des domaines disjoints)	comprendre : les méthodes à utiliser assimiler : appliquer les méthodes intégrer : appliquer différentes méthodes
PAIX	gestion environnement, radio, trajectoire	identifier une trajectoire plan H et Z compatible avec les contraintes de l'environnement et de l'avion, communications radio (avec les organismes de gestion des zones, avec les appareils conflictuels)	identifier : les contraintes environnementales, d'avion, de trajectoires conflictuelles élaborer : une stratégie de navigation dans le respect de ces contraintes
SV	sécurité des vols	réaliser ou faire réaliser une action primordiale pour la sauvegarde des équipages/appareils	identifier : une menace à court terme pour la sécurité des équipages élaborer : une stratégie de

			sauvegarde appliquer : cette stratégie
--	--	--	---

Au sein de cet ensemble des tâches vécues comme exigeantes, certaines sont spécifiques à des situations singulières comme la gestion de panne (PAN, PIL PAN, CHECK) ou la délivrance d'armement (TIR réel, TIR simulé) alors que d'autres sont centrales dans l'activité aéronautique car effectuées au cours de chaque vol comme la surveillance du ciel (CIEL), quel que soit le niveau de progression des navigants. Il est également intéressant de constater que des tâches très souvent répétées au cours de la formation et donc normalement automatisées, comme le calcul mental (CALC) ou des tâches qui sont très simples lorsqu'elles sont réalisées au sol comme prendre des notes (NOTE), sont pourtant vécues comme exigeantes lorsqu'elles sont réalisées au sein de l'environnement très singulier que constitue l'avion de chasse.

Aussi, dans le cadre des études qui vont suivre, nous allons nous focaliser sur la tâche centrale de surveillance du ciel (CIEL) en situation de double tâche. Car l'enjeu est de mettre en œuvre des méthodes d'apprentissage permettant de maximiser le temps passé à surveiller le ciel, ce qui sera analysé et commenté par la suite.



Photo 2. Simulateur de Mirage 2000D. Photo de gauche : la « boule » vue de l'extérieur. Photo du centre : pupitre de gestion du vol et des pannes qui seront implémentées au cours du vol simulé. Photo de droite : vue de l'intérieur de la « boule ». Un vrai cockpit de Mirage 2000D est à l'intérieur, monté sur vérins hydrauliques afin de maximiser le réalisme. La scène de vol est projetée sur un écran sphérique au sein duquel est situé le cockpit, ce qui favorise l'immersion (jusqu'à créer des illusions sensorielles).

## 5. Discussion

L'effort ou le coût nécessaire à la réalisation d'une tâche dans un contexte spécifique peut être mesuré au moyen de différentes méthodes, dont les questionnaires ou le recueil de paramètres électro-physiologiques (Rubio, Diaz, Martin, & Puente, 2004).

Le recueil des informations effectué s'est appuyé sur un moyen léger à mettre en œuvre, le questionnaire. L'interviewer et l'interviewé qui remplissaient le questionnaire ensemble,

avaient l'un et l'autre participé au vol. Les variables recueillies étaient stables après 35 questionnaires sur 45 au total, en d'autres termes le contour des tâches verbalisées comme exigeantes n'évoluait plus après l'exploitation de 35 questionnaires.

L'entièreté des tâches explorées l'était sous le prisme de leur exigence. Cette exigence pouvait être intrinsèque à la tâche ou bien être due à la simultanéité de plusieurs tâches. En effet, certaines tâches font appel à des modalités perceptives proches ce qui entraîne des sollicitations cognitives concurrentielles (Wickens & Hollands, 2000) et sont donc vécues comme exigeantes lorsqu'elles sont à réaliser en même temps. Les résultats obtenus quant aux tâches exigeantes à réaliser simultanément sont consistants avec le modèle 4D de Wickens (1984, 2000, 2002). Il est notamment difficile de concilier des informations internes et externes au cockpit. La surveillance de l'environnement à proximité du sol avec la gestion de système, repose sur la perception de stimuli visuels dans le cadre de deux tâches différentes. La perception ne peut donc être réalisée que de manière séquentielle au moyen d'une permutation répétée, incessante, qui a été considérée par les participants comme particulièrement complexe. La complexité des tâches présentées simultanément peut s'envisager simplement grâce à l'analogie avec la conduite automobile rapide, intervenant sur une route sinueuse et tout en ayant une correspondance par SMS, ou en changeant régulièrement la destination sur son système GPS.

Depuis les années 80s, l'évolution des cockpits en aéronautique est caractérisée par une variation des tâches à effectuer par les membres d'équipage. Cette variation continue s'accompagne notamment par un nombre croissant de tâches exigeantes cognitivement à effectuer de façon synchrone, sous fortes contraintes temporelles. En raison des limites des ressources attentionnelles (e.g., Moray, 1967 ; Kahneman, 1973) et de la charge de travail rapidement importante lors du traitement d'informations de natures très variées (Wickens, 2008), la masse d'informations à traiter en provenance des IHM des cockpits modernes est telle qu'elle peut être de nature à nuire au traitement de ces mêmes informations (Casner, 2006).

Le système de combat aérien du futur (SCAF) s'inscrit pleinement dans cette problématique. La *gestion de la situation tactique* et la *gestion des communications* font partie des tâches les plus exigeantes auxquelles sont confrontés les membres d'équipage d'avions de combat.

Ces tâches particulièrement exigeantes seront au cœur des tâches à accomplir par les opérateurs du SCAF. C'est pourquoi il est particulièrement important de développer dès maintenant une formation permettant aux opérateurs de déployer des stratégies de gestion appropriées afin de rendre le SCAF pleinement opérationnel.

D'autres tâches présentent un enjeu particulier au regard de la formation et au regard de l'avenir de l'aviation de chasse. La présence de la *tâche de surveillance du ciel dans les tâches simultanées*, qui correspond à l'activité de surveiller le ciel afin de détecter un éventuel obstacle est en effet une tâche avec un enjeu vital et central dans l'activité des navigants dès le début de la formation.

La limite principale de la méthode de questionnaire que nous avons utilisée est qu'elle repose sur l'hypothèse que le sujet est capable d'évaluer sa propre charge cognitive. L'avantage, important dans ce contexte aéronautique, est qu'elle n'est pas intrusive par rapport à la tâche réaliser. Cegarra et Chevalier (2008) soulignent l'intérêt de croiser les différents types de mesures de charge mentale afin de s'affranchir des limites de chaque méthode. Il est donc important de réfléchir à des moyens de mesurer la charge cognitive qui soient compatibles avec les contraintes imposées par un environnement tel que celui de le cockpit d'un avion de chasse.

Les voies de poursuite de ce travail concernent, d'une part, une objectivation plus fine de la charge cognitive requise par chacune des tâches vécues comme exigeantes, au moyen d'autres outils qui devront être compatibles avec les contraintes de l'environnement, et d'autre part le développement de dispositifs de formation permettant d'ores et déjà de gérer ces tâches générant de la surcharge cognitive tout en commençant par celles en lien direct avec la survie à court terme de l'équipage. En ce sens, il paraît indispensable de commencer par *la tâche de surveillance du ciel* dont le but est de détecter les risques de collision et qui est présente tout au long de l'activité des navigants.

## Chapitre 3 : Expérience 1

# L'apprentissage d'une répartition visuo-attentionnelle pour gérer les situations multitâches<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Ce chapitre est une adaptation de l'article publié : Froger, G., Blättler, C., Dubois, E., Camachon, C., & Bonnardel, N. (2018). Time-Interval Emphasis in an Aeronautical Dual-Task Context: A Countermeasure to Task Absorption. *Human factors*, 60(7), 936-946.

# Résumé

## Objectif

Nous avons testé une méthode de formation destinée à prévenir les comportements aéronautiques dangereux (c'est-à-dire lorsque trop de temps est passé à regarder à l'intérieur du cockpit) induits par le cockpit moderne, en apprenant aux individus à effectuer une tâche complémentaire à la tâche de sécurité obligatoire "voir et éviter" dans un intervalle de temps limité.

## Contexte

Les activités aéronautiques imposent aux équipages la gestion simultanée de plusieurs tâches simultanément dans un environnement ergonomique en constante évolution. "Voir et éviter" reste l'une des principales tâches de sécurité pendant le vol à vue. Cependant, les cockpits modernes présentent des tâches exigeantes qui peuvent capter le regard pendant un temps suffisamment long pour nuire à l'exécution de cette tâche de sécurité. De nombreuses études en laboratoire ont montré la pertinence des méthodes d'entraînement pour gérer les situations de double tâche et estimer les intervalles de temps.

## Méthode

Un environnement virtuel spécifique a été développé pour exposer les participants à une situation de double tâche dans laquelle une notification relative aux intervalles de temps était fournie en temps réel. Deux types d'entraînement avec notification ont été testés : un type permissif qui permettait aux participants de poursuivre la tâche à l'intérieur du cockpit au-delà de la limite de temps, et un type non permissif qui ne le permettait pas.

## Résultats

La meilleure acquisition de l'intervalle de temps, avec rétention jusqu'à 24 heures plus tard, a été observée dans la condition non permissive, alors que les performances de la tâche immédiatement après les sessions de formation étaient équivalentes dans toutes les conditions.

**Conclusion** : L'entraînement avec notification temporelle semble être un moyen efficace de promouvoir la résistance à l'absorption tout en préservant les performances de la

tâche. La transférabilité des compétences d'estimation de l'intervalle de temps doit encore être testée.

**Applications** : La plupart des domaines d'application de la résistance à l'absorption (aviation, transport maritime, ferroviaire, routier, etc.) pourraient bénéficier de ce type d'entraînement pour gérer les situations multitâches.

# 1. Introduction

"Voir et éviter" (c'est-à-dire détecter les objets potentiellement dangereux dans l'air) est considéré comme l'une des principales tâches de sécurité dans les activités aéronautiques. Les membres d'équipage doivent gérer simultanément cette tâche et d'autres tâches complexes dans un environnement dynamique. Comme cela a été décrit précédemment, une situation est définie comme dynamique si elle peut changer sans intervention humaine et si son évolution est imprévisible (Hoc, Amalberti, Cellier & Grosjean, 2004). Pour cette raison, piloter un avion nécessite une attention constante (Boy, 2005). Cependant, les postes de pilotage modernes ("glass cockpit", par exemple) ont des caractéristiques (Funk, Lyall, Wilson, Vint & Niemczyk, 1999; Parasuraman et Riley, 1997) qui peuvent perturber l'attention. Le but de la présente étude était donc de tester une contre-mesure pédagogique favorisant la tâche "voir et éviter".

Les situations aéronautiques sont dynamiques à la fois en dehors du cockpit, que ce soit dans l'environnement naturel (ex : météo, oiseaux) ou dans l'environnement artificiel (ex : circulation aérienne), et à l'intérieur (ex : panne moteur). Les équipages doivent répartir leur attention entre ces différents aspects des situations dynamiques, avec des patterns d'attention (Boy, 2005) adaptés à ces mondes extérieurs et intérieur. La répartition de l'attention peut être perturbée par la masse de données fournies par le cockpit moderne, qui peut, par exemple, entraver le stockage d'informations importantes (cf., par exemple, Casner, 2006). Une des conséquences de cette absorption est que l'attention est focalisée trop longtemps à l'intérieur du cockpit (Johnson, Wiegmann & Wickens, 2006 ; Rudisill, 1994). Afin de lutter contre de tels phénomènes, le National Transportation Safety Board (NTSB, 2010) et la Federal Aviation Administration recommandent tous deux de dispenser une formation spécifique pour lutter contre les problèmes induits par les glass cockpits (Schumacher, Blickensderfer & Summers, 2005).

Dans la présente étude, nous examinons l'acquisition d'une règle (consistant à ne pas passer plus de 2 secondes de temps la tête dans la cabine) enseignée dans les écoles d'aviation pour éviter que l'attention ne soit trop longtemps allouée à l'intérieur du cockpit. Cette règle est basée sur la recommandation du manuel d'instructions aéronautiques (AIM 8.1.6.C) selon

laquelle "le temps passé par le pilote à effectuer des tâches visuelles à l'intérieur de la cabine ne doit pas représenter plus de 1/4 à 1/3 » (Federal Aviation Administration, 2017). Les instructeurs de vol ont deux principales méthodes pour signaler une violation de la règle des 2 secondes. La première est auditive (par exemple, en donnant oralement l'information "regardez dehors") et la seconde visuelle (par exemple, en plaçant une carte devant l'affichage du cockpit, obligeant l'élève à lever les yeux et à regarder à l'extérieur). En ce qui concerne notre travail, nous avons voulu tester une méthode d'entraînement à une répartition visuo-attentionnelle ("gaze patterns") dans un environnement simulé reproduisant certains aspects de l'activité aéronautique. Dans cet environnement simulé, nous avons automatisé les notifications de la violation de la règle des deux secondes (ou "2s rule").

Nous avons mis en place et comparé deux variantes d'une méthode pour enseigner aux équipages la possibilité d'estimer les intervalles de temps dans un environnement simplifié imitant certains aspects de l'activité de vol. Cette méthode est basée sur les notifications visuelles, qui s'est avérée induire un apprentissage efficace dans une situation dynamique (Gopher, 1989) et elle cible exclusivement le temps passé à regarder à l'intérieur de la cabine. La première notification que nous avons testée était permissive, de la même manière que lors de la consigne donnée par les instructeurs de "regarder dehors". La deuxième notification testée était non permissive, en ce sens qu'il n'était pas permis aux participants de maintenir le regard en cabine, comme c'est le cas lorsque les instructeurs placent une carte devant l'affichage accessible en "tête basse" ("head-down").

Les travaux théoriques sur l'apprentissage, les tâches doubles et l'estimation de l'intervalle de temps permettent de penser qu'il est possible d'améliorer l'acquisition de cette règle des 2s. Pour Sweller (1994), le processus d'apprentissage permet aux individus de stocker des schémas automatisés dans une mémoire à long terme. Un schéma est une construction cognitive qui organise des éléments d'information en fonction de la manière dont ils seront traités. Dans le contexte aéronautique, où les équipages doivent répartir leur attention visuelle entre l'intérieur et l'extérieur du cockpit, les procédures d'attention visuelle se voient attribuer une organisation spatio-temporelle par un schéma spécifique à cette situation. Par exemple, alors que les novices doivent démarrer le circuit visuel en pensant consciemment à regarder à l'intérieur, en regardant dehors, etc., des membres expérimentés effectuent ce

circuit visuel sans effort (Rasmussen, 1983; Sweller, 1994). L'automatisation (Logan, 1988) est le résultat d'un processus graduel basé sur la répétition (c'est-à-dire une pratique extensive). Pour Logan (1988), lorsque les novices répètent une tâche, ils continuent d'utiliser un algorithme général jusqu'à ce qu'ils trouvent une solution à cette tâche, qui est ensuite stockée dans la mémoire à long terme. Par la suite, s'ils rencontrent une tâche similaire, ils peuvent ignorer le processus d'algorithme général et recourir directement à cette solution stockée en mémoire à long terme. Cela nécessite moins de ressources attentionnelles et est également assez efficace dans le temps. Le traitement basé sur des schémas permet aux individus de traiter de grandes quantités d'informations en liant des éléments séparés via un mécanisme de *chunk* (Gobet et Simon, 1996). Le processus d'automatisation permet aux individus de manipuler des schémas sans surcharger la mémoire de travail (Logan, 1988; voir aussi le *episodic buffer* de Baddeley (2000)). Cela leur permet également de gérer des tâches supplémentaires dans le même laps de temps.

Néanmoins, selon Wickens (2002), deux tâches qui exigent simultanément les mêmes ressources (par exemple, deux tâches visuomotrices) ne peuvent être effectuées en parallèle que très difficilement. Passer d'une tâche à l'autre est alors la seule façon de gérer cette situation de double tâche. C'était la même chose pour notre situation, où la tâche "voir et éviter" et la tâche à l'intérieur du cockpit ne pouvaient pas être effectuées en parallèle. Bien que les deux tâches fassent appel à deux mécanismes spécifiques et indépendants, elles sont liées par un troisième mécanisme : la coordination. Dans notre étude, cette coordination consistait à limiter le temps passé à effectuer la tâche à l'intérieur du cockpit.

Strobach, Salminen, Karbach et Shubert (2014) ont supposé que l'exposition répétée au *switching* dans une situation de double tâche entraînait l'instanciation combinée d'ensembles d'informations provenant des deux tâches, et donc une coordination améliorée pour gérer simultanément les deux tâches. Liepelt, Strobach, Frensch et Schubert (2011) ont qualifié cette coordination de coordination inter-tâches (ITC).

Si la règle des 2 secondes doit être respectée, la régularité temporelle doit être incluse dans l'ITC, afin de parvenir à l'organisation spatio-temporelle requise de l'attention. Cette règle est basée sur la capacité à estimer correctement 2 secondes lors de l'exécution de différentes

tâches, en particulier les tâches à l'intérieur du cockpit. Cette compétence, liée à la capacité d'estimer un temps donné, est définie par Taatgen, van Rijn et Anderson (2007) comme l'estimation de l'intervalle de temps (*time interval estimation* ou TIE). Ces auteurs ont montré que la TIE peut être apprise (voir aussi Matthews & Meck, 2014; Penney, Allan, Meck et Gibbon, 1998; van Rijn, 2016; Vierordt, 1868) et automatisée dans une situation double tâche. L'acquisition de la TIE suit ainsi les processus d'apprentissage décrits par Sweller, basés sur l'acquisition et l'automatisation du schéma.

Pris ensemble, ces résultats sur l'apprentissage en situation double tâche et sur la TIE suggèrent qu'une formation approfondie pourrait conduire à l'intégration de TIE dans l'ITC.

## **Objectifs de l'étude**

Le but de la présente étude est de tester l'effet d'une notification visuelle non permissive *versus* une notification visuelle permissive sur la modification de la répartition du regard, basée sur l'intégration de la règle des deux secondes. Afin d'optimiser l'acquisition de la règle des deux secondes, deux tâches qui représentent de manière simplifiée l'activité de vol ont été développées : une tâche proposée en "tête haute" (HUT) qui représente l'activité de recherche visuelle de type « voir et éviter », et une tâche proposée en "tête basse" (HDT) qui représente la gestion d'un système dynamique. L'objectif de la tâche HUT est de trouver un cercle plus large (cible) au sein d'un ensemble de cercles plus petits (distracteurs). Le but de la tâche HDT est, quant à elle, de maintenir des flèches au milieu de leurs jauges. Cet environnement virtuel a été associé à un *eye-tracker* permettant d'enregistrer le temps de fixation sur la tâche HDT en temps réel. Afin d'adapter l'entraînement aux mécanismes d'apprentissage, les deux tâches (HUT et HDT) sont présentées simultanément et répétées plusieurs fois. Dans la même veine, lorsque les participants violent la règle des deux secondes, ils sont systématiquement informés de cette violation par une notification visuelle en temps réel (notification visuelle de l'intervalle de temps). Une telle systématisme de notification est évidemment impossible au cours des vols d'instruction, c'est pourquoi les participants ont été plus fréquemment exposés aux notifications de violation de la règle des deux secondes au cours de l'étude qu'au cours d'un vol réel.

La notification systématique de la violation de la règle des deux secondes a déjà été testée au cours d'un vol simulé. Lorsque Dubois, Blättler, Camachon, et Hurter (2015) ont étudié le comportement naturel des élèves pilotes de l'Armée de l'Air, ils ont constaté que le regard de ceux-ci était orienté vers l'extérieur du cockpit pendant 40% du temps, et que cette proportion augmentait à 60% lorsque les élèves pilotes bénéficiaient d'une notification en temps réel de la violation de la règle des deux secondes. Les effets de cette modification comportementale n'ont pas été étudiés par Dubois et al. (2015) ni sur l'acquisition en mémoire à long terme ni sur la performance à la tâche de recherche visuelle à l'extérieur du cockpit. Notre étude a été conçue en prenant en compte ces deux limitations. La performance est mesurée sur les tâches HUT et HDT afin de déterminer si les participants réalisaient convenablement les tâches. Afin d'objectiver l'acquisition en mémoire à long terme de la modification comportementale, les effets de l'entraînement avec notification visuelle sont mesurés immédiatement après les sessions d'entraînement puis à nouveau 24 heures plus tard. Ces deux sessions de test sont conduites sans notification visuelle.

Le but de cette étude est ainsi d'évaluer dans quelle mesure la notification en temps réel peut conduire à la reproduction d'un intervalle de temps d'une certaine durée dans un environnement double tâche dynamique reproduisant certains aspects de l'activité de vol. Deux types de notification en temps réel dont le but est de faire acquiescer aux pilotes le respect de la recommandation aéronautique « pas plus de deux secondes la tête en cabine » sont étudiées : une notification permissive et une notification non permissive. Les participants du groupe contrôle sont, quant à eux, exposés aux mêmes recommandations sans bénéficier de notification. Les effets des différentes notifications sont comparés en ce qui concerne les performances aux tâches HUT et HDT, le respect de la règle des deux secondes, et le temps de fixation du regard sur la tâche HUT.

## **Hypothèses**

Si la règle des deux secondes peut être intégrée, alors un meilleur respect de cette règle devrait être observé dans les groupes avec notification (H1). En accord avec Dubois et al. (2015), un temps de fixation plus long sur la tâche HUT que sur celle HDT devrait être observé dans les groupes avec notification (H2).

Par ailleurs, l'entraînement à la réalisation d'une double tâche devrait conduire à une amélioration des performances en HUT et HDT (H3). Néanmoins, dans le respect de H2, les groupes expérimentaux devraient avoir de meilleures performances en HUT qu'en HDT (H4)

## 2. Participants

120 participants, étudiants d'Aix-Marseille Université, ont participé à l'étude. Les données de douze participants n'ont pas pu être utilisées (les participants ne se sont pas présentés lors de la passation ayant lieu 24h après). Le groupe contrôle (CG) était constitué de 40 étudiants (32 femmes de 18 à 26 ans, moyenne d'âge 19,3 ; 8 hommes de 17 à 23 ans, moyenne d'âge 19,7 ans). Le groupe avec notification permissive (PG) était constitué de 32 étudiants (27 femmes de 17 à 28 ans, moyenne d'âge 19,1 ; 7 hommes de 18 à 21 ans, moyenne d'âge 19,2 ans). Le groupe avec notification non permissive (NPG) était constitué de 36 étudiants (30 femmes de 17 à 29 ans, moyenne d'âge 19,2 ; 6 hommes de 18 à 29 ans, moyenne d'âge 22,7 ans). L'ensemble des participants n'avait jamais volé en tant que membre d'équipage auparavant et tous avaient une vision normale ou corrigée.

## 3. Protocole

### Apparatus et stimuli

Les stimuli étaient présentés sur un moniteur couleur de 22 pouces Hyundai W220D avec une résolution de 1680x1050. Les expériences ont été conduites en utilisant le micro-monde appelé *Abstract Flying Task* (AFT) associé au logiciel PiGaT (PilotGaze Trainer) qui permet de réaliser simultanément deux tâches symbolisant une activité aéronautique en VFR (voir Dubois, Camachon, Blättler, & Hurter, 2016 pour une description complète du matériel et logiciel). L'interaction avec le micro-monde était réalisée avec le joystick Logitech Extrême 3d Pro. Les participants étaient assis à une distance visuelle de l'écran de 60 cm. Les données visuelles ont été recueillies via EyeTribe® cadencé à 30 Hz, installé à une distance de 50 cm.

### Présentation du monde AFT

Deux tâches visuo-motrices sont présentées simultanément. Une HUT et une HDT (voir Fig. 22). HUT symbolise la recherche visuelle et doit être réalisée dans le même temps que HDT qui symbolise la surveillance et la gestion de système aéronautiques.

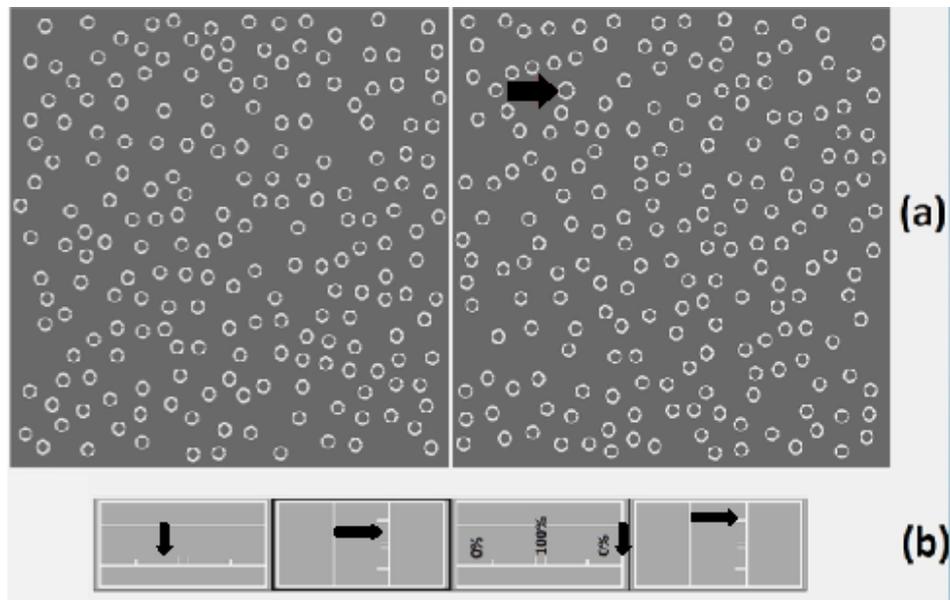


Figure 22. Capture d'écran du micromonde AFT. (a) La cible de la tâche HUT target est indiquée par une flèche noire. (b) La tâche HDT est dans une configuration au sein de laquelle les deux jauges de droite sont à zero et les deux jauges de gauche diminuent.

### Tâche HUT.

Cette tâche est le *surrogate reference task* (SuRT). Le but de cette tâche est de trouver un cercle cible, légèrement plus grand dans une globalité de cercles plus petits de même taille (distracteurs). Pour chaque HUT, en cas d'apparition, le cercle cible était l'un des 400 cercles présentés. Chaque cercle avait une épaisseur de 3 px, un diamètre de 20 px et 35 minutes d'arc pour les distracteurs, un diamètre de 26 px et 44 minutes d'arc pour la cible.

La cible apparaissait aléatoirement sur la partie gauche, la partie droite ou bien était absente de l'écran du haut séparé en deux (voir Figure 1). Le participant devait répondre aussi vite que possible en appuyant sur l'un des trois boutons de la partie supérieure du joystick (bouton de gauche si la cible était dans l'écran gauche, bouton de droite si la cible était dans l'écran droit, bouton du milieu si la cible était absente). Lorsque les participants répondaient à la HUT un feedback jaune était présenté suivi d'une nouvelle HUT. Après un temps de 9,000 ms sans

### **Tâche HDT.**

Cette tâche est inspirée de celle développée pour la sélection des pilotes de l'ENAC2 (Matton, Paubel, Cegarra, & Raufaste, 2016). Elle présente quatre jauges qui comprennent chacune une flèche positionnée en leur intérieur (voir Figure 1). Au début de chaque session, toutes les flèches sont au milieu de chaque jauge, puis les flèches commencent à glisser aléatoirement depuis le centre des jauges vers une extrémité (choisie aléatoirement). Le but de la HDT est de réussir à maintenir les quatre flèches au centre de leurs jauges respectives. La sélection de la flèche à déplacer se réalise par l'utilisation du joystick avec une rotation du poignet (axe Z) et est validée par un appui sur le trigger. La flèche ainsi sélectionnée peut-être déplacée par des mouvements sur le joystick (axes X et Y).

### **Procédure**

Les participants devaient réaliser simultanément les tâches HUT et HDT.

Les participants étaient divisés en 3 groupes : le groupe contrôle ou CG (N=44), le groupe permissif ou PG (N=37) et le groupe non-permissif ou NPG (N=37). L'expérimentation a été conduite en 5 phases : (i) familiarisation, (ii) pré-test, (iii) sessions d'entraînement, (iv) post-test, (v) rétention 24 heures après le post-test.

La figure 2 présente la procédure globale. Au cours de la session de familiarisation (i), les participants devaient s'entraîner sur chaque tâche pendant 30 secondes : d'abord HDT, ensuite HUT, ensuite HDT et HUT simultanément.

Au cours des phases de test (ii, iv, v) les participants exécutaient HUT et HDT sans emphase pour les trois groupes. L'ordre de réponse aux tâches était libre.

La phase d'entraînement (iii) était constituée de 6 sessions d'entraînement de 2 minutes chacune où HUT et HDT étaient présentées de manière synchrone. L'ordre de réponse aux tâches était libre. L'emphase était présentée après 2000ms de regard continu sur la HDT pour les groupes PG et NPG. Un masque orange transparent qui permettait la poursuite de la HDT était présenté sur la HDT pour le groupe PG. Un masque orange opaque qui interdisait la poursuite de la HDT était présenté sur la HDT pour le groupe NPG. Le groupe CG ne recevait aucune emphase.

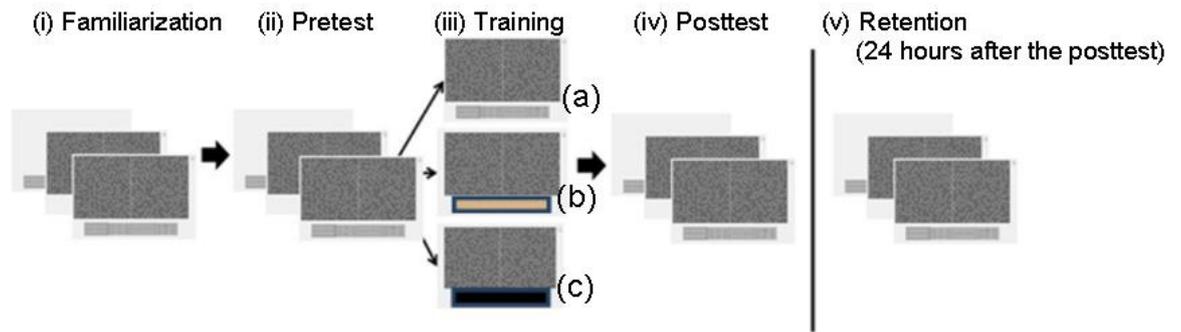


Figure 23. Procédure et design de l'expérience en cinq phases. Il n'y avait pas de masque pour le groupe CG (a), un masque transparent pour le groupe PG (b) et un masque opaque pour le groupe NPG (c).

## Mesure de la performance

La performance à la HUT correspond au nombre de bonnes réponses aux tâches SuRT présentées.

La performance à la HDT est notée sur 100 (25 par jauge). La performance à la HDT correspond au score moyen sur la session. Chaque jauge peut atteindre son score maximum (25) lorsque la jauge est au milieu. Ce score décroît linéairement lorsque la flèche s'éloigne du centre, jusqu'à atteindre 0 en extrémité de jauge.

Le temps passé à regarder les tâches HUT et HDT a été recueilli, ainsi que le nombre de violation de la règle des 2 secondes (plus de 2000ms de regard continu vers la tâche HDT).

## 4. Résultats

Des analyses de la variance (ANOVA) ont été réalisées avec le facteur « groupe » (CG ; PG ; NPG) comme facteur inter-groupe et avec le facteur « apprentissage » (pré-test, post-test, rétention) facteur intra-groupe.

### Violation de la règle des deux secondes (voir Fig. 24)

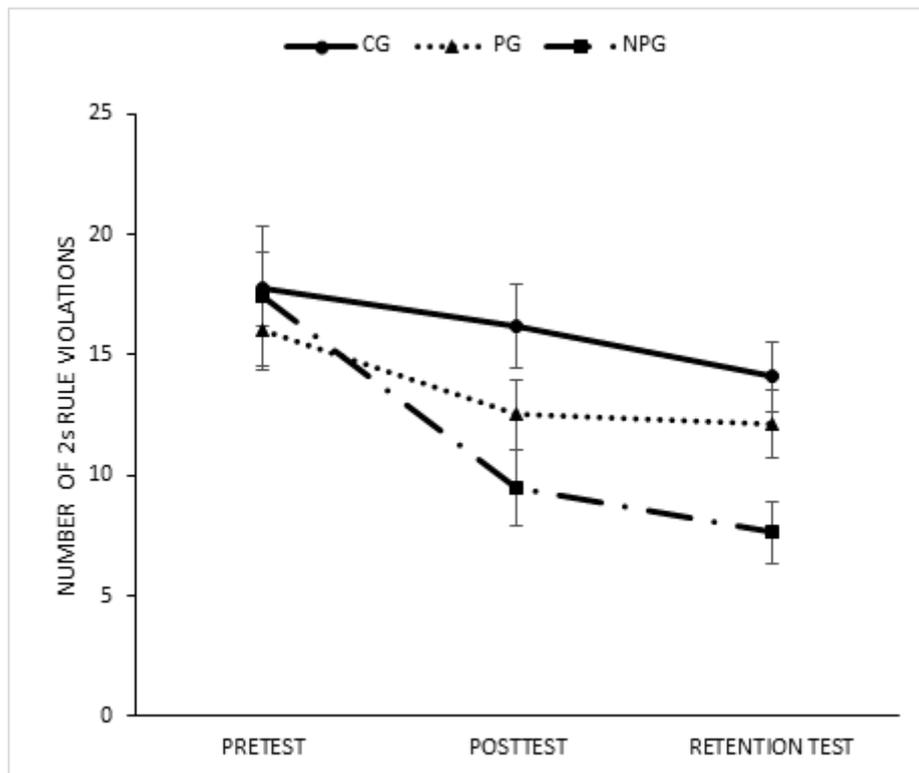


Figure 24. Nombre d'erreurs moyen de violations de la règle des deux secondes pour chaque groupe au cours des phases de test. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

Une ANOVA portant sur le nombre de violations de la règle des deux seconds a mis en évidence un effet significatif de l'apprentissage,  $F(2, 210) = 18.67$ ,  $MSE = 972.57$ ,  $p < 0.0001$ , un effet significatif de la notification visuelle,  $F(2, 105) = 3.79$ ,  $MSE = 573.66$ ,  $p = 0.026$ , et un effet significatif de l'interaction entre les,  $F(4, 210) = 2.77$ ,  $MSE = 144.14$ ,  $p = 0.028$ . Des analyses post hoc HSD Tukey ont été conduites.

Concernant l'effet d'apprentissage, les comparaisons suivantes ont été l'objet de différences significatives ( $p < .05$ ) : pretest ( $M = 17.15$ ,  $SD = 10.08$ ) *versus* posttest ( $M = 12.87$ ,  $SD = 9.66$ ); et pretest *versus* retention test ( $M = 11.37$ ,  $SD = 8.47$ ).

Concernant l'effet des notifications, les comparaisons suivantes ont donné lieu à des différences significatives ( $p < .05$ ): CG ( $M = 16.008$ ,  $SD = 9.99$ ) *versus* NPG ( $M = 11.53$ ,  $SD = 9.79$ ). Par contre, aucune différence significative n'a pu être montrée entre le groupe PG ( $M = 13.58$ ,  $SD = 8.72$ ) et les autres groupes.

Concernant l'interaction entre l'effet d'apprentissage et l'effet des notifications, les comparaisons suivantes ont présenté des différences significatives ( $p < .05$ ): NPG pretest ( $M$

= 17.44, SD = 11.06) *versus* NPG posttest (M = 9.50, SD = 8.38); NPG pretest *versus* NPG retention test (M = 7.64, SD = 6.68); et CG posttest (M = 16.18, SD = 10.84) *versus* NPG posttest. Une tendance a été relevée e ( $p = 0.058$ ) entre CG en retention test (M = 14.10, SD = 9.20) et NPG retention test.

### Temps de fixation (voir Fig. 25)

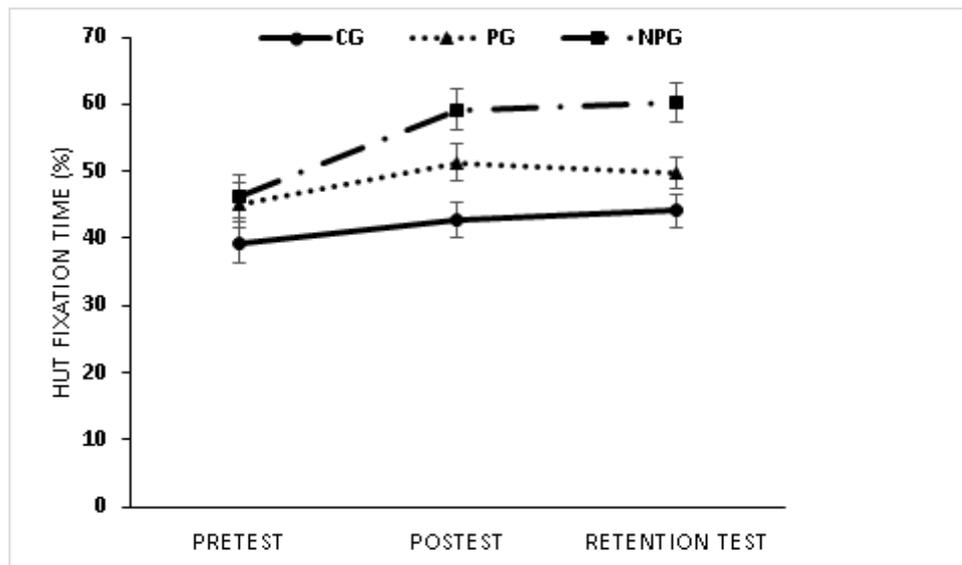


Figure 25. Pourcentage moyen du temps passé à regarder sur la zone de la tâche HUT pour chaque groupe, au cours de chacune des phases de test. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

Une ANOVA portant sur le temps moyen de fixation de la zone a mis en évidence un effet significatif de l'apprentissage,  $F(2, 105) = 14.12$ ,  $MSE = 0.21$ ,  $p < 0.0001$ , un effet significatif de la notification visuelle,  $F(2, 105) = 8.35$ ,  $MSE = 0.48$ ,  $p < 0.001$ , et une interaction entre les deux qui est proche du seuil classique de significativité,  $F(4, 210) = 2.24$ ,  $MSE = 0.033$ ,  $p = 0.064$ . Des analyses post hoc HSD Tukey ont été conduites.

Concernant l'effet d'apprentissage, les comparaisons suivantes ont présenté des différences significatives ( $p < .05$ ) : pretest (M = 43.35, SD = 19.14) *versus* posttest (M = 50.81, SD = 18.16); et pretest *versus* retention test (M = 51.15, SD = 16.63).

Concernant l'effet des notifications, les comparaisons suivantes ont présenté des différences significatives ( $p < .05$ ): CG (M = 42.11, SD = 16.75) *versus* NPG (M = 55.24, SD = 19.26). Par contre, aucune différence significative n'a pu être montrée entre PG (M = 48.69, SD = 16.37) et les autres groupes.

Concernant l'interaction entre l'effet d'apprentissage et l'effet des notifications, les comparaisons suivantes ont présenté des différences significatives ( $p < .05$ ): NPG pretest ( $M = 45.80, SD = 19.46$ ) versus NPG posttest ( $M = 59.26, SD = 18.82$ ); NPG pretest versus NPG retention test ( $M = 60.39, SD = 17.23$ ); CG posttest ( $M = 42.84, SD = 16.36$ ) versus NPG posttest; et CG retention test ( $M = 44.10, SD = 15.14$ ) versus NPG retention test.

### Performance globale (voir Fig. 26)

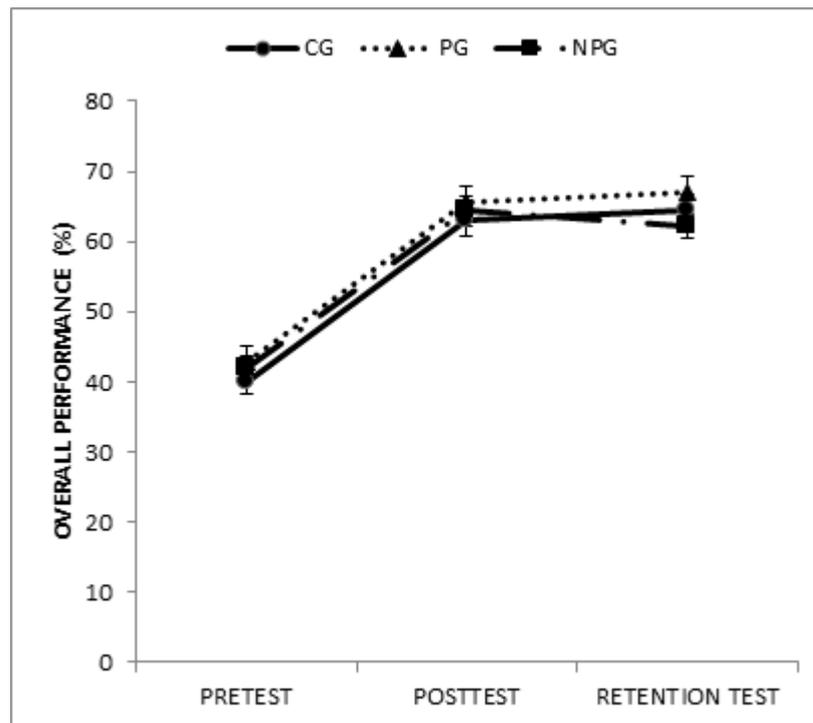


Figure 26. Moyenne de performance globale pour chaque groupe au cours de chaque test. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

Une ANOVA portant sur la performance moyenne globale a permis de mettre en évidence un effet significatif de l'apprentissage,  $F(2, 210) = 259.903, MSE = 18697, p < 0.00001$ . Des analyses post hoc HSD Tukey ont été conduites et les comparaisons suivantes ont présenté des différences significatives ( $p < .05$ ) : pretest ( $M = 41.47, SD = 11.18$ ) versus posttest ( $M = 64.27, SD = 13.75$ ); et pretest versus retention test ( $M = 64.47, SD = 12.93$ ).

Aucun effet significatif de la notification n'a pu être montré (CG:  $M = 55.88, SD = 17.53$  ; PG:  $M = 58.49, SD = 14.70$ ; NPG:  $M = 56.14, SD = 14.02$ ),  $F(2, 105) < 1, MSE = 210, p = 0.54$ , ni aucune interaction entre la performance globale et la notification,  $F(4, 210) = 0.875, MSE = 63, p = 0.48$ .

## Performances à la tâche HDT (voir Fig. 27)

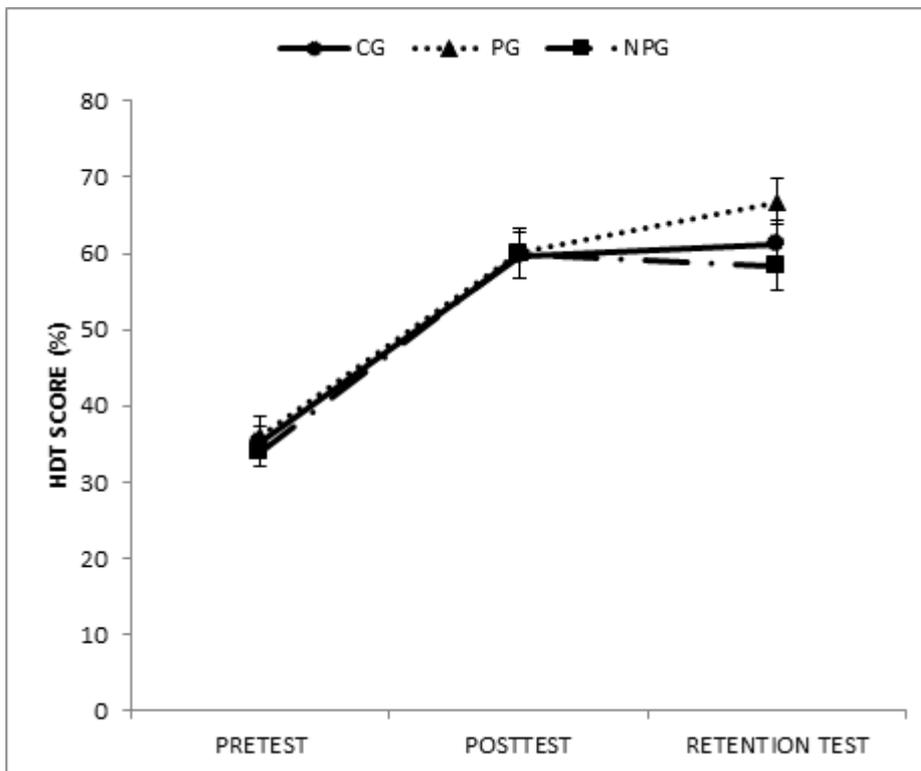


Figure 27. Performance moyenne à la tâche HDT pour chaque groupe au cours de chaque test. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

Une ANOVA portant sur la performance moyenne HDT a permis de mettre en évidence un effet significatif de l'apprentissage,  $F(2, 210) = 202.41$ ,  $MSE = 24103$ ,  $p < 0.000001$ . Des analyses post hoc HSD Tukey ont été conduites et les comparaisons suivantes ont présenté des différences significatives ( $p < .05$ ) : pretest ( $M = 35.08$ ,  $SD = 13.15$ ) *versus* posttest ( $M = 59.93$ ,  $SD = 19.32$ ) ; et pretest *versus* retention test ( $M = 61.91$ ,  $SD = 18.87$ ).

Aucun effet significatif de la notification n'a pu être montré (CG:  $M = 52.10$ ,  $SD = 21.35$ ; PG:  $M = 54.29$ ,  $SD = 21.54$ ; NPG:  $M = 50.77$ ,  $SD = 20.71$ ),  $F(2, 105) < 1$ ,  $MSE = 319.5$ ,  $p = 0.62$ , ni d'interaction significative entre la performance moyenne HDT et la notification,  $F(4, 210) = 1.42$ ,  $MSE = 170.1$ ,  $p = 0.22$ .

## Performances à la tâche HUT (voir Fig. 28)

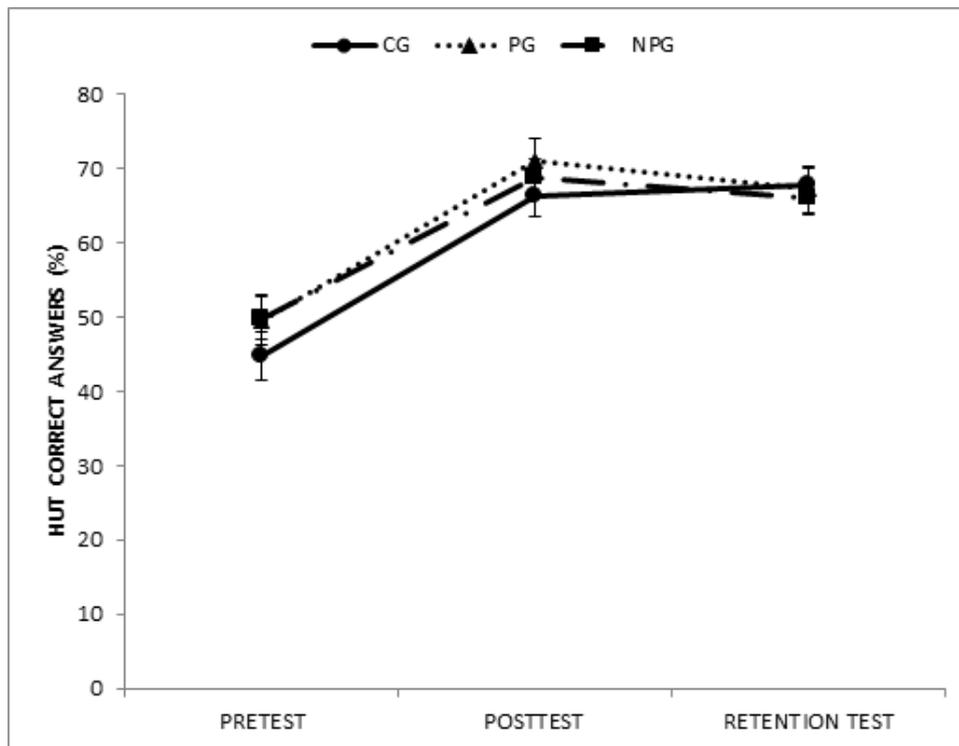


Figure 28. Performance moyenne à la tâche HUT pour chaque groupe au cours de chaque test. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

Une ANOVA portant sur la performance moyenne HDT a permis de mettre en évidence un effet significatif de l'apprentissage,  $F(2, 210) = 86.417$ ,  $MSE = 14156$ ,  $p < 0.0001$ . Des analyses post hoc HSD Tukey ont été conduites et les comparaisons suivantes ont présenté des différences significatives ( $p < .05$ ): pretest ( $M = 47.87$ ,  $SD = 19.07$ ) versus posttest ( $M = 68.61$ ,  $SD = 16.56$ ); et pretest versus retention test ( $M = 67.04$ ,  $SE = 14.69$ ).

Aucun effet significatif de la notification n'a pu être montré (CG:  $M = 59.66$ ,  $SD = 20.58$ ; PG:  $M = 62.68$ ,  $SD = 19.86$ ; NPG:  $M = 61.51$ ,  $SD = 17.22$ ),  $F(2, 105) < 1$ ,  $MSE = 252$ ,  $p = 0.62$ , ni d'interaction significative entre la performance HUT et la notification,  $F(4, 210) < 1$ ,  $MSE = 152$ ,  $p = 0.45$ .

## 5. Discussion

L'objectif de la présente étude était de tester une méthode d'entraînement destinée à prévenir les comportements aéronautiques dangereux (c'est-à-dire un temps de regard excessif à l'intérieur du cockpit) induits par les cockpits modernes. La présente étude a également examiné si cette méthode pouvait entraver l'apprentissage de deux tâches simultanées. La méthode d'entraînement consistait à apprendre un intervalle de temps spécifique, accentué par une notification en temps réel avertissant les participants qu'ils passaient trop de temps sur la tâche proposée en tête basse ou HDT (correspondant d'une certaine façon au fait de regarder à l'intérieur). La notification en temps réel a été testée avec cette tâche qui devait être exécutée simultanément avec une tâche proposée en tête haute ou HDT (correspondant à une tâche de type "voir et éviter" à l'extérieur du cockpit). Pour tester l'efficacité de la notification en temps réel, nous devons objectiver la possibilité pour les individus d'acquérir l'estimation de l'intervalle de temps, une compétence qui leur permettrait de respecter la règle des « 2s » (prescrite par les autorités aéronautiques) et, en même temps, d'augmenter le temps qu'ils passaient à regarder en tête haute pour représenter l'extérieur (Dubois et al., 2015). Pour chaque groupe, les sessions de test (prétest, post-test, test de rétention) ont été réalisées sans notification de la règle des 2s.

Seule la condition NPG a permis d'obtenir un nombre significativement plus faible de violations de la règle des 2s, en comparaison avec CG, et une diminution significative des violations de la règle des 2s après les sessions d'entraînement. Nous n'avons pas réussi à montrer un quelconque effet de la notification permissive. Au cours de deux tâches visuospatiales motrices présentées simultanément (Wickens, 2002), la notification visuelle d'un intervalle de temps qui oblige les participants à cesser de gérer une tâche semble être un moyen pertinent d'apprentissage de cet intervalle de temps dans notre situation de double tâche. Ces résultats sont en accord avec ceux de Taatgen et al. (2007), qui ont montré que l'intervalle de temps peut être appris dans une situation de double tâche motrice visuoverbale dynamique. Un résultat inattendu est l'absence de différence significative entre les conditions PG et CG au post-test et 24 heures après les sessions d'entraînement. Avec une notification non permissive, les participants ont été forcés d'arrêter de gérer la tâche HDT après exactement 2s, ce qui nous permet de supposer que l'intégration d'un intervalle de temps est plus efficace lorsque les participants sont forcés de le respecter. Une explication possible de

ce résultat est que la notification non permissive a dirigé plus de ressources attentionnelles vers l'intervalle de temps et a amélioré l'intégration. Une autre explication possible est qu'étant donné que les participants PG pouvaient poursuivre le HDT s'ils le souhaitaient, ils ont peut-être moins tenu compte de la règle des 2s pendant les sessions de formation, et ont donc eu moins de pratique pour la mettre en œuvre. De même, les participants en condition NPG ont probablement bénéficié du fait d'avoir à respecter davantage l'intervalle de temps, et ont donc pu atteindre un niveau d'automatisation plus élevé (e.g. , Logan, 1988).

Le but de l'apprentissage de la règle des 2s pendant l'instruction en vol est de s'assurer qu'un temps de fixation plus important est alloué à la tâche « voir et éviter ». Dans cette étude, la tâche HDT était spontanément plus attrayante pour les participants que la tâche HUT, comme en témoigne le pourcentage moyen de temps qu'ils ont passé à fixer l'emplacement HUT (environ 43 % pour les trois groupes avant les séances de formation). Les données ont montré que les participants en condition NPG ont passé plus de temps à fixer le HUT que ceux en condition contrôle (CG) après les sessions de formation, démontrant ainsi la pertinence de la notification en temps réel. Ces résultats sont en accord avec ceux de Dubois et al. (2015), qui ont étudié l'activité du regard pendant un vol simulé. Bien que la règle des 2s permette toujours aux participants de passer plus de temps à regarder le HDT que le HUT, nos résultats ont montré que lorsqu'ils adhéraient à la règle des 2s, les participants passaient plus de temps à regarder le HUT en moyenne.

Quel est le mécanisme qui sous-tend la transition entre le respect de la règle des 2s et le fait de passer plus de temps à regarder le HUT ? Dans l'étude de Dubois et al. (2015), les étudiants du personnel navigant avaient des connaissances aéronautiques spécifiques, avec 37 heures de vol en moyenne tout en exerçant des fonctions à bord. Nous pouvons supposer que leurs connaissances aéronautiques spécifiques, associées à des scènes simulées significatives (même instrumentation et monde extérieur virtuel) les ont amenés à diriger leur activité de regard vers le monde extérieur, conformément aux prescriptions aéronautiques qu'ils avaient apprises. En revanche, les participants à notre étude étaient des étudiants de l'université sans connaissances aéronautiques préalables, et la scène n'avait pas de signification particulière pour eux. Les résultats de Dubois et al. (2015), combinés à ceux de la présente étude, suggèrent néanmoins que les connaissances préalables des participants et le

caractère significatif de la scène ne seraient pas entièrement responsables de l'augmentation du temps de fixation HUT. Les mécanismes impliqués pourraient donc être plus génériques.

En ce qui concerne les performances des tâches, les participants ayant effectué les deux tâches, il y avait des effets d'apprentissage pour les tâches HUT et HDT. Ces résultats ont permis d'écartier la question de la dissociation potentielle entre l'allocation du regard fovéal et l'attention visuelle (Duchowski, 2007 ; Posner, 1980). Nous n'avons constaté aucun impact de l'un ou l'autre type de notification sur la performance de la tâche. Nous nous attendions à observer de meilleures performances pour la tâche HUT pour le groupe qui allouait plus de temps de fixation à HUT. De la même manière, nous nous attendions à des performances inférieures pour la tâche HDT pour le groupe qui passait moins de temps à fixer HDT. L'une des explications possibles est que l'entraînement n'était pas suffisamment poussé pour produire une différence significative dans les performances HUT et HDT entre les groupes. Une autre explication possible est que les différences de temps de fixation entre les groupes après la phase de formation n'étaient pas assez importantes pour produire une modification significative des performances de la tâche.

Pris ensemble, ces résultats suggèrent que cet entraînement est un moyen pertinent d'ajuster les schémas de regard sur un affichage en tête basse et tête haute, sans nuire aux performances. Une explication possible est que la notification permet d'incorporer une composante d'intervalle de temps dans un processus de coordination inter-tâches. Nous proposons de nommer ce mécanisme "coordination inter-tâches basée sur le temps" (TB-ITC).

Les études futures devraient utiliser la méthode de transfert (par exemple, Green, Strobach, & Schubert, 2014) pour évaluer la nature générique ou spécifique des mécanismes responsables de l'intégration des intervalles de temps dans une situation multitâche. Il est essentiel de comprendre leur nature si cette méthode d'entraînement doit être mise en œuvre dans un environnement écologique simulé. Des études de simulation ont démontré l'efficacité de l'entraînement par simulation de vol (Jacobs, Prince, Hays, & Salas, 1990 ; Orlansky & String, 1977 ; Pfeiffer & Horey, 1987 ; Rantanen & Talleur, 2005). Les simulateurs peuvent donc être utilisés pour acquérir des compétences en matière de résistance à l'absorption, comme le demandent les autorités aéronautiques. De plus, la formation peut

être adaptée aux stratégies de regard individuelles, et permettre un enseignement différencié, ciblant les caractéristiques individuelles.

Les applications concernent tous les individus et tous les modes de transport. Par exemple, les smartphones sont largement utilisés pour faciliter la navigation en voiture et entraînent des problèmes d'absorption de l'attention. Une application basée sur la reconnaissance faciale/oculaire pourrait être utilisée pour éteindre l'écran dès que le conducteur dépasse une limite de temps de regard. Ce type de logiciel pourrait être mis en œuvre pour optimiser l'interaction homme-machine dans les systèmes de véhicules intelligents.

En conclusion, nos résultats aideront à résoudre le problème de la surveillance et de l'assistance des opérateurs en temps réel lors d'opérations complexes et dynamiques, afin de favoriser un comportement approprié, en utilisant la notification basée sur le temps de fixation pour adapter les schémas d'attention des opérateurs à différentes situations.

## Chapitre 4 : Expérience 2

**Augmenter le temps passé à regarder à l'extérieur du cockpit au cours de l'activité multitâche de vol à vue : étude de la méthode de l'affichage d'informations à la demande<sup>6</sup>**

---

<sup>6</sup> D'après l'article : Blättler, C., Fabre, L., & Froger, G. (2020). Display on demand method increases time spent looking outside the cockpit: Testing a training method during visual flight rules flights. *Aviation Psychology and Applied Human Factors*.

# Résumé

## Objectif

Nous avons testé une méthode de formation destinée à prévenir les comportements aéronautiques dangereux (c'est-à-dire lorsque trop de temps est passé à regarder à l'intérieur du cockpit), en apprenant aux individus à effectuer une tâche complémentaire à la tâche de sécurité obligatoire "voir et éviter" dans un environnement écologique (simulateur de vol).

## Contexte

Les activités aéronautiques imposent aux équipages la gestion simultanée de plusieurs tâches simultanément dans un environnement ergonomique en constante évolution. "Voir et éviter" reste l'une des principales tâches de sécurité pendant le vol à vue. Cependant, les instruments modernes embarqués peuvent entraîner des distractions, notamment en absorbant l'attention à l'intérieur du cockpit, ce qui est de nature à réduire la sécurité aérienne.

## Méthode

La méthode d'affichage à la demande (*Display on Demand* ou DoD) testée ici vise à éviter ce problème pour les pilotes au cours de l'activité de vol à vue ou vol VFR (*Visual Flight Rules*). Des élèves-pilotes ont été assignés soit à un groupe expérimental, soit à un groupe contrôle. Dans le groupe expérimental, au cours des séances d'entraînement, les instruments du cockpit étaient affichés à la demande des participants afin de favoriser l'attention visuelle hors du cockpit. L'acquisition des compétences a été mesurée et l'attention visuelle a été mesurée par un *eye-tracker*.

## Résultats

Tous les participants ont amélioré leurs performances après l'entraînement. Par rapport à l'entraînement classique, la méthode DoD permet aux participants de passer plus de temps à regarder à l'extérieur du cockpit sans que cela n'ait d'impact sur la charge de travail subjective.

## Conclusion

L'entraînement au moyen de la méthode DoD semble être un moyen efficace de promouvoir la résistance à l'absorption tout en préservant les performances de la tâche.

# 1. Introduction

L'objectif de l'étude présentée ici est de tester une méthode de formation permettant d'augmenter le temps passé à regarder à l'extérieur du cockpit et de suggérer son intégration dans les futurs programmes de formation aux cockpits modernes. Plus précisément, il s'agit de déterminer un cadre d'application dédié aux compétences de base du vol à vue (VFR) pour les planeurs et les avions légers. Le manuel d'information aéronautique (FAA AIM 8.1.6.C.3, 2020) recommande que "le temps qu'un pilote consacre à des tâches visuelles à l'intérieur de la cabine ne devrait pas représenter plus d'un quart ou plus de la moitié du temps de vol".

Cependant, les cockpits deviennent de plus en plus numériques, que ce soit par le biais d'instruments intégrés au cockpit ou par l'emport de dispositifs électroniques portables.

Ces appareils augmentent la distraction et ainsi les problèmes de sécurité aérienne (Kelly, Efthymiou, 2019 ; Funk, Lyall, Wilson, Vint, & Niemczyk, 1999 ; NTSB most Wanted list 2019-2020) en augmentant le temps passé dans la cabine. Par exemple, Johnson, Wiegmann et Wickens (2006) montrent que le temps passé dans la cabine sans ces instruments (p. ex., GPS) est de 40 % alors qu'il s'élève à 80 % avec de tels instruments. Casner (2005, 2006) montre que l'utilisation du GPS pour la navigation VFR réduit la conscience de la situation car les pilotes participant à son étude ne prennent plus leurs repères dans le monde extérieur. Le NTSB montre également que la généralisation de l'utilisation de ces instruments dans l'aviation légère a augmenté le nombre d'accidents mortels par rapport aux aéronefs équipés de cockpits analogiques (NTSB, 2010).

Des études ont montré qu'il est possible, en laboratoire, de moduler l'allocation de l'attention visuo-spatiale à des tâches artificielles qui imitent les tâches aéronautiques (p. ex., Froger, Blättler, Dubois, Camachon, & Bonnardel, 2018). L'étude du chapitre précédent présente une méthode d'entraînement visant à améliorer le partage de l'attention visuelle comme moyen de soutenir la mise en œuvre des recommandations de la FAA. Ils ont utilisé un environnement virtuel spécifique développé pour exposer les participants à une situation de double tâche qui imite en partie l'activité aéronautique. Cette condition de double tâche consistait en une tâche située dans la partie supérieure de l'écran (c'est-à-dire une tâche de recherche visuelle représentant la tâche de sécurité "voir et éviter") et une tâche située dans la partie inférieure de l'écran représentant l'activité de gestion du système. Ces deux tâches, bien que présentées en même temps, ne peuvent pas être exécutées simultanément et nécessitent de passer de

l'une à l'autre. Les mouvements oculaires ont été enregistrés pour mesurer la durée de fixation des yeux sur chaque tâche. Dans la condition contrôle, il a été constaté que les participants consacraient 60% de leur temps à regarder la tâche du bas et 40% de leur temps sur la tâche du haut. Dans la condition expérimentale, la tâche du bas était masquée dès que le participant passait plus de 2 secondes sur cette tâche, obligeant le participant à quitter des yeux la tâche du bas afin que la tâche du bas puisse réapparaître.

Les participants ont été entraînés dans cette condition pendant 12 minutes. La durée de la fixation des yeux a été mesurée immédiatement après la session de formation et 24 heures plus tard au cours d'une session de test au sein desquelles la tâche du bas n'était pas masquée. Les résultats ont montré que les participants de la condition expérimentale passaient 60 % de leur temps à regarder vers le haut et 40 % vers le bas après la formation. Les auteurs ont conclu qu'il est possible de modifier de façon permanente l'allocation des ressources visuo-attentionnelles à l'aide d'une méthode qui affiche des informations pendant un temps d'entraînement modeste (douze minutes dans l'expérience de Froger et al., 2018).

Bien que l'utilisation de l'*eye-tracker* ait le potentiel d'améliorer les résultats de l'apprentissage, son utilisation intensive est limitée par plusieurs obstacles technologiques (par exemple, la sensibilité à la lumière du soleil). Par conséquent, il y a un défi à trouver une alternative à l'option de l'*eye-tracking* pour s'assurer que les élèves pilotes acquièrent les compétences de base en matière de pilotage, à savoir les manœuvres de vol de base et l'attention visuelle au monde extérieur.

Une procédure alternative à l'utilisation de l'*eye-tracking* consiste à utiliser un cockpit sans information et à rendre l'information accessible pendant une courte période à la demande des élèves-pilotes afin d'impliquer l'élève plus activement dans son apprentissage. Chen et Singer (1992) ont démontré que l'apport stratégique ou la méthode adaptée des entraîneurs ou des instructeurs était nécessaire à l'apprentissage. Dans cette optique, nous avons proposé de tester la méthode *Display on Demand* (DoD). L'affichage à la demande consiste en un acte explicite pour obtenir l'information nécessaire pour réaliser sa tâche. La méthode DoD s'inscrit dans la lignée de la théorie des stratégies autorégulées (SRS) définie comme " des actions qui se produisent pendant l'exécution d'une tâche cognitive et qui permettent à un individu de contrôler ou de diriger sa propre activité par le biais de règles ou de règlements auto-imposés qui adaptent mieux sa performance aux différentes circonstances ou à l'environnement " (Ferrari, Pinard, Reid & Bouffard-Bouchard, 1991, p.

139). Les SRS contribuent à la perception de la maîtrise de soi dont il a été démontré qu'elle améliore l'apprentissage par un traitement plus approfondi de l'information (McCombs, 1989). En éducation et en psychologie cognitive, des études ont indiqué que ce niveau plus élevé de traitement de l'information est atteint en permettant aux apprenants de participer activement et de façon indépendante au processus d'apprentissage par l'utilisation de SRS. Dans ce contexte, les participants traitent les informations associées à leur propre signification. Craik et Tulving (1975) ont affirmé que la signification est le principal facteur influençant le traitement approfondi de l'information, ce qui permet une meilleure mémorisation.

La SRS sous la forme d'informations de type *Display-on-Demand* (DoD) permet la pré-activation des règles de réalisation d'une tâche pour les informations qui seront traitées immédiatement après. Cette pré-activation des règles constitue un amorçage de la tâche suivante qui est susceptible d'améliorer les performances dans la réalisation de la tâche en permettant un traitement plus rapide (Maquestiaux, 2012). Ainsi, la méthode DoD devrait produire un traitement plus profond et plus rapide de l'information, ce qui devrait conduire à une diminution du temps global consacré aux tâches visuelles à l'intérieur de la cabine après l'entraînement. Cette méthode permettrait de passer plus de temps à regarder à l'extérieur du cockpit, ce qui répondrait aux recommandations de la FAA.

## 2. Méthode

L'objectif de la présente étude a été de tester une méthode d'entraînement au vol en planeur dans un environnement simulé visant à développer les compétences de base en matière de pilotage (c'est-à-dire les manœuvres de vol de base et l'attention visuelle au monde à l'extérieur du cockpit). L'expérience a été conçue pour comparer deux types d'entraînement incluant une méthode d'affichage à la demande (DoD) et l'affichage du cockpit dans un simulateur de planeur. Les participants ont été divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, les participants avaient à leur disposition trois instruments de bord pendant toutes les sessions de formation. Dans la deuxième condition, les instruments ont été cachés. Dès que le participant demandait à haute voix que les instruments soient affichés, l'expérimentateur appuyait sur un bouton qui déclenchait l'affichage des instruments pendant deux secondes. Pour chaque essai, le participant ne pouvait demander les instruments que

trois fois au maximum. Cette condition avait pour but de permettre aux participants de regarder le monde extérieur. L'écart de vitesse a été utilisé comme variable dépendante ; plus l'écart de vitesse est élevé, plus la performance est faible. Les deux hypothèses étaient les suivantes : (H1) les deux groupes augmenteraient leurs performances, et (H2) le groupe expérimental passerait plus de temps à regarder l'extérieur lors du test final.

### 3. Participants

Vingt-et-un élèves-pilotes de l'École de l'Air, d'un âge moyen de 28,87 ans (écart-type : 7,74), n'ayant aucune expérience préalable des dispositifs d'affichage des informations de vol, ont pris part à l'expérience. Ils ont été répartis au hasard dans l'un des deux groupes. Treize participants ont été affectés au groupe témoin (GC) et huit au groupe expérimental (GE).

### 4. Apparatus

Le simulateur de vol a été utilisé avec le logiciel commercial Xplane 10.42 (32 bits). L'avion simulé était un planeur biplace ASK21 modifié (réf Xplane : ASK21-Metric\_V2.1). La vue extérieure était projetée sur un fond blanc pour créer un angle de vue de 170° (horizontal) par 60° (vertical) situé devant les participants. Les instruments de vol du cockpit présentés étaient les instruments de vol de base tels que l'indicateur de vitesse, les indicateurs de cap et l'altimètre. En fonction de la condition expérimentale, chaque instrument était présenté ou non (figure 29). Le simulateur de planeur était relié à un manche de vol pro (produits CH) et à des pédales de direction (produits CH). Les données relatives à la position des yeux étaient capturées par un *eye-tracker* Tobii Pro lunettes 2 cadencé à 100 Hz.

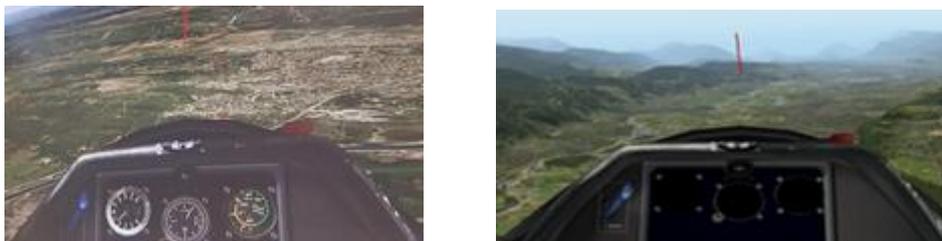


Figure 29. Exemple de cockpit, avec information (gauche) et sans information (right)

## 5. Procédure

Les participants ont reçu des informations de base sur la façon de piloter un planeur. Dans une phase de familiarisation, ils ont essayé les effets des commandes du planeur. Immédiatement après la phase de familiarisation, l'expérience composée de trois conditions d'apprentissage (ligne droite, virages à droite et à gauche sur 360°, et approche finale) et d'une session de test final. Dans la condition de ligne droite, les participants doivent maintenir une vitesse (100 Km/h) le long de six lignes droites pendant 60 secondes. Dans la condition de virage, les participants doivent effectuer quatre virages de 360 degrés à droite et quatre virages de 360 degrés à gauche avec un angle d'inclinaison de 30° en maintenant une vitesse constante. Dans la condition d'approche finale, les participants doivent effectuer six approches en maintenant une vitesse minimale de 90 Km/h pour éviter le décrochage.

Les participants ont reçu une fiche d'information comprenant les objectifs du vol. Après chaque essai, l'expérimentateur (titulaire d'une licence de pilote de planeur) indiquait si la vitesse était correcte ou non. Pour chaque condition, le premier essai a servi de référence et a été comparé à la session de test finale. Les participants des deux groupes étaient équipés d'un *eye-tracker* pour tous les essais afin d'enregistrer le temps passé à regarder à l'intérieur du cockpit. Des mesures subjectives de la charge de travail (NASA-TLX) ont été recueillies à la fin de l'expérience. L'expérience a duré environ 45 minutes.

## 6. Résultats

Une ANOVA a été réalisée avec le groupe (CG vs EG) comme facteur intergroupe sur l'écart de vitesse pour les lignes droites, les virages et les situations d'approche dans la condition de base. Aucune différence de groupe n'a pu être montrée  $F(1,19) < 1$  ;  $p$  n.s., ce qui signifie que les performances étaient comparables entre les deux groupes au début de l'expérience. Pour tester l'impact de l'entraînement sur les performances de vol, une ANOVA a été réalisée avec le groupe comme facteur intergroupe sur l'écart de vitesse par condition et l'entraînement (test de base vs test final) comme facteur intragroupe. Pour la condition de ligne droite, un effet significatif de l'entraînement ( $F(1,19) = 6,42$  ;  $\eta^2 = 0.25$  ;  $p = 0.02$ ) a été observé. Les participants ont mieux réussi à maintenir leur vitesse au post-test ( $M = 3,82$  ;  $SD = 2,37$ ) qu'au test de base ( $M = 7,07$  ;  $SD = 6,18$ ). Aucun effet significatif de la condition du groupe n'a pu être

montré, ni d'interaction (respectivement  $F(1,19) < 1$  ;  $p$  n.s. et  $F(1,19) < 1$  ;  $p$  n.s.). En ce qui concerne la condition de virage, un effet principal significatif de l'entraînement a également été observé ( $F(1,19)=8.09$  ;  $\eta^2= 0.30$  ;  $p=0.0103$ ). Les participants ont mieux réussi à maintenir leur vitesse au post-test ( $M= 7.60$  ;  $SD= 5.08$ ) qu'au test de base ( $M=17.50$  ;  $SD= 13.98$ ). Aucun effet de la condition du groupe n'a pu être montré, ni d'interaction (respectivement  $F(1,19) = 1,38$  ;  $p$  n.s. et  $F(1,19) < 1$  ;  $p$  n.s.). Concernant l'approche finale, aucun effet significatif n'a été observé.

Les enregistrements de l'*eye-tracker* ont révélé que seul le groupe expérimental utilisant la méthode DoD a diminué le temps passé à regarder à l'intérieur du cockpit après la formation par rapport à la ligne de base (figure 30). L'ANOVA ne montre aucun effet principal ou interaction. Des analyses post hoc de Fisher (LSD) ont été effectuées. Les paires suivantes étaient significativement différentes : EG de base ( $M = 38,75$  ;  $ET = 18,75$ ) et EG test final ( $M = 23,17$  ;  $ET = 13,78$ ).

La perception de la charge de travail a été mesurée à l'aide de l'échelle NASA-TLX. Aucune différence significative n'a été constatée (EG : Moyenne = 64,29  $ET = 10,91$  ; CG : Moyenne = 62,74  $ET = 6,28$ )  $t(19) = .41$  ;  $p = ns$ .

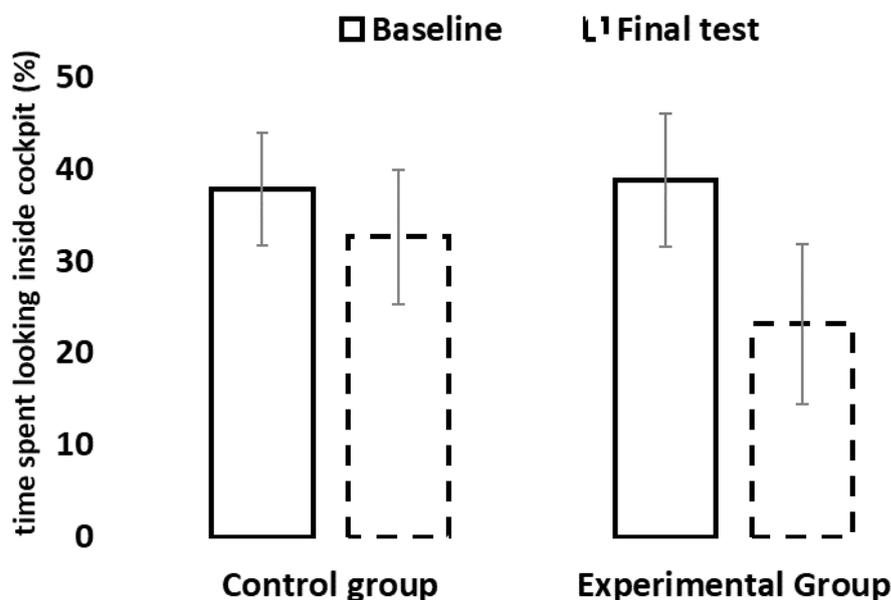


Figure 30. Temps passé à regarder à l'intérieur du cockpit (%) par groupes (Contrôle et Expérimental) pour le test de base et le test final.

## 7. Discussion

L'étude actuelle visait à proposer une méthode d'entraînement au vol favorisant le temps passé à regarder à l'extérieur du cockpit. Conformément à notre hypothèse, tous les participants ont amélioré leurs performances après l'entraînement. Par rapport à l'entraînement classique, la méthode DoD a permis aux participants de passer plus de temps à regarder à l'extérieur du cockpit sans aucun impact sur la charge de travail subjective, ni une influence significative sur les performances.

Ces résultats, qui sont en accord avec la théorie SRS (Cheng & Singer, 1992), offrent la possibilité d'une nouvelle interaction instructeur/étudiant dans le processus d'apprentissage des compétences de base au cours des vols en conditions de vol à vue (VFR). Il s'agit d'un moyen prometteur afin de lutter contre l'absorption de l'attention causée par les différents affichages des cockpits modernes.

La méthode DoD semble être un moyen efficace de surmonter les obstacles techniques associés à la méthodologie de l'*eye-tracking*. Cependant, l'expérience actuelle n'était basée que sur une seule session de formation qui a duré environ 45 minutes ; par conséquent, les recherches futures devront évaluer les effets croissants ou décroissants de la méthode DoD dans le cadre de formations à sessions multiples. En outre, la méthode DoD pourrait être testée lors de vols réels afin de concevoir éventuellement une "fonction d'entraînement" dans le futur système de cockpit.

La méthode d'apprentissage DoD basée sur un simulateur de vol en planeur et des affichages numériques pendant la première étape de la formation des pilotes (*ab initio*) contribue aux avancées méthodologiques dans les domaines de la formation, de l'apprentissage et de l'ingénierie cognitive (Salas, Bowers et Rhodenizer, 1998). Cette stratégie d'apprentissage du DoD encourage l'acquisition d'une répartition de l'attention visuelle. C'est une raison supplémentaire pour promouvoir le développement de cours spécifiques (entraînement *part-task*) utilisant des simulateurs de vol, dans un programme de formation plus complet, dédié à des compétences spécifiques (par exemple, le schéma de la répartition de l'attention visuelle, les schémas d'action). Cependant, le transfert positif de la méthode DoD et l'acquisition de compétences plus complexes, telles que l'articulation des compétences de base dans un circuit d'atterrissage, devraient être validés par des travaux futurs.

La méthode d'apprentissage du DoD s'inscrit dans une démarche globale d'amélioration de la sécurité aérienne. Cette méthode semble compatible avec toutes les générations d'instruments (analogiques et numériques) et devrait donc contribuer à la conception d'instruments de vol dédiés à l'acquisition de connaissances spécifiques au vol.

## **Chapitre 5 : Expérience 3**

### **Objectivation de la charge cognitive des équipages : vers la création d'un indicateur de la charge de travail au sein de l'armée de l'air et de l'espace (FAFA TLX)<sup>7</sup>**

---

<sup>7</sup> Ce chapitre est une adaptation de l'article en préparation : Froger, G. , Blättler, C. , Jarry, M. & Bonnardel, N. (2021). Objectification of Flight Crews Cognitive Load: toward a French Air Force Academy Task Load Index (FAFA TLX)

# Résumé

## Objectif

L'objectif de cette étude a consisté à développer une méthode d'évaluation de la charge cognitive des équipages pendant leur formation, basée sur les pratiques des instructeurs de l'armée de l'air française.

## Contexte

Les activités aéronautiques amènent les équipages à effectuer plusieurs tâches simultanément dans un environnement ergonomique en constante évolution. La gestion de plusieurs tâches synchrones requiert un coût cognitif qui peut être préjudiciable à la sécurité des vols et à l'acquisition de compétences. L'enjeu est donc d'adapter la formation aux capacités cognitives des stagiaires.

## Méthode

Un environnement virtuel spécifique a été développé pour exposer les participants à une situation de double tâche qui imite certains aspects de l'activité aéronautique, dans le cadre d'un protocole visant à mesurer l'empan de leur mémoire de travail et leur charge cognitive. Deux types d'entraînement ont été testés : multitâche et mono-tâche.

## Résultats

Un protocole complexe d'évaluation de l'empan, habituellement utilisé en laboratoire, a été adapté avec succès à un environnement plus écologique. Les résultats ont montré que l'utilisation de cette méthode pour créer une situation multitâche avait un effet positif sur les temps de réponse dans une tâche de vol simulée.

## Conclusion

Cette méthode semble constituer un moyen efficace pour évaluer la charge cognitive. Des recherches supplémentaires sont maintenant nécessaires dans des conditions réelles ou simulées pour examiner comment elle pourrait être mise en œuvre dans la formation des équipages.

## Applications

Ce type de méthode pourrait également être utilisé pour optimiser la formation et

l'interaction homme-machine dans les systèmes de véhicules intelligents, favorisant une coopération plus étroite entre le superviseur et le système de conduite automatisée.

## 1. Introduction

Comme cela a été décrit antérieurement, l'aéronautique est un monde dynamique et complexe dans lequel les équipages stagiaires sont confrontés dès le début de leur formation à des tâches discrètes et synchrones (par exemple, surveiller les changements dans l'environnement externe, interagir avec différents instruments, effectuer des communications radio). Or, la gestion de multiples tâches synchrones a un coût cognitif (Telford, 1931 ; Pashler, 1994 ; Wickens, 2002) qui peut être préjudiciable à la sécurité et à l'acquisition de compétences. La mémoire de travail ayant une capacité limitée (Baddeley, 1996, 2000 ; Cowan, 1999), lorsqu'elle est fortement sollicitée, l'apprentissage est moins efficace (Sweller, 1994) et les ressources cognitives peuvent être insuffisantes pour percevoir les éventuels dangers (e.g. risque de cécité d'inattention ; Bredemeier & Simons, 2015 ; Kreitz, Furley, Memmert, & Simons, 2016). L'enjeu est donc d'adapter la formation aux capacités cognitives des stagiaires, qui varient en fonction du contexte, afin d'ajuster la quantité d'informations à traiter et d'assurer un apprentissage efficace. La présente étude s'inscrit dans le cadre d'un projet visant à développer une méthode d'optimisation de ce type d'enseignement dans le contexte de l'apprentissage du vol, et plus particulièrement au profit des stagiaires de l'Armée de l'Air française.

Il existe de nombreuses méthodes pour évaluer la charge de travail. En plus des mesures subjectives (e.g., NASA TLX ; Hart & Staveland, 1988 ; McKendrick, Cherry, 2018), de nombreux outils technologiques ont été développés pour évaluer objectivement la charge de travail (par exemple, sur la base de mesures cardiaques ; Hugues, Hancock, Marlow, Stowers & Salas, 2019). Cependant, les contraintes découlant de l'utilisation de ces outils technologiques (e.g., navigabilité, encombrement) ont jusqu'à présent freiné leur utilisation lors d'activités réelles. La présente étude a été conçue pour tester une méthode d'objectivation, adaptée d'une méthode utilisée par des opérateurs experts, qui surmonte ces contraintes.

Lors de la formation au pilotage, certains instructeurs de l'armée de l'air française cherchent empiriquement à détecter le coût cognitif pour les stagiaires de la gestion des

situations multitâches en leur donnant des tâches supplémentaires liées au vol (par exemple, procéder à un calcul de carburant ou mémoriser des éléments). Si les stagiaires sont incapables de réaliser ces tâches supplémentaires, cela indique aux instructeurs qu'ils sont soumis à une charge cognitive trop importante ou qu'ils rencontrent des difficultés. Les formateurs peuvent alors adapter la formation en conséquence. Cependant, cette méthode n'est pas standardisée et fournit très peu d'informations sur le niveau de charge cognitive des stagiaires. De plus, les tâches secondaires assignées par les instructeurs peuvent interférer avec les tâches principales des stagiaires. L'objectif de la présente étude est donc de tester une méthode basée sur la stratégie des formateurs qui permettrait d'objectiver et de mesurer avec plus de précision la charge cognitive des stagiaires. Plus précisément, le double objectif est de développer une méthode permettant de mesurer efficacement la charge cognitive des stagiaires et de répondre à la question de l'impact potentiel de cette méthode sur l'exécution des tâches principales aéronautiques en cours.

Après avoir expliqué pourquoi les situations multitâches ont un coût cognitif, nous décrivons le modèle de mémoire de travail auquel nous nous sommes référés pour opérationnaliser la mesure de ce coût dans une situation écologique. Nous présenterons ensuite une expérience dans laquelle la méthode d'évaluation de la charge cognitive est mise en œuvre par des instructeurs dans un contexte contrôlé.

Une situation multitâche comprend plusieurs tâches discrètes qui doivent être réalisées dans un temps donné. L'exécution d'une tâche commence par la préparation, qui peut être décrite comme l'adoption d'une configuration cognitive spécifique à la tâche qui permet de gérer les règles de résolution de la tâche (Jersild, 1927 ; Rogers & Monsell, 1995). Le processus d'adoption et de maintien d'une configuration cognitive repose sur les fonctions exécutives (Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, Howerter, & Wager, 2000 ; Monsell, 2015), et est modélisé au sein du processeur exécutif central (Baddeley, 2000).

Une tâche se déroule classiquement en quatre étapes : 1) perception du stimulus, 2) activation des règles de gestion de la tâche, 3) choix de la réponse, et 4) exécution de la réponse elle-même (Maquestiaux, 2012). Dans une situation de multitâche, le coût cognitif est principalement lié à l'impossibilité de réaliser les étapes 2 et 3 simultanément pour des tâches discrètes. En effet ces étapes, qui requièrent un traitement central (Pashler, 1994 ; Maquestiaux, 2012 ; Liepelt, Strobach, Frensch, & Schubert, 2011), doivent être réalisées

séparément pour chaque tâche dans une situation multitâche. Cette limitation due à l'impossibilité de la simultanéité du traitement central est imagée par un goulot d'étranglement central et fait également référence au phénomène de période réfractaire psychologique (Pashler, 1994 ; Telford, 1931). Par exemple, si un participant a reçu l'instruction de répondre d'abord à la tâche A, puis à la tâche B dans une situation de double tâche, le temps de réalisation de la tâche B est plus long qu'il ne le serait dans une situation de tâche simple. Ainsi, dans les tâches de laboratoire, le coût cognitif de la double tâche est mesuré par le temps supplémentaire nécessaire à la réalisation de la tâche B (voir figure 31).

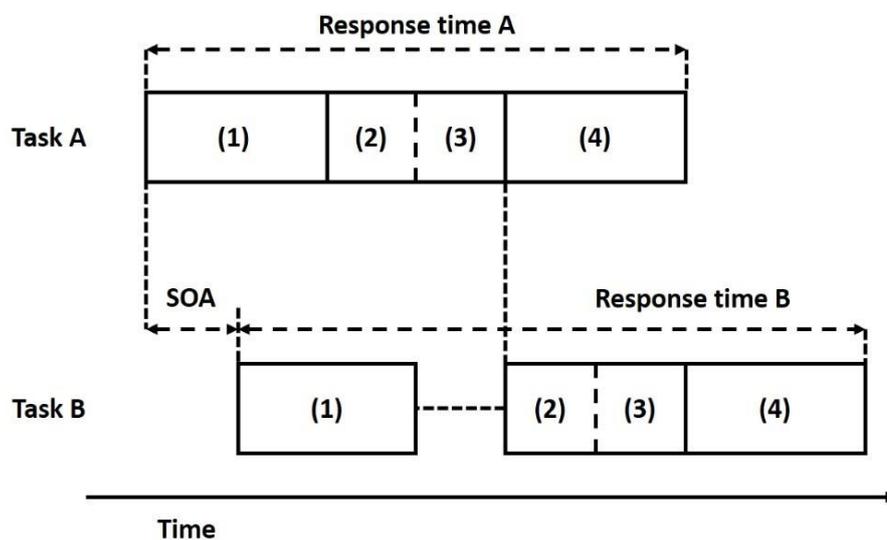


Figure 31. Représentation du goulot d'étranglement central. Lorsque l'asynchronie de l'apparition du stimulus (SOA), c'est-à-dire le temps entre la présentation de la tâche B et la présentation de la tâche A, est trop courte, le traitement central de la tâche B (c'est-à-dire les étapes 2 et 3) ne peut se produire qu'une fois que les étapes du traitement central de la tâche A sont terminées.

Ainsi, la gestion de deux tâches administrées simultanément nécessite de passer séquentiellement du traitement central d'une tâche au traitement central d'une autre tâche, alors que les étapes de perception du stimulus et de réponse motrice peuvent être réalisées en parallèle (Liepelt et al., 2011 ; Pashler, 1994 ; Strobach, Becker, Schubert, & Kühn, 2015 ; Wickens, 2008). Ce mécanisme est décrit comme la *permutation de tâche*, qui est une fonction exécutive (Miyake et al., 2000). Il diffère de la *répétition de tâche*, qui consiste en la réalisation successive d'une même tâche, comme le montre la figure 32.

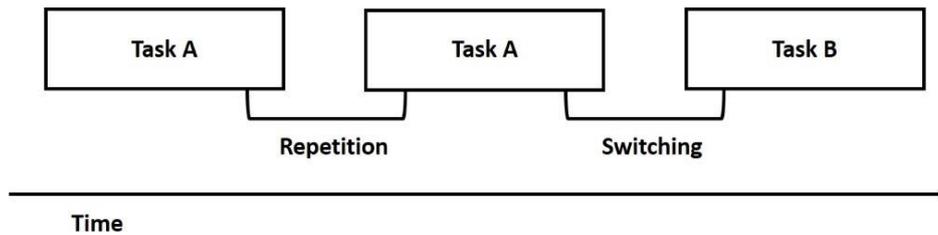


Figure 32. Représentation des situations de répétition et de permutation. La répétition consiste en l'exécution consécutive et répétée d'une même tâche. La permutation consiste en l'exécution consécutive de deux tâches distinctes.

Un coût cognitif similaire à celui décrit dans les situations de double tâche a été décrit dans des expériences impliquant l'administration séquentielle de tâches discrètes. Par exemple, Rogers et Monsell (1996) ont observé un coût plus faible lors de la répétition de la même tâche que lors de la permutation vers une tâche différente. Ce coût inférieur a été attribué au fait que la règle de résolution de la tâche, en situation de répétition, n'avait pas à être réactivée (étape 2). Cela suggère que lorsque deux tâches discrètes sont administrées séquentiellement, les règles de la première tâche doivent être désactivées pour permettre l'activation des règles de la tâche suivante. En résumé, il est cognitivement plus coûteux d'exécuter consécutivement deux tâches différentes (par exemple, passer d'une recherche visuelle à un calcul de carburant) que d'exécuter consécutivement deux tâches reposant sur les mêmes règles (par exemple, répéter un calcul de carburant) (Maquestiaux, 2012 ; Monsell, 2003, 2015 ; Rogers & Monsell, 1995). Le coût cognitif est donc également lié à l'accessibilité des règles : plus les règles sont accessibles, plus le coût cognitif est faible. Dans les situations multitâches, le coût plus élevé d'une première tentative à une tâche que celui des tentatives suivantes se matérialise par un temps de réponse plus long. Ceci peut être mesuré en comparant les temps de réponse entre une situation de permutation et une situation de répétition. Ainsi, la méthode que nous avons développée est basée sur la comparaison des temps de réponse dans des situations de permutation et de répétition. Elle a été spécifiquement conçue pour évaluer l'influence d'une tâche de mémorisation, telle que celles assignées par les instructeurs de vol, sur la performance d'autres tâches, et plus précisément sur l'activation de leurs règles.

La mémorisation et la permutation sont abordées dans le modèle de partage des ressources temporelles (TBRS) de la mémoire de travail (Barouillet, Bernardin, & Camos, 2004, 2007 ; Camos, 2017) qui implique des empan complexes. Alors que l'empan mnésique est

classiquement mesuré par le nombre d'items que l'individu est capable de se rappeler, les empan complexes sont caractérisés par l'introduction de tâches à réaliser entre chaque item présenté (voir Fig. 33). L'empan complexe nécessite donc une permutation entre mémorisation et traitement. La capacité à réaliser des tâches d'empan complexe repose nécessairement sur l'utilisation du mécanisme de permutation (Cowan, 1999).

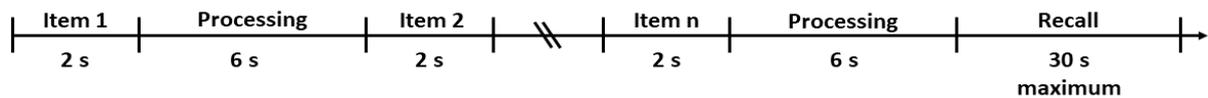


Figure 33. Procédure d'évaluation de l'empan complexe. Le participant doit mémoriser une liste d'items qui sont présentés de manière séquentielle. Une tâche de traitement est insérée entre les items à mémoriser. Après le dernier item et une dernière tâche de traitement, le participant est invité à rappeler la liste des items dans l'ordre de présentation.

Deux facteurs influencent la performance d'empan complexe, en provoquant un déclin des traces mnésiques des items (Barouillet et al., 2004) : d'une part, la longueur des intervalles de temps entre chaque item et, d'autre part, la charge cognitive induite par la tâche de traitement. L'évaluation de la performance d'empan complexe d'un individu pendant un vol peut donc fournir un indicateur objectif de la charge cognitive de l'individu lors de l'exécution des tâches aéronautiques.

## 2. Méthode

Notre étude a deux objectifs. Le premier est de tester cette méthode dans une situation multitâche aéronautique, basée sur les stratégies utilisées par des instructeurs de l'armée de l'air française, afin d'évaluer la charge cognitive des pilotes stagiaires. Le second est d'analyser et de déterminer les interférences potentielles de cette méthode avec les tâches principales en cours de réalisation.

À cette fin, nous avons développé un ensemble de tâches qui représentent des composantes simplifiées de l'activité de vol. Plus précisément, nous avons choisi deux tâches de sécurité aéronautique : une activité de recherche visuelle appelée « voir-et-éviter », et une activité de recherche radar appelée « détecter-et-éviter ». Le but de la tâche « voir et éviter » est de trouver un cercle plus grand (cible) parmi un ensemble de cercles plus petits (distracteurs). L'objectif de la tâche de détection et d'évitement, qui imite un écran radar simplifié, est de trouver une trajectoire non conflictuelle parmi un ensemble de trajectoires

conflictuelles. Pour chaque tâche de sécurité, nous avons compté le nombre de réponses correctes et enregistré les temps de réponse.

Conformément au protocole d'évaluation de l'empan complexe décrit ci-dessus, les stagiaires de l'armée de l'air doivent effectuer une tâche de navigation tout en réalisant l'une des tâches de sécurité. Cette tâche de navigation consiste à gérer les éléments d'une branche de navigation, et plus particulièrement à mémoriser huit éléments classiques d'une branche de navigation. Les deux tâches de sécurité sont, quant à elles, insérées en tant que tâches de traitement entre les éléments à mémoriser (voir Fig. 34). Les tâches sont affichées sur deux écrans placés l'un au-dessus de l'autre. Les tâches de sécurité sont affichées sur l'écran supérieur, et la tâche de navigation sur l'écran inférieur (c'est-à-dire comme si la carte de navigation était sur une planche portée sur les genoux), afin de respecter l'organisation spatiale d'un cockpit réel (Froger, Blättler, Dubois, Camachon, & Bonnardel, 2018).

Lors des situations de double tâche, 25 % du temps est alloué à la présentation de la tâche de navigation, et 75 % du temps à la présentation des tâches de sécurité, afin de respecter la recommandation de la Federal Aviation Administration dans son manuel d'information aéronautique (AIM 2020 8.1.6.C.3) selon laquelle les pilotes devraient passer 20-25 % de leur temps à regarder les instruments, et 75-80 % de leur temps à regarder à l'extérieur. Les tâches représentent certains aspects d'une activité aéronautique, tant par la nature des tâches que par leur organisation spatio-temporelle.

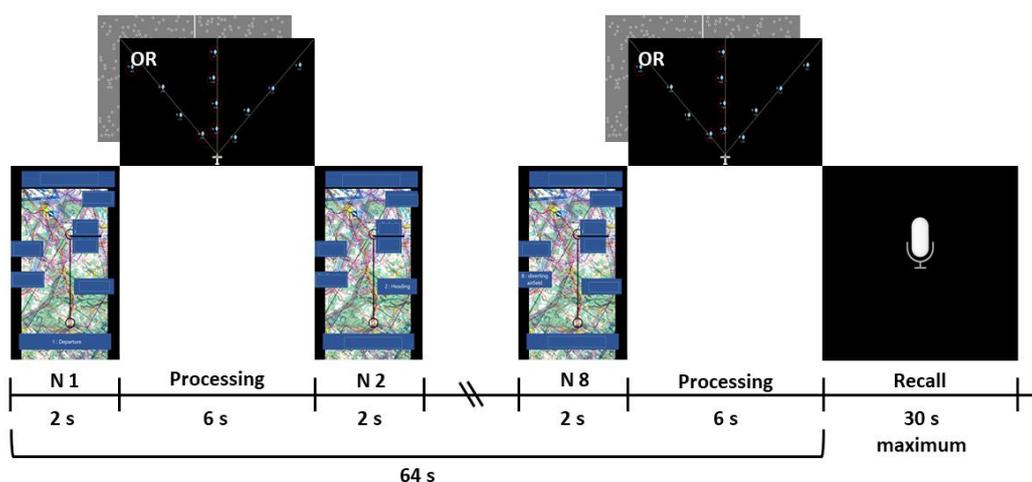


Figure 34. Présentation d'un test dans une situation multitâche ([navigation + voir-et-éviter] ou [navigation + détecter-et-éviter]).

### 3. Hypothèses

Le but de la tâche de navigation étant de mémoriser les éléments de la branche et de les rappeler ensuite, la performance a été mesurée sous la forme d'un empan opérationnel. Ce dernier a été défini comme correspondant au nombre d'éléments correctement rappelés, dans le bon ordre, avant toute erreur (élément oublié ou erreur dans l'ordre de rappel). Sur la base du modèle TBRS (Camos et al., 2004), nous avons déduit que plus l'empan est grand, plus la charge cognitive de l'individu est faible.

Les tâches pouvaient être présentées soit dans le cadre d'une situation multitâche, en demandant aux participants d'effectuer alternativement la tâche de mémorisation (navigation) et une tâche de traitement (voir-et-éviter ou détecter-et-éviter), soit dans le cadre d'une situation simple tâche, en leur demandant d'effectuer exclusivement soit la tâche de mémorisation, soit une tâche de traitement. Classiquement, la littérature montre que plus la tâche de traitement est cognitivement exigeante, plus l'empan complexe est faible. C'est pourquoi notre première hypothèse prédit que l'empan complexe sera plus faible dans une situation multitâche que dans une situation simple tâche.

Au cours de chaque tâche de sécurité, les participants pouvaient effectuer plusieurs essais. Selon le modèle de Roger et Monsel (1995), le premier essai nécessite l'activation des règles de résolution de la tâche, tandis que les essais suivants ne nécessitent pas cette activation et correspondent donc à des répétitions (voir Fig. 32). Dans la littérature, une situation de permutation a classiquement un coût plus élevé qu'une situation de répétition. Dans la présente étude, le coût cognitif étant mesuré par le temps de réponse pour chaque essai, nous nous attendons à ce que le temps de réponse soit plus long pour l'essai 1 que pour l'essai 2 dans une situation multitâche, en raison du coût lié à la permutation de tâche. C'est pourquoi notre deuxième hypothèse prévoit que les participants présenteront un coût cognitif, c'est-à-dire un temps de réponse plus élevé, exclusivement dans la condition de permutation en situation multitâche. En outre, comme cela est classiquement observé en laboratoire, nous avons émis l'hypothèse que le taux d'erreur sera plus élevé dans la situation multitâche que dans la situation simple tâche (Liepelt et al., 2011).

## 4. Protocole

### Participants

Quinze participants (Mage = 23 ans, fourchette = 21-27 ans) ont été répartis en trois groupes : deux groupes qui effectuent des tâches en situation multitâche, et un groupe effectuant des tâches en situation simple tâche. Pour trois participants, l'expérience a été interrompue, rendant leurs données inutilisables. Tous les participants étaient des élèves de l'école de l'air basés à Salon-de-Provence, et avaient déjà entre 55 et 260 heures de vol (M = 122,8). Ils ne présentaient aucun problème auditif, ni visuel.

### Apparatus et Stimuli

Les expériences ont été réalisées sur un ordinateur Dell precision7710. Les réponses verbales étaient effectuées via le microphone de l'ordinateur, et les réponses motrices via le clavier. Les stimuli étaient affichés sur deux écrans de 17 pouces placés l'un au-dessus de l'autre, chacun ayant une résolution de 1920\*1080. Les expériences ont été codées à l'aide du logiciel E-Prime3.

#### Présentation des tâches

Deux types de tâches (mémorisation ou traitement) ont été administrés aux participants. La tâche dite de navigation, qui consistait en 8 éléments à mémoriser puis à rappeler, était affichée sur l'écran inférieur. Les tâches de sécurité (voir-et-éviter et détecter-et-éviter) étaient affichées sur l'écran supérieur.

#### *Tâche de mémorisation (tâche dite de navigation).*

La tâche dite de navigation consistait à mémoriser 8 éléments d'une branche de navigation affichés sur une carte aéronautique réelle (voir Fig. 35). L'expérience comprenait 20 branches de navigation pour la phase expérimentale, et 6 pour la phase de familiarisation. Aucune branche de navigation n'étant identique, 26 branches de navigation différentes ont été créés. Chacune a été construite en prenant en considération les performances de l'avion Cirrus SR 22 (avion utilisé par l'armée de l'air française). Les cartes aéronautiques étaient des cartes militaires au 1/500 000 (dernière mise à jour en 2019). Chaque image sélectionnée représentait un rectangle de 35,4 milles nautiques de long et 18,3 milles nautiques de large,

comportant une étape de navigation de 512 minutes à une vitesse de 150 nœuds. Les 8 éléments étaient les suivants : (1) ville de départ, (2) cap (en degrés), (3) ville d'arrivée, (4) durée de l'étape (temps nécessaire pour effectuer le trajet ; e.g., " 10'20 " = 10 minutes 20 secondes), (5) altitude de sécurité (en pieds), (6) quantité minimale de carburant nécessaire pour atteindre la destination, (7) quantité de carburant restant dans les réservoirs (en gallons, comme sur le SR22), et (8) zone la plus proche à atteindre en cas de problème (aérodrome de détournement). Au cours d'une branche de navigation, chaque élément était affiché une fois à l'écran pendant 2 secondes, après quoi il était effacé. L'ordre dans lequel les items étaient présentés respectait l'ordre suivi au cours de l'instruction des stagiaires. Dans la phase de rappel, les participants devaient se souvenir verbalement du plus grand nombre d'éléments possible en 30 secondes.

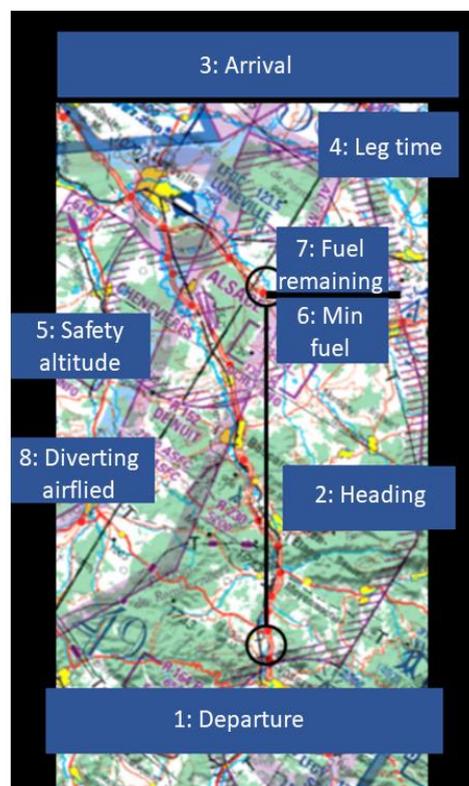


Figure 35. Vue d'ensemble de tous les éléments que les participants devaient mémoriser pendant un essai de tâche de navigation. Les éléments apparaissaient un par un, dans l'ordre des numéros de la figure, et restaient à l'écran pendant 2 secondes.

### ***Tâches de traitement (tâches de sécurité).***

Les tâches de traitement duraient chacune 6 secondes et consistaient en un ou plusieurs essais de la tâche "voir-et-éviter" ou "détecter-et-éviter". Pendant cette période de

6 secondes, toute réponse du participant était suivie d'un nouvel essai. Seules les réponses aux deux premiers essais ont été enregistrées. Dans la situation multitâche, la première réponse à la tâche de sécurité suivant la tâche de navigation était considérée comme reflétant une permutation, tandis que la deuxième réponse à la tâche de sécurité était considérée comme une répétition.

La tâche "voir et éviter" (voir Fig. 36), dont l'objectif était de trouver un cercle plus grand (cible) parmi un ensemble de cercles plus petits (distracteurs), était une tâche *surrogate reference task* ou SuRT (par exemple, Mattes & Hallen, 2009). Il y avait toujours 400 cercles à l'écran, mais la cible n'était présente que dans certains essais. Le contour de chaque cercle avait une épaisseur de 3 px, et son diamètre était de 20 px (35 min d'arc) pour un distracteur, et de 26 px (44 min d'arc) pour une cible. Il était impossible de percevoir la cible de manière préattentive car la cible et les distracteurs avaient la même forme et la même couleur. La cible apparaissait de manière aléatoire à gauche ou à droite d'un écran tête haute divisé en deux parties, ou était totalement absente. Les participants devaient répondre le plus rapidement possible en appuyant sur l'une des trois touches (I si la cible se trouvait dans l'écran de gauche, P si la cible se trouvait dans l'écran de droite, et O s'il n'y avait pas de cible). Lorsque les participants donnaient une réponse, un nouvel essai suivait. Les probabilités d'apparition (gauche, droite, non présente) étaient identiques. La qualité (correcte ou non) des réponses était enregistrée, ainsi que les temps de réponse pour les réponses correctes. Cette tâche durait 6 secondes.

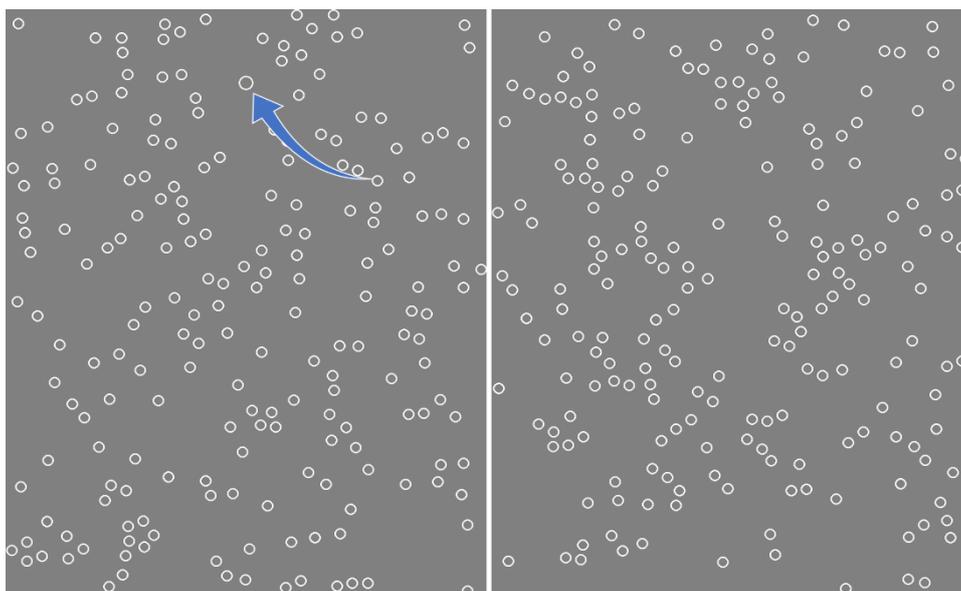


Figure 36. Tâche "voir et éviter". Exemple d'un stimulus auquel un participant peut être exposé. Les distracteurs sont les petits cercles, et la cible (indiquée par la flèche) dans cet essai est sur le côté gauche de l'écran.

La tâche de "détection et évitement" (voir Fig. 37) était la deuxième tâche de sécurité, et son objectif était de trouver la trajectoire non conflictuelle. Dans chaque essai, les participants devaient choisir entre trois trajectoires, dont une seule était non-conflictuelle. Chaque trajectoire était représentée par une ligne droite avec quatre pastilles indiquant la présence d'un avion. Chacun de ces avions était associé à deux types d'informations : (1) une direction vers le haut ( $\uparrow$ ) ou vers le bas ( $\downarrow$ ), et (2) une altitude précise supérieure (+) ou inférieure (-) à celle de l'avion du participant. La trajectoire était conflictuelle si l'objet était en dessous et montait ou au-dessus et descendait. Les trajectoires non conflictuelles étaient donc soit + et  $\uparrow$  soit - et  $\downarrow$  (les participants étaient naïfs quant à la stratégie à adopter). Les participants devaient appuyer sur I si la trajectoire non conflictuelle était à gauche du radar, P si la trajectoire était à droite du radar et O si la trajectoire était au milieu du radar. Le nombre de réponses correctes et incorrectes a été enregistré, ainsi que les temps de réponse pour les réponses correctes. Chaque réponse était suivie d'un nouvel essai. Les probabilités d'apparition de la trajectoire non conflictuelle (gauche, droite ou milieu) étaient identiques.

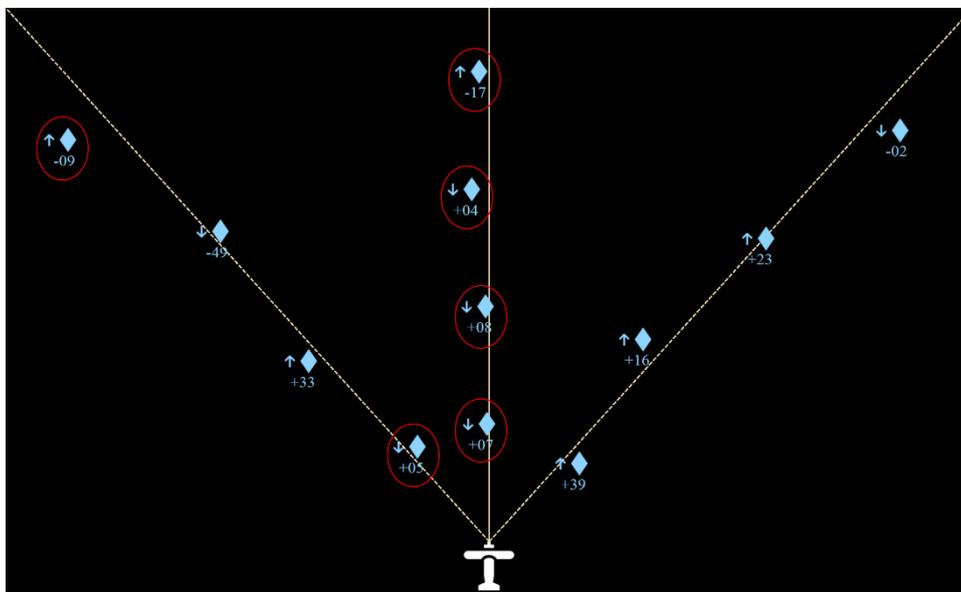


Figure 37. Tâche de détection et d'évitement. Exemple d'un essai. Les participants devaient décider laquelle des trois trajectoires était non-conflictuelle. Dans cet essai, la trajectoire non-conflictuelle est à droite.

## Procédure

Pour caractériser davantage les participants, dans un premier temps a été réalisée une évaluation de leurs capacités exécutives centrales en fonction des tâches qu'ils auraient à accomplir. Cette évaluation a été suivie de deux phases successives : (1) la familiarisation à la tâche, et (2) la passation de l'expérience proprement dite.

Afin de garantir l'homogénéité des trois groupes, nous avons évalué la capacité de permutation des participants (Strobach et al., 2015) et leur mémoire de travail (WAIS-IV ; Wechsler, 2008). Une analyse intergroupe de la capacité de permutation et de la mémoire de travail n'a montré aucune différence significative entre les groupes,  $F(2, 9) = 0,003$ ,  $p = 0,99$ , et  $F(2, 9) = 3,045$ ,  $p = 0,098$ .

Pendant la phase de familiarisation, chaque groupe a effectué chaque tâche deux fois en situation simple tâche, et six fois en situation multitâche (3\* [navigation + voir-et-éviter] et 3\* [navigation + détecter-et-éviter]). La répartition des situations (multitâche vs. simple tâche) rencontrées par chaque groupe est présentée dans le tableau 2.

*Tableau 2. Organisation de la situation (multitâche ou simple tâche) pour chaque groupe.*

	TASKS		
	NAVIGATION	VOIR ET EVITER	DETECTER ET EVITER
Groupe 1	MULTITACHE	MULTITACHE	SIMPLE TACHE
Groupe 2	MULTITACHE	SIMPLE TACHE	MULTITACHE
Groupe 3	SIMPLE TACHE	SIMPLE TACHE	SIMPLE TACHE

Chaque essai multitâche (voir Fig. 38) était composé d'une branche de navigation et de huit tâches de traitement. Chaque bloc multitâche était composé de 20 essais multitâches. Dans chaque bloc, les branches de navigation étaient présentées de manière aléatoire. Chaque essai simple tâche consistait soit en une branche de navigation (voir Fig. 39B), soit en huit tâches de traitement (voir Fig. 39A). Chaque bloc de tâches simples comprenait 20 essais de tâches simples. Pour chaque groupe, les blocs ont été présentés dans un ordre aléatoire.

Dans la phase expérimentale, le groupe 1 a effectué un bloc multitâche (navigation et détecter-et-éviter) et un bloc simple tâche de voir-et-éviter. Le groupe 2 a effectué un bloc

multitâche (navigation et voir-et-éviter) et un bloc simple de détecter-et-éviter. Le groupe 3 a effectué un bloc simple tâche de navigation, un bloc simple tâche de voir-et-éviter, et un bloc simple tâche de détecter-et-éviter.

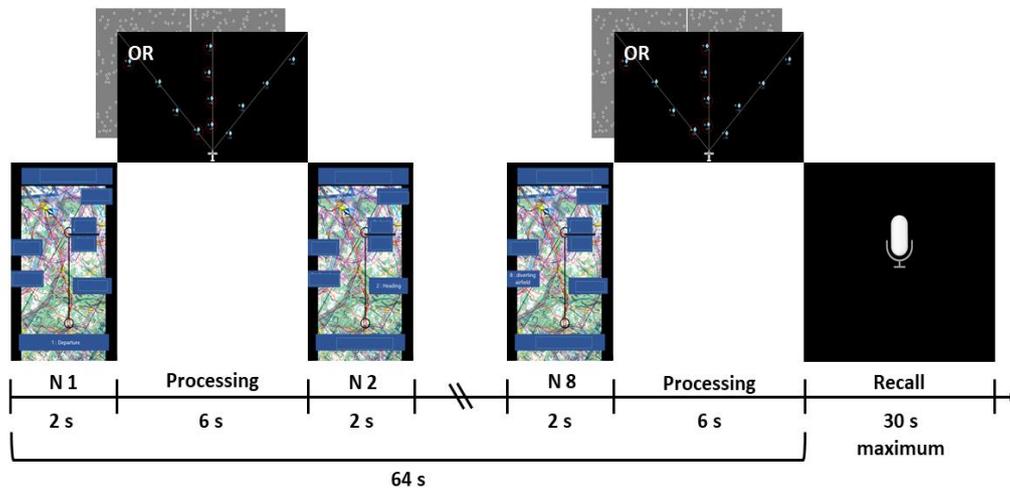


Figure 38. Exemple d'un essai multitâche. Huit éléments de navigation alternent avec huit tâches de traitement (voir-et-éviter ou détecter-et-éviter). La dernière tâche de traitement est suivie de la phase de rappel, au cours de laquelle le participant rappelle verbalement autant d'éléments que possible.

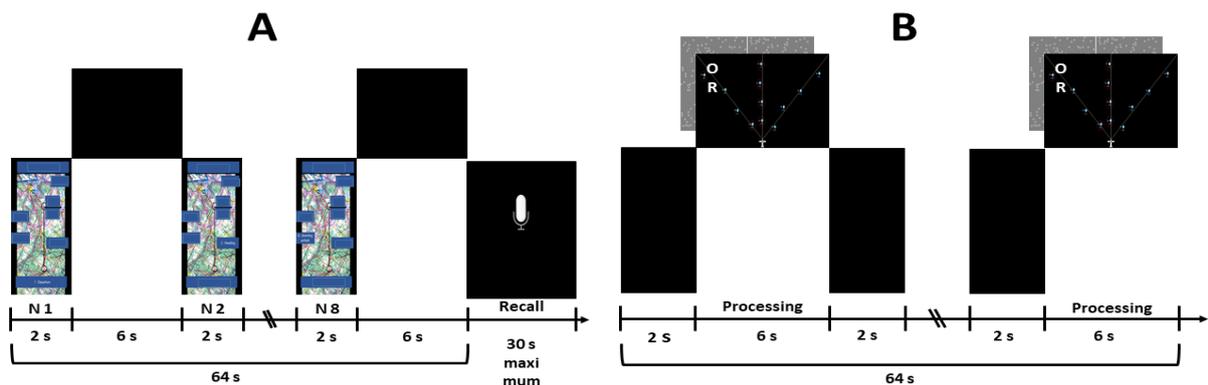


Figure 39. Essais en tâche simple. 39A : huit éléments de navigation sont présentés. Après la dernière tâche de navigation suivie d'un écran noir présenté six secondes, le participant rappelle verbalement autant d'éléments que possible. 39B : huit tâches de traitement identiques sont présentées pendant un essai : soit voir-et-éviter, soit détecter-et-éviter.

### Mesure de la performance

Pour la tâche de mémorisation, deux types de mesure ont été effectuées : l'empan classique, où était compté le nombre d'éléments rappelés dans le bon ordre, et l'empan opérationnel, où était compté le nombre d'éléments rappelés dans le bon ordre avant toute erreur.

Pour les tâches de traitement, les temps de réponse et les taux d'erreur pour les tâches voir-et-éviter et détecter-et-éviter ont été enregistrés. Seuls les temps de réponse pour les réponses correctes ont été analysés.

## 5. Résultats

### Tâche de mémorisation

Une analyse de variance (ANOVA) effectuée pour comparer les empan n'a permis de montrer aucune différence significative entre les groupes 1 et 2 que ce soit pour l'empan classique ou opérationnel,  $F(1, 6) < 1$ ,  $p = 0,96$ , et  $F(1, 6) < 1$ ,  $p = 0,88$ . Comme les groupes 1 et 2 ont tous deux effectué la tâche de mémorisation dans une situation multitâche (voir Tableau 1), ils ont été considérés ensemble dans la modalité multitâche du facteur situation dans les analyses suivantes. Nous avons effectué des ANOVA à un facteur avec la situation (multitâche vs. simple tâche) comme facteur inter-groupes pour les empan classique et opérationnel.

#### Empan classique

L'effet de la situation est significatif,  $F(1, 10) = 5,76$ ,  $p < 0,05$ . Moins d'items ont été rappelés correctement dans le bon ordre dans la situation multitâche ( $M = 5.43$ ,  $SD = 0.31$ ) que dans la situation simple tâche ( $M = 6.625$ ,  $SD = 0.33$ ). Les résultats de cette expérience sont en accord avec la littérature, où l'empan complexe classique est de cinq items chez les adultes (Camos & Barouillet, 2004).

#### Empan opérationnel

L'effet de la situation est significatif,  $F(1, 10) = 11.48$ ,  $p < .01$  (Figure 40). Moins d'éléments ont été rappelés correctement dans le bon ordre avant qu'une erreur ne se produise dans la situation multitâche ( $M = 3,6$ ,  $ET = 0,3$ ) que dans la situation simple ( $M = 5,36$ ,  $ET = 0,41$ ).

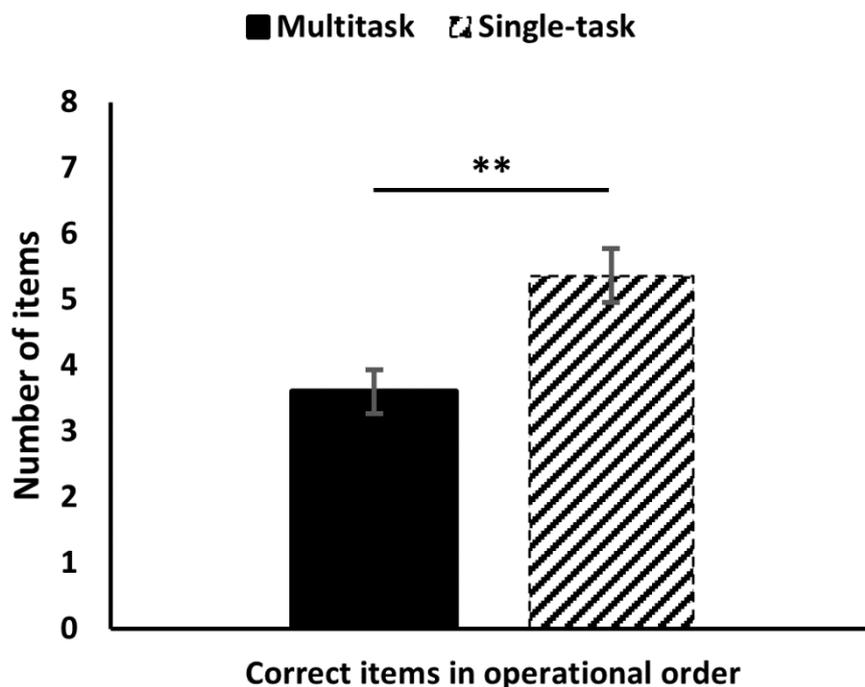


Figure 40. Nombre moyen de réponses correctes sur l'ensemble des 20 essais de navigation pour l'empan opérationnel.

### Tâche interférente

Les analyses préliminaires n'ont pas révélé de différences significatives en ce qui concerne le temps de réaction, ni le taux d'erreur entre les tâches de traitement voir-et-éviter et détecter-et-éviter,  $F(1, 6) < 1, p = 0,65$ , et  $F(1, 6) < 1, p = 0,81$ . Pour cette raison, les données de ces deux tâches de traitement ont été considérées ensemble pour les variables dépendantes du temps de réaction et du taux d'erreur. Ainsi, une ANOVA à mesures répétées pour le temps de réaction comportait le facteur entre les groupes de la situation (multitâche vs. simple tâche) et le facteur interne au groupe de l'essai (essai 1 vs. essai 2). Une ANOVA à un facteur pour le taux d'erreur a mis en évidence la situation du facteur inter-groupes (multitâche vs. simple tâche).

### Temps de réponse

L'effet de l'essai est significatif,  $F(1, 22) = 76.8115, p < .001$ . Les temps de réponse ont été plus longs lors de l'essai 1 ( $M = 3246.84$  ms,  $SD = 165.83$ ) que lors de l'essai 2 ( $M = 1298.38$  ms,  $SD = 132.12$ ).

L'effet de la situation est également significatif,  $F(1, 22) = 5,3213$ ,  $p < 0,05$ . Les temps de réponse ont été plus courts dans la situation multitâche ( $M = 1942$  ms,  $ET = 477,83$ ) que dans la situation simple tâche ( $M = 2437,9$  ms,  $ET = 285,22$ ) (Figure 41). Les analyses post hoc HSD de Tukey ont montré que les paires suivantes différaient de manière significative ( $p < 0,001$ ) : essai multitâche 1 ( $M = 2861,5$  ms,  $ET = 427,45$ ) et essai multitâche 2 ( $M = 1022,6$  ms,  $ET = 254,97$ ), essai simple tâche 1 ( $M = 3439,5$  ms,  $ET = 114,85$ ) et essai simple tâche 2 ( $M = 1436,3$  ms,  $ET = 145,5$ ). Aucun effet d'interaction n'a pu être montré,  $F(1, 22)$ ,  $p < 1$ .

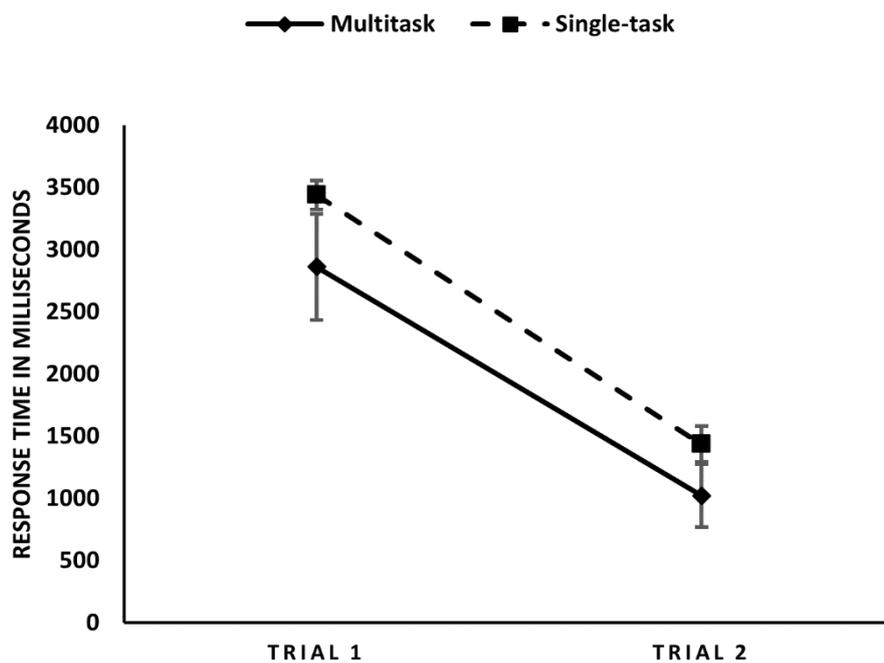


Figure 41. Temps de réponse moyens en fonction de l'essai dans les situations multitâche et simple tâche. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

### Taux d'erreurs

L'effet de la situation est significatif,  $F(1, 22) = 5,75$ ,  $p < 0,05$ . Les taux d'erreur ont été plus élevés dans les situations multitâches ( $M = 0,45$ ,  $ET = 0,11$ ) que dans les situations simples ( $M = 0,27$ ,  $ET = 0,06$ ).

## 6. Discussion

Dans un contexte aéronautique caractérisé par des situations multitâches, l'objectif de la présente étude était de tester une méthode d'évaluation de la charge cognitive des pilotes stagiaires, basée sur les stratégies des instructeurs de l'armée de l'air française. Notre second objectif était d'analyser l'impact potentiel de cette méthode sur les tâches en cours.

Notre première hypothèse était que l'empan complexe (opérationnel et classique) est plus faible dans une situation multitâche que dans une situation simple tâche, car cette dernière ne comporte pas de tâche de traitement entre chaque item de la tâche de mémorisation. Les résultats montrent que les participants qui ont effectué la tâche de mémorisation en situation simple tâche ont un empan moyen plus important que ceux qui ont effectué la tâche en situation multitâche. Cela signifie que les tâches de traitement ont exacerbé le déclin des traces mnésiques des items de rappel, comme le prédit le modèle TBRS (Camos & Barouillet, 2004). Ce modèle stipule que deux facteurs agissent sur le déclin des traces mnésiques dans une tâche d'empan complexe : le temps et la charge cognitive induite par la tâche de traitement. Ainsi, pour la première fois, notre étude a montré qu'*il est possible d'évaluer la charge cognitive des individus en adaptant un protocole habituellement utilisé en laboratoire pour évaluer l'empan complexe dans un environnement simulant partiellement un contexte aéronautique*. Cette procédure présente de multiples avantages.

Il s'agit d'une méthode utile pour mesurer le coût cognitif des tâches effectuées lors d'une activité spécifique dans un environnement écologique. Comme le montre la présente étude, elle peut être utilisée pour évaluer le coût cognitif de chaque tâche à réaliser lors des vols d'entraînement. Cette cartographie du coût de chacune des tâches pourrait servir de base pour ajuster le rythme de l'entraînement, en s'assurant ainsi que la charge cognitive est compatible avec un apprentissage efficace (Sweller, 1994). Notre méthode permettrait également d'adopter une approche individualisée pour chaque stagiaire, au lieu de l'approche générale actuelle. L'évaluation de la charge cognitive des individus devrait permettre d'adapter les exigences de la tâche en temps réel.

Ces résultats encouragent l'utilisation de ce type de méthode pour analyser et objectiver la charge cognitive des individus au cours d'une activité, notamment en dehors du laboratoire et sans utiliser de capteurs physiologiques (tels que des dispositifs de type eye-

*tracker*, électromyogramme ou électrocardiogramme) qui sont complexes à utiliser au cours d'une activité réelle. De plus, cette méthode permet une mesure objective de la charge cognitive, contrairement aux mesures subjectives classiques telles que le NASA TLX (Hart & Staveland, 1988).

La deuxième hypothèse était que seuls les participants effectuant des tâches dans une situation multitâche (c'est-à-dire les participants qui doivent changer de tâche) subiraient une augmentation du coût cognitif, en raison de la nécessité de réactiver les règles (Miyake et al., 2000, Rogers & Monsell, 1995). Rogers et Monsell ont mis en évidence le coût cognitif du changement de règle dans les situations de multitâches séquentielles. Le même type de coût a également été mis en évidence dans les situations de double tâche (Liepelt et al., 2011 ; Strobach et al., 2015). Nos résultats ont montré que les groupes ayant réalisé les tâches en situation de simple tâche (c'est-à-dire exclusivement des situations de répétition) ont également subi une augmentation de la charge cognitive, comme s'ils devaient eux aussi réactiver les règles de la tâche de sécurité (traitement). En moyenne, les temps de réponse étaient plus longs pour l'essai 1 que pour l'essai 2 pour tous les groupes. Cela suggère que les participants dans la situation de simple tâche se sont également trouvés dans une situation de permutation après une interruption de 2 secondes. En d'autres termes, même sans tâche de mémorisation insérée entre deux tâches de traitement, un intervalle de 2 secondes est suffisant pour désactiver les règles. Ainsi, pour les tâches de traitement, le coût cognitif observé dans une situation de simple tâche n'est pas différent du coût cognitif observé dans une situation multitâche. Cela suggère que, dans un environnement réel, l'ajout d'une tâche de mémorisation n'ajoute pas de coût supplémentaire de la permutation. Le taux d'erreur plus élevé dans la situation multitâche que dans les situations simple tâche est conforme à la littérature (par exemple, Liepelt et al., 2011). En revanche, nous avons observé des temps de réponse plus courts dans la situation multitâche que dans la situation simple tâche. Cette association entre un temps de réponse plus rapide et un taux d'erreur plus élevé a également été observée par Liepelt et al. (2011). Néanmoins, la raison pour laquelle les participants dans la situation multitâche ont répondu plus rapidement reste à déterminer.

En résumé, dans ce contexte, le coût cognitif de la situation multitâche s'est reflété dans la tâche de mémorisation, avec des temps de réponse plus courts pour les tâches de traitement mais un taux d'erreur plus élevé. Notre méthode présente des avantages

considérables, car elle est très peu coûteuse en termes de temps et de ressources pour les instructeurs. Cependant, une adaptation devra être testée dans de futures études, afin de permettre l'évaluation en temps réel de la charge cognitive associée à des tâches de traitement pendant un vol conventionnel.

L'objectivation de la charge cognitive en temps réel est un défi majeur. De nombreuses technologies sont en cours de développement (reposant sur de l'eyetracking, des enregistrements électromyogramme ou électrocardiogramme, etc.), mais ces technologies restent peu pratiques pour les opérateurs. Pour la première fois, la présente étude a montré qu'il est possible d'évaluer la charge cognitive des individus en adaptant un protocole habituellement utilisé en laboratoire pour évaluer des écrans complexes à un environnement simulé (partiellement) un contexte aéronautique. Ce type de méthode pourrait potentiellement être appliqué à tous les individus, des novices aux experts. En permettant de mesurer la charge cognitive induite par différentes tâches lors de situations dynamiques, cette méthode devrait permettre d'apporter des améliorations à la formation (ex. : syllabus). De plus, la possibilité de mesurer la charge cognitive associée aux systèmes en cours de développement et, plus généralement, aux nouvelles interfaces, permettra d'optimiser l'organisation du travail dans le cockpit (aviation, transport maritime, ferroviaire, routier, etc.) dès la phase de conception.

## **Chapitre 6 : Discussion générale**

# 1. Synthèse

Ce travail de thèse vise à apporter des éléments de réponse au problème de surcharge cognitive qui s'observe dans certaines parties des missions des membres d'équipage de l'aviation de chasse. Pour traiter cette question, nous nous sommes centrés sur les dimensions de formation et d'entraînement. Plus particulièrement est étudiée l'articulation des processus génériques et spécifiques au cours du développement de l'expertise. En effet, la compréhension de ces processus contribuera à déterminer quels mécanismes sont à solliciter pour optimiser la formation et l'entraînement des membres d'équipages.

Quand l'individu est novice, il ne dispose que de mécanismes génériques de type permutation notamment pour réaliser les tâches qui sont nouvelles pour lui (chapitre 1). Pour un novice, toute activité correspond à une situation multitâche. Au fur et à mesure de la répétition d'épisodes de l'activité, des mécanismes spécifiques d'automatisation et de *chunking* sont à l'œuvre. Le mécanisme générique de permutation reste utilisé et donc renforcé jusqu'à ce que le niveau de *chunking* concerne l'ensemble des tâches impliquées dans l'activité. Cet état final, suite à une exposition suffisamment répétée aux épisodes constitutifs de l'activité, est appelé l'expertise. Tout se passe comme si, pour l'expert, l'activité qu'il effectue correspondait à une situation de simple tâche. Toutefois, certaines activités, comme l'aéronautique de combat, ne permettent pas un nombre suffisant d'exposition aux situations et/ou comprennent un trop grand nombre de tâches discrètes pour permettre d'atteindre pleinement le niveau d'expert. Un travail d'identification des tâches de nature à générer de la surcharge cognitive en vol a été conduit (étude de terrain présentée dans le chapitre 2) auprès d'un escadron de chasse. Les tâches identifiées (notamment la tâche "regarder dehors") ont structuré la construction des expériences de laboratoire afin de pouvoir analyser les mécanismes abordés précédemment dans le contexte aéronautique.

Deux expériences complémentaires (présentées dans les chapitres 3 et 4) ont ainsi été réalisées dans le but de favoriser le développement rapide d'un comportement respectant les recommandations aéronautiques. La simplification du monde considéré en se concentrant uniquement sur certaines tâches permet d'accélérer les processus spécifiques d'automatisation et de *chunking*. Si la mise en œuvre de ce type de méthode en escadron semble prometteuse, il reste à évaluer les effets de transfert et la quantité d'entraînement

individuel nécessaire. Il reste également à objectiver les tâches générant de la surcharge cognitive.

La 3<sup>ème</sup> expérience réalisée s'inscrit dans cette démarche, en se centrant sur une méthode complémentaire à l'observation et au questionnaire qui ont été présentés dans le chapitre 2. La méthode d'objectivation proposée est en effet adaptable aux situations de vols réel et simulé, n'est pas encombrante (i.e. convient aux cabines étroites des avions de chasse) et permet de mesurer la charge cognitive sans augmenter le coût de la réalisation de la tâche évaluée.

Ce travail de thèse a ainsi apporté des contributions à la fois théoriques et appliquées dans le domaine du développement de l'expertise qui sont résumées dans le tableau ci-dessous.

*Tableau 3 – principaux résultats théoriques et appliqués du travail de thèse*

<p>Partie théorique (chapitre 1)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Contribution théorique : Modélisation de l'articulation de la fonction exécutive de permutation et de l'automatisation (création de schéma) au cours du développement de l'expertise</li><li>- Contribution théorique : Modélisation de la dynamique d'évolution de processus génériques et spécifiques au cours du développement de l'expertise</li></ul>
<p>Etude de terrain (chapitre 2)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Contribution appliquée : identification subjective des tâches générant de la surcharge cognitive au cours de l'activité de vol sur Mirage 2000D</li></ul>
<p>Expérience 1 (chapitre 3)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Contribution théorique : Intégration d'une dimension temporelle au sein du <i>task set schemata</i></li><li>- Contribution appliquée : possibilité de développer un entraînement permettant de respecter un temps de regard dédié à la surveillance du ciel</li></ul>
<p>Expérience 2 (chapitre 4)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Contribution appliquée : intégration d'une dimension temporelle au sein du <i>task-set schemata</i> en situation plus écologique et sans dispositif technique lourd (<i>eye-tracker</i>)</li></ul>
<p>Expérience 3 (chapitre 5)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Contribution théorique : Résultat inédit : en situation de répétition de tâche, une interruption de tâche de deux secondes agit, chez le novice, comme une situation de permutation</li><li>- Contribution appliquée : Méthode d'identification objective des tâches générant de la surcharge cognitive</li></ul>

## 2. Limites et perspectives

### Situation écologique *versus* de laboratoire

La limite principale de ce travail concerne l'approche d'une situation écologique très complexe au moyen d'une simulation partielle de l'activité aéronautique reposant sur des tâches qui ont été considérées comme représentatives de l'activité des navigants. En situation écologique, différents facteurs interviennent, tels que l'interruption des tâches, la communication en langue étrangère, le manque de sommeil, les difficultés de coordination ou la densité des échanges verbaux (Bourgeois-Bougrine, Cabon, Gounelle, Mollard, Coblentz, 2003). Ces facteurs n'ont pas été reproduits dans les situations de laboratoire bien qu'ils soient de nature à pouvoir agir sur les processus cognitifs considérés et il est à souligner que la réalisation d'études en situation écologique est non seulement compliquée dans une cabine étroite mais surtout interdite au regard de la sécurité des vols et des normes d'emport de matériel à bord des aéronefs d'état.

Néanmoins, l'ensemble des résultats obtenus dans les études expérimentales permettent d'envisager la conduite de prochaines études en environnement écologique. En effet, les apports méthodologiques de ce travail de thèse permettent d'envisager, au cours de vols réels :

- d'une part l'évaluation de l'intégration de la dimension temporelle d'une tâche sans avoir besoin de recourir à l'embarquement d'un *eye-tracker*,
- et, d'autre part, la mesure objective du coût cognitif des tâches à réaliser.

Afin de se rapprocher au mieux de la situation écologique, une étude en cours explore les liens entre le mécanisme de permutation et les performances en mission opérationnelle. Dans cette étude deux équipiers, chacun à bord de son avion Mirage 2000, doivent réaliser une mission d'attaque au sol. Cette étude est réalisée au moyen d'une simulation distribuée en réalité virtuelle. Ces moyens techniques permettent tout à la fois de maîtriser les facteurs tout en gagnant en proximité de la situation écologique.

## **L'acquisition d'une dimension temporelle au sein de la structure schématique de réalisation d'une tâche aéronautique**

L'étude conduite dans le chapitre 3 a mis en évidence un effet significatif de la notification non permissive au cours d'un entraînement en situation double tâche simulant certains aspects de l'activité aéronautique. Cet effet s'est manifesté par l'acquisition du respect d'un intervalle de temps lors de la réalisation de ces tâches. Tout se passerait donc comme si la structure schématique de réalisation de la tâche (*task-set schemata*) intégrait une dimension temporelle suite à l'exposition répétée à cette dimension. Dans le cadre particulier de cette expérience, c'est la contrainte qui favorise l'exposition répétée et donc l'intégration dans le schéma. Ainsi, dans le respect de la théorie de l'automatisation de Logan (1988), une règle temporelle serait une connaissance. Toutefois les notifications permissives, c'est-à-dire celles qui informent le participant du non-respect d'un intervalle de temps tout en lui permettant de poursuivre la réalisation de la tâche en cours, n'ont pas permis de montrer le même effet. Cette absence d'effet de la condition permissive pourrait être due à une répétition moindre du respect d'un intervalle de temps. Toutefois, l'étude présentée dans le chapitre 4 portant sur les dispositifs d'affichage (ou de notification pour faire l'analogie) à la demande permet de proposer une explication de nature différente. En effet, l'absence de résultat significatif dans la condition permissive pourrait être due au manque d'implication du participant.

La compréhension de ces mécanismes doit se poursuivre afin de pouvoir proposer à bord des avions un système de formation et d'information respectant la sécurité des vols. En effet, il n'est évidemment pas envisageable d'éteindre les instruments au cours des vols réels, sachant que ces derniers restent pourtant le principal lieu de formation des élèves. Il reste donc à relever le défi de développer une méthode suffisamment permissive pour être en accord avec la sécurité des vols et suffisamment contraignante ou impliquante pour permettre des répétitions suffisantes afin d'adjoindre une dimension temporelle aux structures schématiques des tâches à réaliser.

## **L'évaluation de la charge cognitive**

L'étude de terrain réalisée auprès des navigants de l'aviation de chasse a permis une cartographie des tâches les plus exigeantes. Toutefois, cette cartographie est soumise à la subjectivité des participants et ne permet pas une évaluation fine du coût de chacune des

tâches. C'est pourquoi la dernière étude s'est attachée à développer une méthode d'évaluation objective de la charge cognitive d'une tâche.

Au cours de cette dernière étude, la notion d'*empan opérationnel* a été développée pour l'évaluation de la charge cognitive. Cet empan a montré sa sensibilité mais doit maintenant être validé sur un panel de tâches à la fois plus diversifiées et plus écologiques.

Cette dernière étude a également permis d'obtenir un résultat totalement nouveau par rapport à ceux décrits dans la littérature : tout se passerait comme si une interruption de deux secondes au cours de la réalisation d'une tâche permettait de décharger les règles de résolution de cette même tâche en situation de répétition. Cela suggère que, chez le novice, interrompre une tâche pendant deux secondes agit comme une situation de permutation. En d'autres termes, chez le novice, interrompre une tâche, même de manière très courte, lui ferait perdre *le fil de sa pensée*. Cette hypothèse reste à objectiver par une étude permettant d'observer l'évolution de cet effet au cours de la familiarisation avec la tâche.

## **La nouveauté comme outil de renforcement cognitif**

Pris ensemble, les résultats des cinq chapitres permettent d'envisager le développement de nouveaux dispositifs de formation. En effet, selon nous, l'acquisition de l'expertise peut être favorisée en mobilisant principalement trois mécanismes dont les bénéfices sont cumulatifs : (1) l'automatisation par la répétition de la réalisation d'une tâche (Logan, 1988), (2) le *chunking* de plusieurs tâches en une supertâche par la répétition de l'exposition à ces tâches simultanément (Rogers & Monsell, 1995) et (3) le renforcement du mécanisme de permutation par l'exposition à des situations de tâches discrètes suffisamment nouvelles pour qu'elles n'aient pas *chunké* sous la forme d'une supertâche. Les mécanismes (1) et (2) ont bénéficié d'une force de la preuve expérimentale importante dans la littérature. Cependant, le troisième mécanisme (3) encore théorique mérite une démonstration expérimentale dédiée. Pour être plus précis, il s'agirait de tester l'idée selon laquelle s'entraîner pendant 10 heures en situation de double tâche (e.g. Liepelt et al., 2014) est plus efficace lorsque les tâches sont renouvelées par rapport à une condition où les tâches seraient identiques. Cette idée, jusqu'alors inédite (Strobach & Karbach, 2021), constitue un apport théorique fort pour la littérature scientifique sur le renforcement cognitif. Ce type de méthode

permet en effet de poser une nouvelle question théorique sur le renforcement d'habileté domaine général : y-a-t-il une limite au renforcement de la permutation ?

### **Renforcement cognitif : "domaine spécifique" et "domaine général"**

Si la communauté scientifique accepte très largement l'idée de transfert suite à un renforcement d'habileté de type domaine-général, dont la permutation (Strobach & Karbach, 2021), certains auteurs contestent l'idée de transfert à tel point qu'ils recommandent dans le cadre d'une formation pratique de s'occuper exclusivement du renforcement de ce qui est "domaine-spécifique" de l'activité et d'abandonner tout renforcement de ce qui serait "domaine-général" (Sala & Gobet, 2018).

Il n'est pas question ici de revenir sur l'importance du domaine-spécifique dans l'acquisition d'expertise, ce travail s'inscrit pleinement dans les conclusions des auteurs à ce sujet. Toutefois, la recommandation d'abandonner le renforcement qui est "domaine-général", dans le cadre de formations pratiques, formulée par Sala et Gobet (2018) mérite d'être discutée. Ces auteurs considèrent l'existence du transfert, si et seulement si un entraînement produit une augmentation persistante de l'habileté cognitive générale (ou plus prosaïquement l'intelligence). Il est cependant envisageable de renforcer une habileté qui serait "domaine général" et d'en observer un transfert positif en milieu professionnel, sans pour autant en observer un impact sur l'habileté cognitive générale. Il est tout autant envisageable que les entraînements réalisés expérimentalement et discutés par Sala et Gobet (ibid.) soient insuffisants pour renforcer les habiletés domaine-général au point d'agir sur l'habileté cognitive générale. Enfin, il est également envisageable que le renforcement "domaine-général" des études considérées dans leur méta-analyse soit suffisamment fugace pour ne plus être observable.

C'est pourquoi, tant que ces impédiments ne sont pas levés, l'étude du renforcement d'habiletés "domaine-général" reste pertinente. Elle doit désormais répondre aux questions suivantes, notamment pour l'habileté de permutation analysée dans ce travail de thèse : *avec quelle intensité et quelle fréquence un navigant doit-il s'entraîner afin d'obtenir un transfert efficace en situation professionnelle ?*

### 3. Conclusion

L'objectif initial de ce travail était de contribuer à déterminer quels moyens l'Armée de l'air et de l'espace pouvait mettre en œuvre pour réduire l'impact de la surcharge cognitive chez les membres d'équipage de l'aviation de chasse ? Des dispositifs d'évaluation de la charge cognitive ont été proposés ainsi que des dispositifs de formation prometteurs dans le développement de compétences appliquées à l'aéronautique.

Les travaux présentés ici ont donné lieu à de nouvelles études qui suggèrent que, dès le début de la formation, un entraînement réalisé sur la base de tâches de laboratoire telles que celles présentées dans le chapitre 5 suffirait à renforcer les mécanismes "domaine-général" de permutation et "domaine-spécifique" de l'automatisation. Par ailleurs, une étude actuellement en cours (dont les résultats n'ont pas encore été publiés) suggère, quant à elle, que plus un individu a une capacité de permutation élevée préalablement à l'expérience, plus sa performance est élevée au cours d'une simulation de mission opérationnelle (en réalité virtuelle).

Pris ensemble, ces résultats sont encourageants pour envisager une adaptation de la formation à l'activité aéronautique de combat où l'expertise est difficilement atteignable (les navigants de l'aviation de chasse ne volent qu'environ 200 heures par an), au moyen des dispositifs présentés. De plus, les dispositifs proposés sont parfaitement adaptables à tout type d'activité composée de situations multitâches pour favoriser l'acquisition de l'expertise. D'une manière prospective, le système de combat aérien du futur (SCAF) fera évoluer le métier de navigant avec l'implémentation de la collaboration humain-IA, qui prendra une place de plus en plus importante. Les dispositifs proposés au cours de ces travaux sont de nature à permettre une évaluation de la charge cognitive des nouvelles situations d'interaction homme-système ou homme-IA en cours de développement. De ce fait ces dispositifs ont leur place dans le processus de développement des nouvelles technologies en permettant la plus juste adéquation humain-système.

Ce travail propose enfin une contribution théorique sous la forme d'un modèle articulant l'évolution d'une habileté "domaine-général", la permutation, avec un processus "domaine spécifique" de *chunking*. Ce modèle a pour vocation à combler les lacunes d'observation de l'évolution du mécanisme de permutation, notamment après l'acquisition de l'expertise. Il est en effet théorisé que le mécanisme de permutation peut se renforcer, ce

qui est observé (Strobach & Karbach, 2021), puis qu'il peut décroître, ce qui n'est pas observé. Pour l'observer il suffirait par exemple d'évaluer la capacité de permutation tout au long du parcours professionnel des navigants en escadron de chasse. En effet, l'hypothèse est que les navigants les plus anciens (i.e. les plus experts) ont produit plus de *chunks* liés à leur activité et ont donc moins besoin de permuer au cours de leur activité. En d'autres termes, la capacité de permutation devrait décroître, lorsqu'elle est moins sollicitée, après le stade expert et cela pourrait être observable si les navigants les plus anciens (i.e. 20 ans d'escadron de chasse) ont dépassé ce stade. L'habileté de permutation permettrait l'activation des schémas de tâches discrètes codés ensemble transitoirement au sein de la mémoire de travail. La répétition suffisante de cette co-activation transitoire des schémas des tâches en mémoire de travail est de nature à produire une association entre ces schémas tâches autrement appelée *chunking*. Développer l'habileté de permutation reviendrait ainsi à favoriser le mécanisme de *chunking*. Favoriser ce mécanisme revient à favoriser la connaissance, seule limite des individus selon Logan.

# Bibliographie

- Allport, D. A., Styles, E. A., & Hsieh, S. (1994). Attention and performance XV.
- Allport, A. (1989). Visual attention.
- Anguera, J. A., Boccanfuso, J., Rintoul, J. L., Al-Hashimi, O., Faraji, F., Janowich, J., & Gazzaley, A. (2013). Video game training enhances cognitive control in older adults. *Nature*, *501*(7465), 97-101.
- Baddeley, A. (1996). Exploring the central executive. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *49*(1), 528.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(11), 417-423.
- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, *133*(1), 83.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2007). The time-based resource-sharing model of working memory. *The cognitive neuroscience of working memory*, *455*, 59-80.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2009). Interference: unique source of forgetting in working memory?. *Trends in Cognitive Sciences*, *13*(4), 145-146.
- Bender, A. D., Filmer, H. L., Naughtin, C. K., & Dux, P. E. (2017). Dynamic, continuous multitasking training leads to task-specific improvements but does not transfer across action selection tasks. *npj Science of Learning*, *2*(1), 1-10.
- Bertin, J. (1973). *Sémiologie graphique : Les diagrammes-Les réseaux-Les cartes*. Paris, France: EHESS.
- Bisseret, A., Sebillote, S., Falzon, P. (1999). *Techniques pratiques pour l'étude des activités expertes*. Octarès.
- Bouquet, C. A., Bonnin, C., & Gaonac'h, D. (2013). Approche intégrative du contrôle exécutif dans le paradigme de permutation de tâche. *L'Année psychologique*, *113*(1), 123-155.
- Bourgeois-Bougrine, S., Carbon, P., Gounelle, C., Mollard, R., & Coblentz, A. (2003). Perceived fatigue for short-and long-haul flights: a survey of 739 airline pilots. *Aviation, space, and environmental medicine*, *74*(10), 1072-1077.
- Boy, G. A. (2005). Decision Making: A Cognitive Function Approach. Seventh International NDM Conference. Amsterdam, The Netherlands: J.M.C Schraagen.
- Bredemeier, K., & Simons, D. J. (2012). Working memory and inattention blindness. *Psychonomic Bulletin & Review*, *19*(2), 239-244. doi:10.3758/s13423-011-0204-8. PMID: 22222359.

- Brooks, L. R. (1968). Spatial and verbal components of the act of recall. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, 22(5), 349.
- Camos, V. (2017). Domain-specific versus domain-general maintenance in working memory: Reconciliation within the time-based resource sharing model. In *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 67, pp. 135-171). Academic Press.
- Campitelli, G., & Gobet, F. (2004). Adaptive expert decision making: Skilled chess players search more and deeper. *ICGA Journal*, 27(4), 209-216.
- Casner, S. M. (2005). The effect of GPS and moving maps displays on navigational awareness while flying under VFR. *International Journal of Applied Aviation Studies* 5 (1), 153-165.
- Casner, S. (2006). Mitigating the loss of navigational awareness while flying with GPS and moving map displays under VFR. *International Journal of Applied Aviation Studies*, 6(1), 121.
- Cegarra, J., & Chevallier, A. (2008). The use of Tholos software for combining measures of mental workload: toward theoretical and methodological improvements. *behaviour research methods*, pp. 988-1000.
- Chen, D., & Singer, R. N. (1992). Self-regulation and cognitive strategies in sport participation. *International Journal of Sport Psychology*.
- Conversy, S. (2015). De la pré-attention des conjonctions visuelles. *27ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*. Toulouse, France.: IHM-2015.
- Cowan, N. (1992). Verbal memory span and the timing of spoken recall. *Journal of Memory and Language*, 31(5), 668-684.
- Cowan, N. (1999). An embedded-processes model of working memory. *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*, 20, 506.
- Craik, F. I., & Tulving, E. (1975). Depth of processing and the retention of words in episodic memory. *Journal of experimental Psychology: general*, 104(3), 268.
- Dubois, E., Blättler, C., Camachon, C., & Hurter, C. (2015). Eye Movements Data Processing for Ab Initio Military Pilot Training. In R. Neves-Silva, L. C. Jain, & R. J. Howlett (Eds.), *Smart Innovation, Systems and Technologies: Vol. 39. Intelligent Decision Technologies*, (pp. 125-135). Napoli, Italia: Springer. doi : 10.1007/978-3-319-19857-6\_12
- Duchowski, A. T. (2007). *Eye tracking methodology: Theory and Practice*. London, UK.: Springer International Publishing.

- Duncan, J. (1977). Response selection rules in spatial choice reaction tasks. *Attention and performance VI*, 49-61.
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological review*, 100(3), 363.
- Federal Aviation Administration, "FAA" (2013). Industry Training Standards (FITS) more. Retrieved from [http://www.faa.gov/training\\_testing/training/fits/](http://www.faa.gov/training_testing/training/fits/)
- Federal Aviation Administration (2017). *Aeronautical Information Manual : Official Guide to Basic Flight Information and ATC Procedures*. Washington D.C.: U.S. Department Of Transportation.
- Federal Aviation Administration. (2020). Aeronautical Information Manual. Retrieved from [https://www.faa.gov/air\\_traffic/publications/atpubs/aim\\_html/index.html](https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/index.html)
- Ferrari, M., Pinard, A., Reid, L., & Bouffard-Bouchard, T. (1991). The relationship between expertise and self-regulation in movement performance: Some theoretical issues. *Perceptual and Motor Skills*, 72(1), 139-150.
- Franck, A., & D'Hondt, W. (1979). Aptitudes et apprentissage du jeu d'échecs au Zaïre. *Psychopathologie Africaine*, XV, 81-89.
- Friedman, N. P., Miyake, A., Altamirano, L. J., Corley, R. P., Young, S. E., Rhea, S. A., & Hewitt, J. K. (2016). Stability and change in executive function abilities from late adolescence to early adulthood: A longitudinal twin study. *Developmental psychology*, 52(2), 326.
- Froger, G., Blättler, C., Dubois, E., Camachon, C., & Bonnardel, N. (2018). Time-Interval Emphasis in an Aeronautical Dual-Task Context: A Countermeasure to Task Absorption. *Human factors*, 60(7), 936-946.
- Funk, K., Lyall, B., Wilson, J., Vint, R., Niemczyk, M., Suretoguh, C., & Owen, G. (1999). Flight Deck Automation Issues. *The International Journal of Aviation Psychology*, 9(2), 109-123.
- Gobet, F., & Simon, H. A. (1996). Templates in chess memory: A mechanism for recalling several boards. *Cognitive psychology*, 31(1), 1-40.
- Gopher, D., Weil, M., & Siegel, D. (1989). Practice under changing priorities: an approach to the training of complex skills. *Acta Psychologica*, 71, pp. 147-177.
- Green, C.S. and Bavelier, D. (2003) Action video game modifies visual selective attention. *Nature* 423, 534
- Green, C. S., Strobach, T., & Schubert, T. (2014). On methodological standards in training and transfer experiments. *Psychological Research*, 78(6), 756-772.

- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988) Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock and N. Meshkati (Eds.), *Human mental workload*. Amsterdam: North Holland Press.
- Hazeltine, E., Aparicio, P., Weinstein, A., & Ivry, R. B. (2007). Configural response learning: The acquisition of a nonpredictive motor skill. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(6), 1451.
- Hazeltine, E., Ruthruff, E., & Remington, R. W. (2006). The role of input and output modality pairings in dual-task performance: Evidence for content-dependent central interference. *Cognitive Psychology*, 52(4), 291-345.
- Hoc, J.-M., Amalberti, R., Cellier, J.-M., & Grosjean, V. (2004). *Psychologie ergonomique : tendances actuelles*. (J. H. Darses, Éd.) Paris: PUF
- Hughes AM, Hancock GM, Marlow SL, Stowers K, Salas E. Cardiac Measures of Cognitive Workload: A Meta-Analysis. *Human Factors*, 61(3), 393-414.  
doi:10.1177/0018720819830553
- Jacobs, J. W., Prince, C., Hays, R. T., & Salas, E. (1990). A meta-analysis of the flight simulator training research. Technical Report, Naval Training Systems Center Human Factors Division, Orlando, FL.
- Jersild, A. T. (1927). Mental set and shift. *Archives of psychology*.
- Johnson, N., Wiegmann, D., & Wickens, C. (2006). Effects of Advanced Cockpit Displays on General Aviation Pilots' Decisions to Continue Visual Flight Rules Flight into Instrument Meteorological Conditions. Human Factors and Ergonomics Society 50th Annual Meeting (pp. 30-34). San Francisco: Human Factors & Ergonomics Society.
- Karbach, J., & Kray, J. (2009). How useful is executive control training? Age differences in near and far transfer of task-switching training. *Developmental science*, 12(6), 978-990.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort* (Vol. 1063, pp. 218-226). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kelly, D., & Efthymiou, M. (2019). An analysis of human factors in fifty controlled flight into terrain aviation accidents from 2007 to 2017. *Journal of Safety Research*, 69, 155-165.
- Kreitz, C., Furley, P., Memmert, D., & Simons, D. J. (2016). The influence of attention set, working memory capacity, and expectations on inattention blindness. *Perception*, 45(4), 386399. doi:10.1177/0301006615614465. Epub 2015 Nov 3. PMID: 26562879.

- Liepelt, R., Strobach, T., Frensch, P., & Schubert, T. (2011). Improved intertask coordination after extensive dual-task practice. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *64*(7), 1251-1272.
- Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological review*, *95*(4), 492.
- Longman, C. S., Lavric, A., & Monsell, S. (2013). More attention to attention? An eye-tracking investigation of selection of perceptual attributes during a task switch. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *39*(4), 1142.
- Longman, C. S., Lavric, A., & Monsell, S. (2016). The coupling between spatial attention and other components of task-set: A task-switching investigation. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *69*(11), 2248-2275.
- Maquestiaux, F. (2012). La simultanéité des actes psychiques : apports du protocole PRP. *L'Annee psychologique*, *112*(4), 631-662.
- Maquestiaux, F., Hartley, A. A., & Bertsch, J. (2004). Can practice overcome age-related differences in the psychological refractory period effect?. *Psychology and aging*, *19*(4), 649.
- Maquestiaux, F., Laguë-Beauvais, M., Bherer, L., & Ruthruff, E. (2008). Bypassing the central bottleneck after single-task practice in the psychological refractory period paradigm: Evidence for task automatization and greedy resource recruitment. *Memory & Cognition*, *36*(7), 1262-1282.
- Maquestiaux, F., Laguë-Beauvais, M., Ruthruff, E., Hartley, A., & Bherer, L. (2010). Learning to bypass the central bottleneck: Declining automaticity with advancing age. *Psychology and Aging*, *25*(1), 177.
- Maquestiaux, F., Ruthruff, E., Defer, A., & Ibrahime, S. (2018). Dual-task automatization: The key role of sensory-motor modality compatibility. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *80*(3), 752-772.
- Marey, E. J. (1876). *Physiologie expérimentale* (Vol. 1). G. Masson.
- Martin, C., Hourlier, S., & Cegarra, J. (2013, mai). La charge de travail : un concept qui reste indispensable, l'exemple de l'aéronautique. *Le travail humain*, pp. 285-308
- Mattes, S., & Hallen, A. (2009). *Surrogate Distraction Measurement Techniques: The Lane Change Test*. (M. A. Regan, J. D. Lee, & K. L. Young, Eds.) Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Matthews, W. J., & Meck, W. H. (2014). Time perception: the bad news and the good. (I. John Wiley & Sons, Éd.) *Wiley Interdisciplinary Reviews. Cognitive Science*, *5*(4), 429-446.

- Matton, N., Paubel, P., Cegarra, J., & Raufaste, E. (2016). Differences in Multitask Resource Reallocation After Change in Task Values. *Human Factors*, 58(8), 1128-1142.
- McCombs, B. L. (1989). Self-regulated learning and academic achievement: A phenomenological view. In *Self-regulated learning and academic achievement* (pp. 51-82). Springer, New York, NY.
- Meiran, N. (2010). Task switching: Mechanisms underlying rigid vs. flexible self-control.
- Meyer, D. E., & Kieras, D. E. (1997). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part I. Basic mechanisms. *Psychological review*, 104(1), 3.
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current directions in psychological science*, 21(1), 8-14.
- 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.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in cognitive sciences*, 7(3), 134-140.
- Monsell, S. (2015). Task-set control and task switching. *The handbook of attention*, 139-172.
- Moray, N. (1967). Where is capacity limited? A survey and a model. *Acta psychologica*, 27, 84-92.
- Nino, R. S., & Rickard, T. C. (2003). Practice effects on two memory retrievals from a single cue. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 29(3), 373.
- National Transportation Safety Board (2010). Safety study: Introduction of glass cockpit avionics into light aircraft. NTSB. Report: NTSB Publication No. SS-10/01. Retrieved from: <http://www.nts.gov/doclib/safetystudies/SS1001.pdf>
- National Transportation Safety Board (2020) Most Wanted List of Transportation Safety Improvements. Retrieved from <https://www.nts.gov/safety/mwl/Documents/2019-20/2019-20-MWL-SafetyRecs.pdf>
- Oberauer, K., & Kliegl, R. (2004). Simultaneous cognitive operations in working memory after dual-task practice. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30(4), 689.

- Ochanine, D. (1978). Le rôle des images opératives dans la régulation des activités de travail. *Psychologie et Éducation*, 2, pp. 63-72.
- Orlansky, J., & String, J. (1977). Cost-effectiveness of flight simulators for military training: Vol. I. Use and effectiveness of flight simulators. Paper, Institute for Defense Analyses, Arlington.
- Orscheschek, F., Strobach, T., Schubert, T., & Rickard, T. (2019). Two retrievals from a single cue: A bottleneck persists across episodic and semantic memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 72(5), 1005-1028.
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors*, 39(2), 230-253.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: data and theory. *Psychological bulletin*, 116(2), 220.
- Pastré, P. (2006). Apprendre à faire. (E. Bourgeois, & G. Chapelle, Édés.) Paris: Puf.
- Paulhan, F. (1887). La simultanéité des actes psychiques. *Revue Scientifique*, 39, 684-689.
- Penney, T. B., Lorraine, A. G., Meck, W. H., & Gibbon, J. (1998). Memory Mixing in Duration Bisection. In D. A. Rosenbaum, & C. E. Collyer, *Timing of behavior: Neural, psychological, and computational perspectives*. (pp. 165-193). Cambridge, MA, USA: The MIT Press.
- Pfeiffer, M. G., & Horey, J. D. (1987). Training effectiveness of aviation motion simulation: A review and analysis of the literature. Special Report 87-007, Naval Training Systems Center, Orlando, FL.
- Posner, M. (2007). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3-25.
- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European journal of cognitive psychology*, 9(2), 129-154.
- Rantanen, E. M., & Talleur, D. A. (2005). Incremental Transfer and Cost Effectiveness of Groundbased Flight Trainers in University Aviation Programs. *Human Factors and Ergonomics Society 49th Annual Meeting*. 49, pp. 764-768. Orlando: Human Factors & Ergonomics Society.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, Knowledge, signs and symbols, and other distinction in human performance models. *IEEE transactions on systems, man and cybernetics*, 13(3), pp. 257-266.

- Raye, C. L., Mitchell, K. J., Reeder, J. A., Greene, E. J., & Johnson, M. K. (2008). Refreshing one of several active representations: Behavioral and functional magnetic resonance imaging differences between young and older adults. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(5), 852-862.
- Rijn, H. (2016). Accounting for memory mechanisms in interval timing: A review. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 245-249.
- Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of experimental psychology: General*, 124(2), 207.
- Rubio, S., Diaz, E., Martin, J., & Puente, J. M. (2004). Evaluation of subjective mental workload : a comparison of SWAT, NASA TLX, and workload profile methods. *Applied psychology : an international review*, 49(1), pp. 219-222.
- Rudisill, M. (1994). Flight crew experience with automation technologies on commercial transport flight decks. Dans M. Mouloua, & R. Parasuraman (Éd.), *Human performance in automated systems: Current research and trends*. (pp. 203-211). Hillsdale, NJ: Lawrence-Erlbaum Associates, Inc.
- Ruge, H., Jamadar, S., Zimmermann, U., & Karayanidis, F. (2013). The many faces of preparatory control in task switching: reviewing a decade of fMRI research. *Human brain mapping*, 34(1), 12-35.
- Ruthruff, E., Hazeltine, E., & Remington, R. W. (2006). What causes residual dual-task interference after practice?. *Psychological Research*, 70(6), 494-503.
- Ruthruff, E., Johnston, J. C., & Van Selst, M. (2001). Why practice reduces dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(1), 3.
- Ruthruff, E., Van Selst, M., Johnston, J. C., & Remington, R. (2006). How does practice reduce dual-task interference: Integration, automatization, or just stage-shortening?. *Psychological research*, 70(2), 125-142.
- Sala, G., & Gobet, F. (2017). Does far transfer exist? Negative evidence from chess, music, and working memory training. *Current directions in psychological science*, 26(6), 515-520.
- Sala, G., & Gobet, F. (2019). Cognitive training does not enhance general cognition. *Trends in cognitive sciences*, 23(1), 9-20.
- Salas, E., Bowers, C.A., Rhodenizer, L., (1998). It Is Not How Much You Have but How You Use It: Toward, a Rational Use of Simulation to Support Aviation Training. *The International Journal of Aviation Psychology*, 8(3), 97-208
- Schumacher, P. M., Blickensderfer, B., & Summers, M. (2005). Summary of Findings and Recommendations to the FAA. Final Report: FY2004 Task 5.

- Shiffrin, R. M., & Dumais, S. T. (1981). The Development of Automatism. *Cognitive skills and their acquisition*, 111.
- Silsupadol, P., Siu, K. C., Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (2006). Training of balance under single-and dual-task conditions in older adults with balance impairment. *Physical therapy*, 86(2), 269-281.
- Spector, A., & Biederman, I. (1976). Mental set and mental shift revisited. *The American Journal of Psychology*, 669-679.
- Stelzel, C., Schumacher, E. H., Schubert, T., & Mark, D. E. (2006). The neural effect of stimulus-response modality compatibility on dual-task performance: an fMRI study. *Psychological Research*, 70(6), 514-525.
- Strobach, T. (2020). The dual-task practice advantage: Empirical evidence and cognitive mechanisms. *Psychonomic Bulletin & Review*, 27(1), 3-14.
- Strobach, T., Becker, M., Schubert, T., & Kühn, S. (2015). Better dual-task processing in simultaneous interpreters. *Frontiers in psychology*, 6, 1590.
- Strobach, T., Frensch, P. A., Soutschek, A., & Schubert, T. (2012). Investigation on the improvement and transfer of dual-task coordination skills. *Psychological research*, 76(6), 794-811.
- Strobach, T., Frensch, P. A., & Schubert, T. (2012). Video game practice optimizes executive control skills in dual-task and task switching situations. *Acta psychologica*, 140(1), 13-24.
- Strobach, T., Karbach, J., & Strobach. (2016). *Cognitive training*. New York, NY: Springer.
- Strobach, T., Salminen, T., Karbach, J., & Schubert, T. (2014). Practice-related optimization and transfer of executive functions: a general review and a specific realization of their mechanisms in dual tasks. *Psychological Research*, 78(6), 836-851.
- Schubert, T., & Strobach, T. (2018). Practice-related optimization of dual-task performance: Efficient task instantiation during overlapping task processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44(12), 1884.
- Strobach, T., Schubert, T., Pashler, H., & Rickard, T. (2014). The specificity of learned parallelism in dual-memory retrieval. *Memory & cognition*, 42(4), 552-569.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and instruction*, 4(4), 295-312.

- Szameitat, A. J., Lepsien, J., Von Cramon, D. Y., Sterr, A., & Schubert, T. (2006). Task-order coordination in dual-task performance and the lateral prefrontal cortex: an event-related fMRI study. *Psychological research*, 70(6), 541-552.
- Taatgen, N. A. (2013). The nature and transfer of cognitive skills. *Psychological review*, 120(3), 439.
- Taatgen, N. A., van Rijn, H., & Anderson, J. (2007). An Integrated Theory of Prospective Time Interval Estimation: The Role of Cognition, Attention and Learning. *Psychological Review*, 114(3), 577-598.
- Telford, C. W. (1931). The refractory phase of voluntary and associative responses. *Journal of Experimental Psychology*, 14(1), 1.
- Van Selst, M., Ruthruff, E., & Johnston, J. C. (1999). Can practice eliminate the psychological refractory period effect?. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(5), 1268.
- Vergauwe, E., Barrouillet, P., & Camos, V. (2009). Visual and spatial working memory are not that dissociated after all: A time-based resource-sharing account. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(4), 1012.
- Vergauwe, E., Barrouillet, P., & Camos, V. (2010). Do mental processes share a domain-general resource?. *Psychological science*, 21(3), 384-390.
- Vierordt, K. (1868). *Der Zeitsinn nach Versuchen*. Tübingen, Germany: Verlag der H. Laupp'schen Buchhandlung.
- Vince, M. A. (1948). The intermittency of control movements and the psychological refractory period. *British Journal of Psychology*, 38(3), 149.
- Von Kries, J. (1895). *Über die Natur gewisser mit den psychischen Vorgängen verknüpfter Gehirnzustände*. Leopold.
- Welford, A. T. (1952). The psychological refractory period and the timing of high-speed performance—a review and a theory. *British Journal of Psychology*, 43(1), 2.
- Wickens, C. D. (1984). *Engineering psychology and human performance*. Charles E. Merrill, Columbus, OH.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Ergonomics Science*, 3(2), pp. 159-177.
- Wickens, C. D. (2004). Multiple resource time sharing models. In *Handbook of human factors and ergonomics methods* (pp. 427-434). CRC Press.

Wickens CD. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors*, 50(3), 449-455. doi:[10.1518/001872008X288394](https://doi.org/10.1518/001872008X288394)

Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). *Engineering psychology and human performances* (éd. 2). New Jersey: Prentice hall.

Yeung, N., & Monsell, S. (2003). Switching between tasks of unequal familiarity: The role of stimulus-attribute and response-set selection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(2), 455.

# Table des figures

Figure 1. Capture d'écran du dispositif d'affichage de la situation double tâche à réaliser. (a) Le participant doit trouver où est la cible (rond le plus gros). La cible de la tâche tête haute est indiquée ici par une flèche noire. (b) La tâche tête en bas demande de contrôler le mouvement de quatre flèches qui évoluent aléatoirement. ....	14
Figure 2. Nombre moyen de violations de la règle "2 secondes maximum à regarder la tâche du bas" pour chaque groupe en fonction des phases. Les barres d'erreur représentent les erreurs standards. CG = groupe contrôle ; NPG = groupe non permissif ; PG = groupe permissif. ....	15
Figure 3. Pourcentage du temps passé à regarder la tâche du haut. Le groupe opaque est le groupe NPG .....	16
Figure 4. Performance à la réalisation de la tâche du bas. Il n'existe pas de différence significative de performances entre les groupes ni en pré-test, ni en post-test, ni en rétention .....	16
Figure 5. Exemple de cockpit, avec informations (à gauche) et sans informations (à droite) .....	18
Figure 6. Temps passé à regarder à l'intérieur du poste de pilotage (%) par groupe (contrôle et expérimental) au cours du pré-test et du post-test.....	18
Figure 7. Procédure d'évaluation d'empan complexe. On demande à la personne de mémoriser une liste d'éléments qui sont présentés séquentiellement. Une tâche de traitement est insérée entre les éléments. Après le dernier item, on demande à la personne de rappeler la liste des éléments dans l'ordre de présentation. ....	19
Figure 8. Présentation d'une tâche d'empan complexe réalisée au cours de l'étude. La tâche de mémorisation concerne des éléments de navigations. La tâche de traitement pouvait être soit "regarder dehors", soit "recherche de trajectoire conflictuelle sur écran radar". ....	19
Figure 9. Temps de réponse moyen en situation de permutation (trial 1) et en situation de répétition (trial 2). En situation multitâche, l'individu permute (ce qui implique une reconfiguration du <i>task-set</i> ) depuis une tâche de navigation de 2 secondes vers la tâche de traitement. En situation simple tâche, l'individu ne permute pas puisqu'il répète les mêmes tâches de traitement avec une absence de stimulus de 2 secondes toutes les 6 secondes. ....	21
Figure 10. Exemple de stimulus présenté au cours d'un essai de l'expérience 1. Dans cet exemple $V = 3$ donc impair et inférieur à 5 ; $G = 4$ donc pair et inférieur à 5. La condition à laquelle doit répondre le participant est présentée avant l'essai. Par exemple "G inférieur/supérieur" auquel il faut répondre dans ce cas inférieur puisque le nombre de caractères (4) est inférieur à 5.....	34
Figure 11. Présentation des conditions en fonction du type d'essai de l'expérience de Rogers & Monsell (1995). Soit l'essai est interférent lorsqu'il est constitué d'une lettre et d'un chiffre, soit il est non interférent lorsqu'un caractère neutre (i.e. non lettre et non chiffre) est présent. Le passage d'un essai à l'autre constitue une répétition lorsqu'il est réalisé horizontalement et un switching lorsqu'il est réalisé verticalement. ....	36

Figure 12. Schéma du protocole PRP consistant en la réalisation de deux tâches discrètes au cours d'un même essai. Pour chaque tâche est présenté un stimulus S appelant une réponse R. La durée séparant la présentation de deux stimuli, appelée SOA (*Stimulus Onset Asynchrony*), est manipulée par l'expérimentateur. Les variables dépendantes de ce protocole sont le temps de réaction TR et le taux d'erreur TE. .... 40

Figure 13. Exemple d'effet PRP, adapté de Strobach et al. (2015). Le temps mis pour répondre à la tâche 2 (T2) est plus long si le temps qui sépare la présentation de la tâches 1 et de la tâche 2 (SOA) est plus court. .... 42

Figure 14. Modèle du goulet d'étranglement central. La réalisation de chaque tâche est décomposée en trois étapes successives depuis le stimulus jusqu'à la réponse. Un stade précentral, un stade de traitement et un stade post central. Le modèle propose que deux stades de traitements de deux tâches discrètes soient impossibles à réaliser simultanément, alors que toute autre combinaison de stades le soit. Dans la condition SOA long le stimulus de tâche 2 arrive après le stade de traitement de la tâche 1 ce qui permet aux trois stades de la tâche 2 de se dérouler sans interruption, contrairement au déroulement des stades de la tâche 2 dans la condition SOA court. Cette absence d'effet PRP en condition SOA long est aussi appelée goulet d'étranglement central latent. .... 43

Figure 15. Stimuli présentés pour chaque essai au cours de l'expérience. La tâche visuelle est en haut, la tâche auditive en bas. Les essais commencent par un écran préparatoire sur lequel sont présentés trois traits pendant 500 ms. Ensuite un cercle apparaît sur l'un des trois traits et reste visible jusqu'à ce que le participant appuie sur la touche correspondante ou, en cas d'absence de réponse, pendant 2000 ms. La tâche auditive lorsqu'elle est effectuée seule comporte le même écran préparatoire pendant 500 ms, suivi du son présenté pendant 40 ms. Les traits disparaissent lorsque la réponse est donnée ou après 2000 ms sans réponse. Les temps de réaction sont présentés pendant 1500 ms au cours de la séquence Feedback qui est suivie d'un écran vide pendant 700 ms avant que ne recommence un nouvel essai. .... 47

Figure 16. Modèle Cattell-Horn-Carroll (CHC) : l'habileté générale ou intelligence (stratum III) repose sur des habiletés intermédiaires telles que la fluidité ou Gf (Stratum II). Les habiletés intermédiaires se mesurent au moyen de plusieurs tests spécifiques (stratum I). Par exemple, la fluidité ou Gf serait calculé en fonction des résultats à l'ensemble des tests spécifiques de type f (f1, f2, etc.) .... 51

Figure 17. Modèle idéalisé d'évolution de l'habileté de permutation en fonction de l'exposition répétée à des épisodes simple tâche (bloc 1 et 2) et double tâche (bloc 3). Dans le bloc 1 est représenté un TR lors de double tâche A et B alors que seule la tâche A est entraînée. Dans le bloc 2 est représenté un TR lors de double tâche A et B alors que seule la tâche B est entraînée après automatisation de la tâche A. Dans le bloc 3 est représenté un TR lors de double tâche A et B. Après un nombre suffisant d'expositions aux situations double tâche, les tâches A et B deviennent une supertâche grâce au mécanisme de chunking. L'habileté de permutation nécessaire pour passer d'une tâche à l'autre n'est renforcée que lorsqu'elle est sollicitée, c'est-à-dire en entraînement double tâche. Une fois la supertâche créée, le mécanisme de permutation n'est plus sollicité et la performance en permutation reviendrait peu à peu à son niveau initial. .... 55

Figure 18. Modèle idéalisé d'évolution de l'habileté de permutation en fonction de l'exposition répétée à des épisodes double tâche. Chaque nouveau bloc comporte une tâche nouvelle, inconnue, obligeant le participant à solliciter l'habileté de permutation. ....	56
Figure 19. Procédure d'évaluation de l'empan complexe. On demande à l'individu de mémoriser une liste d'éléments qui sont présentés de manière séquentielle. Une tâche de traitement est insérée entre les éléments. Après le dernier élément, on demande à l'individu de rappeler la liste d'éléments dans l'ordre de présentation. ....	57
Figure 20 – d'après le modèle 4D de Wickens (1984). Plus les tâches partagent des proximités de classification, c'est-à-dire si elle se situent dans les mêmes subdivisions du cube, plus elles seront difficiles à exécuter ensemble. Par exemple, deux conversations à suivre en même temps se situent dans la même subdivision de perception, ce qui est matérialisé par les deux croix dans la figure. En d'autres termes, plus les tâches sont proches, plus elles sont concurrentielles. ....	69
Figure 21 - questionnaire d'identification des tâches exigeantes rempli dans l'heure suivant la fin de la mission. Le bandeau du questionnaire comprend les informations relatives au navigant. La question (1) permettait d'identifier les tâches exigeantes en elles-mêmes. La question (2) permettait d'identifier les difficultés ressenties par le participant lors de la réalisation de deux tâches. Le questionnaire était rempli par l'observateur, après reformulation, puis relu par le participant pour validation. ....	71
Figure 22. Capture d'écran du micromonde AFT. (a) La cible de la tâche HUT target est indiquée par une flèche noire. (b) La tâche HDT est dans une configuration au sein de laquelle les deux jauges de droite sont à zero et les deux jauges de gauche diminuent.....	89
Figure 23. Procédure et design de l'expérience en cinq phases. Il n'y avait pas de masque pour le groupe CG (a), un masque transparent pour le groupe PG (b) et un masque opaque pour le groupe NPG (c). ....	91
Figure 24. Nombre d'erreurs moyen de violations de la règle des deux secondes pour chaque groupe au cours des phases de test. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards..	92
Figure 25. Pourcentage moyen du temps passé à regarder sur la zone de la tâche HUT pour chaque groupe, au cours de chacune des phases de test. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.....	93
Figure 26. Moyenne de performance globale pour chaque groupe au cours de chaque test. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.....	94
Figure 27. Performance moyenne à la tâche HDT pour chaque groupe au cours de chaque test. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.....	95
Figure 28. Performance moyenne à la tâche HUT pour chaque groupe au cours de chaque test. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.....	96
Figure 29. Exemple de cockpit, avec information (gauche) et sans information (right)....	106
Figure 30. Temps passé à regarder à l'intérieur du cockpit (%) par groupes (Contrôle et Experimental) pour le test de base et le test final. ....	108
Figure 31. Représentation du goulot d'étranglement central. Lorsque l'asynchronie de l'apparition du stimulus (SOA), c'est-à-dire le temps entre la présentation de la tâche B et la présentation de la tâche A, est trop courte, le traitement central de la tâche B (c'est-à-dire les	

étapes 2 et 3) ne peut se produire qu'une fois que les étapes du traitement central de la tâche A sont terminées.....	115
Figure 32. Représentation des situations de répétition et de permutation. La répétition consiste en l'exécution consécutive et répétée d'une même tâche. La permutation consiste en l'exécution consécutive de deux tâches distinctes. ....	116
Figure 33. Procédure d'évaluation de l'empan complexe. Le participant doit mémoriser une liste d'items qui sont présentés de manière séquentielle. Une tâche de traitement est insérée entre les items à mémoriser. Après le dernier item et une dernière tâche de traitement, le participant est invité à rappeler la liste des items dans l'ordre de présentation.....	117
Figure 34. Présentation d'un test dans une situation multitâche ([navigation + voir-et-éviter] ou [navigation + détecter-et-éviter])......	118
Figure 35. Vue d'ensemble de tous les éléments que les participants devaient mémoriser pendant un essai de tâche de navigation. Les éléments apparaissaient un par un, dans l'ordre des numéros de la figure, et restaient à l'écran pendant 2 secondes. ....	121
Figure 36. Tâche "voir et éviter". Exemple d'un stimulus auquel un participant peut être exposé. Les distracteurs sont les petits cercles, et la cible (indiquée par la flèche) dans cet essai est sur le côté gauche de l'écran. ....	123
Figure 37. Tâche de détection et d'évitement. Exemple d'un essai. Les participants devaient décider laquelle des trois trajectoires était non-confluctuelle. Dans cet essai, la trajectoire non-confluctuelle est à droite. ....	123
Figure 38. Exemple d'un essai multitâche. Huit éléments de navigation alternent avec huit tâches de traitement (voir-et-éviter ou détecter-et-éviter). La dernière tâche de traitement est suivie de la phase de rappel, au cours de laquelle le participant rappelle verbalement autant d'éléments que possible. ....	125
Figure 39. Essais en tâche simple. 39A : huit éléments de navigation sont présentés. Après la dernière tâche de navigation suivie d'un écran noir présenté six secondes, le participant rappelle verbalement autant d'éléments que possible. 39B : huit tâches de traitement identiques sont présentées pendant un essai : soit voir-et-éviter, soit détecter-et-éviter.....	125
Figure 40. Nombre moyen de réponses correctes sur l'ensemble des 20 essais de navigation pour l'empan opérationnel. ....	127
Figure 41. Temps de réponse moyens en fonction de l'essai dans les situations multitâche et simple tâche. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. ....	128

# Table des tableaux

Tableau 1. Description des variables "tâches exigeantes" .....	72
Tableau 2. Organisation de la situation (multitâche ou simple tâche) pour chaque groupe.....	124
Tableau 3 – principaux résultats théoriques et appliqués du travail de thèse.....	134