



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

---

**Présentée et soutenue par :**

**Benoît VALÉRY**

le vendredi 1 décembre 2017

**Titre :**

La priorisation humaine. Étude des corrélats cognitifs de l'évaluation des priorités

---

**École doctorale et discipline ou spécialité :**

EDSYS : Informatique

**Unité de recherche :**

Équipe d'accueil ISAE-ONERA CSDV

**Directeur(s) de Thèse :**

M. Frédéric DEHAIS (directeur de thèse)  
Mme Nadine MATTON (co-directrice de thèse)

**Jury :**

M. Thierry BACCINO Professeur Université Paris 8 - Président  
M. Frédéric DEHAIS Professeur ISAE-SUPAERO - Directeur de thèse  
M. Emmanuel GARDINETTI Chargé de Recherche DGA/MRIS  
Mme Nadine MATTON Enseignant-chercheur ENAC - Co-directrice de thèse  
M. Jordan NAVARRO Maître de Conférences Université Lyon 2 - Rapporteur  
M. Sébastien TREMBLAY Professeur Université Laval



# Résumé

La viabilité des systèmes de travail complexes repose en partie sur la capacité des opérateurs à y gérer des tâches concurrentes en fonction de leurs priorités respectives. Il s'agit là d'un processus critique qui, lorsqu'il est défaillant, peut amener à des erreurs de négligence ou de persévération sur certaines opérations.

Les modèles actuels de la *priorisation* humaine présentent de nombreuses limites : ils sont souvent normatifs et ne rendent pas suffisamment compte de la façon dont les opérateurs utilisent *effectivement* l'information disponible dans l'environnement pour le calcul des priorités. Leur faible pouvoir descriptif ne permet pas réellement de comprendre les mécanismes cognitifs contributifs de l'erreur, spécialement dans des situations de surcharge mentale.

Cette thèse, en adoptant l'approche de l'ergonomie cognitive, se donne pour objectif de mieux comprendre et décrire ces processus. En particulier, nous souhaitons répondre aux questions suivantes : comment les opérateurs traitent-ils l'information relative à la priorité des tâches ? Comment résolvent-ils des conflits de polarités ? Lorsque par exemple, une tâche est à la fois très difficile (polarité  $-$ ) et très importante (polarité  $+$ ). Enfin, quels sont les rapports fonctionnels entre la priorisation et les processus de contrôle exécutif ?

Trois expérimentations fondamentales ont été menées, qui toutes mettaient les participants aux prises avec des situations de double-tâche, où divers attributs (difficulté, importance, marge d'erreur) des tâches étaient manipulés. Ces tâches reproduisaient des sollicitations des environnements complexes, comme la mémorisation, la surveillance, ou encore le diagnostic sous incertitude.

Les résultats ont montré que, dans des situations de double-tâche, *l'évaluation dynamique des priorités suivait une logique heuristique non-compensatoire*, selon laquelle les priorités cognitives des sous-tâches ne résultaient jamais d'un compromis linéaire entre l'ensemble de leurs attributs, mais plutôt de leur ordonnancement et utilisation sélective (expérimentations 1 et 2). De plus, *l'utilisation*

de ces priorités cognitives pour orienter l'allocation des ressources était *médiatisée par la détection d'un conflit pour les ressources* (expérimentations 1, 2 et 3). En outre, nous avons montré qu'une réorientation préférentielle des ressources vers une sous-tâche spécifique, n'avait pas d'influence sur la rationalité globale du comportement des participants, mais plutôt sur leur rationalité locale : les sous-tâches favorisées élicitant des niveaux de performance plus élevés et ceci, d'autant plus que leur demande excédait les capacités des participants (expérimentations 1, 2 et 3). Enfin, nous avons montré que la priorisation pouvait aussi influencer l'efficacité de processus *couverts*, comme l'encodage en mémoire à long-terme, sans pour autant se traduire par une réorientation des ressources attentionnelles ouvertes (expérimentation 3).

L'ensemble des résultats souligne l'importance de la priorisation dans la bonne tenue des systèmes complexes, et suggère une sensibilisation accrue des opérateurs à ces phénomènes lors de leur formation, ainsi qu'une réflexion à plus long terme sur la présentation de l'information dans le contexte des interfaces homme-machine.



# Remerciements

Frédéric je te dois la primeur de ces remerciements. Tu es la première personne que j'ai rencontrée il y a de ça presque cinq ans. Depuis, tu m'as toujours manifesté ton soutien et ta confiance. Je te dois une part de ce parcours et de la quiétude qui l'a caractérisé. Ton encadrement : avisé et amical, m'a réellement permis de développer ce travail à ma façon et je t'en remercie.

Nadine, tu as toi aussi fait confiance à un inconnu. Ton extrême disponibilité ; ta gentillesse ; ta patience à écouter mes logorrhées ; l'étendue en même temps que la précision de tes connaissances, ont constitué une ressource importante pour moi. Merci. Avec Frédéric, vous m'avez prouvé que l'activité du doctorant ne se confine pas à la reproduction estudiantine des idées de ses encadrants, mais admet en fait une grande liberté et un bel épanouissement intellectuel. Littéralement, vous ne m'avez pas *dirigé*, mais *encadré*.

Sébastien, encadrant hors-cadre et ami hors-pair, tu as, durant ces trois années, été mon interlocuteur privilégié. Je ne compte pas les nœuds théoriques et méthodologiques que nous avons triturés. Notre plaisir se résumait souvent à un problème et à un café. Pour des raisons administratives, ton nom n'apparaît pas où il devrait. Mais ton écoute, ta présence, ton humour, ton humanité, ton travail (aussi) t'honorent. Au même titre que Frédéric ou Nadine, tu es responsable du bon déroulement de cette thèse, et de sa qualité finale.

J'adresse aussi un salut amical à l'équipe Facteurs Humains de l'ISAE, à Kévin, Émilie, Raphaëlle, Vsevolod, Medhi, Eve, Mickaël, ainsi qu'à tous ceux qui ont tracé leur route : Gautier, Thibault, Nicolas, Louise, Kévin (Mandrill), Zarrin. Un merci particulier à Mickaël, qui a encadré mon stage long de recherche ; à Vsevolod qui a souvent été de bons conseils, à Gautier qui m'a épaulé durant mon premier stage court, à Thibault, mec gééééiiiiiaaall, qui m'a *pythonisé*. Je garderai un très bon souvenir de vous tous.

Merci encore, à Sébastien Tremblay, Jordan Navarro et Thierry Baccino,

pour avoir porté leur intérêt à ce travail et avoir généreusement accepté de l'évaluer. Je souhaite aussi adresser mes remerciements à la Direction Générale de l'Armement, à l'École Nationale de l'Aviation Civile et à l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, pour avoir soutenu ce projet et m'avoir permis de travailler dans des conditions matérielles exceptionnelles.

Un mot enfin pour toi, Vanessa, qui m'accompagne depuis ce temps. La vie que je mène, thèse ou pas thèse, n'est bonne que par toi. Ce que j'ai fait en trois ans, ne vaut rien à côté de ce que tu m'as fait en huit ans, et en neuf mois. Je souris à l'idée que certains passages de cette thèse, certaines idées théoriques, sont nés de nos discussions et de ton intelligence critique. Et malgré tout ce que tu as pu y apporter en secret, je ne te ferai pas l'affront de te dédier une thèse.

Je te dédie plutôt tout le reste.

# Table des matières

## REVUE DE LITTÉRATURE

<b>1</b>	<b><i>Les erreurs de priorisation en aéronautique</i></b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>L'erreur humaine en aéronautique</b> .....	<b>3</b>
1.1	Qu'est-ce qu'une erreur humaine?.....	5
1.2	L'émergence des erreurs de priorisation.....	6
<b>2</b>	<b>Les exigences cognitives des systèmes dynamiques</b> .....	<b>10</b>
2.1	Situation dynamique et dédoublement du contrôle cognitif.....	14
2.2	Le contrôle des ressources en situation multitâche.....	15
<b>3</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b><i>La performance humaine en situation multitâche</i></b>	<b>23</b>
<b>1</b>	<b>Les limites architecturales de l'opérateur humain</b> .....	<b>24</b>
1.1	L'hypothèse d'un canal unique.....	25
1.2	La théorie d'une ressource unitaire.....	27
1.3	La théorie des ressources multiples.....	31
1.4	Les modèles computationnels de la performance multitâche.....	34
<b>2</b>	<b>Le contrôle en situation multitâche</b> .....	<b>36</b>
2.1	Mises en évidence du contrôle.....	37
2.2	Unité et diversité du contrôle.....	39
<b>3</b>	<b>La priorisation comme dimension évaluative du contrôle</b> .....	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>46</b>

<b>3</b>	<b><i>Les fondements de la priorisation</i></b>	<b>53</b>
1	<b>Une réponse adaptative à la simultanéité</b>	53
2	<b>Les manifestations empiriques de la priorisation</b>	57
2.1	Sur la planification des tâches	58
2.2	Sur l'allocation des ressources	63
3	<b>Les modèles de la priorisation</b>	76
3.1	La priorité attentionnelle des stimuli	78
3.2	La priorité des stratégies computationnelles	79
3.3	Des attributs des tâches à leur priorité	81
3.4	Un mécanisme métacognitif?	89
4	<b>Conclusion</b>	91
<b>4</b>	<b><i>L'oculométrie pour l'étude de la priorisation</i></b>	<b>99</b>
1	<b>L'essor des mesures neurophysiologiques</b>	99
2	<b>Le regard et l'attention</b>	101
3	<b>Les mesures oculométriques</b>	103
3.1	Les quatre mouvements de l'œil	103
3.2	Les saccades et les fixations	103
3.3	Analyses sémantiques des mouvements oculaires	105
3.4	Analyses non-sémantiques des mouvements oculaires	106
4	<b>Des usages de l'oculométrie dans le cockpit</b>	106
4.1	Études du comportement oculaire nominal	107
4.2	L'allocation des ressources dans le cockpit automatisé	108
4.3	Étude des situations de pilotage dégradé	109
5	<b>Conclusion</b>	111
<b>5</b>	<b><i>Problématique</i></b>	<b>119</b>

## CONTRIBUTIONS

<b>6</b>	<b><i>Priorisation et charge de travail</i></b>	<b>127</b>
1	<b>Introduction</b>	127
2	<b>Méthode</b>	129
2.1	Participants	129
2.2	Matériel	129

2.3	Procédure . . . . .	131
2.4	Mesures et plan expérimental . . . . .	135
2.5	Commentaire préalable sur les analyses corrélationnelles . . . . .	136
<b>3</b>	<b>Résultats</b> . . . . .	138
3.1	Analyse de la performance . . . . .	138
3.2	Analyse de l'allocation des ressources visuelles . . . . .	139
3.3	Analyses corrélationnelles . . . . .	142
<b>4</b>	<b>Discussion</b> . . . . .	147
4.1	Priorisation et heuristiques de décision . . . . .	148
4.2	Les deux rationalités de la priorisation . . . . .	150
4.3	Limites . . . . .	150
<b>7</b>	<b><i>Les heuristiques de priorisation</i></b> . . . . .	155
<b>1</b>	<b>Introduction</b> . . . . .	155
<b>2</b>	<b>Méthode</b> . . . . .	159
2.1	Participants . . . . .	159
2.2	Matériel . . . . .	159
2.3	Procédure . . . . .	161
2.4	Mesures et plan expérimental . . . . .	164
<b>3</b>	<b>Résultats</b> . . . . .	165
3.1	Préambule : des comportements oculaires disparates . . . . .	165
3.2	Analyse de la performance . . . . .	166
3.3	Analyse de l'allocation des ressources visuelles . . . . .	170
3.4	Analyses corrélationnelles . . . . .	171
3.5	Synthèse des résultats . . . . .	172
<b>4</b>	<b>Discussion</b> . . . . .	173
4.1	Les déterminants de la priorisation . . . . .	174
4.2	Les heuristiques de priorisation . . . . .	176
<b>8</b>	<b><i>La priorisation en situation d'incertitude</i></b> . . . . .	181
<b>1</b>	<b>Introduction</b> . . . . .	182
1.1	Priorisation et effets de structure . . . . .	182
1.2	La priorisation en situation d'incertitude . . . . .	183
1.3	Objectifs et présentation de l'étude . . . . .	184
<b>2</b>	<b>Méthode</b> . . . . .	186
2.1	Participants . . . . .	186
2.2	Matériel . . . . .	186
2.3	Procédure . . . . .	191

2.4	Mesures et plan expérimental . . . . .	194
<b>3</b>	<b>Résultats comportementaux</b> . . . . .	<b>195</b>
3.1	Analyse des performances à la sous-tâche de détection de pannes (FPT) . . . . .	195
3.2	Analyse des performances à la sous-tâche de surveillance de l'écran de vol principal (PFD) . . . . .	197
3.3	Analyse de l'allocation des ressources en condition double-tâche (test) . . . . .	199
3.4	Analyses corrélationnelles . . . . .	202
<b>4</b>	<b>Discussion des résultats comportementaux</b> . . . . .	<b>202</b>
<b>5</b>	<b>Résultats des questionnaires</b> . . . . .	<b>205</b>
5.1	Question ouverte . . . . .	205
5.2	Évaluation subjective de la performance . . . . .	206
5.3	Estimations des contingences indice-résultat . . . . .	207
<b>6</b>	<b>Discussion des résultats des questionnaires</b> . . . . .	<b>209</b>
<b>7</b>	<b>Discussion générale</b> . . . . .	<b>211</b>
7.1	L'apprentissage déclaratif dans le cadre de la théorie des ressources multiples . . . . .	211
7.2	L'apprentissage déclaratif dans le cadre du modèle computationnel ACT-R . . . . .	212
7.3	Conclusion . . . . .	214

## CONCLUSION

<b>9</b>	<b><i>Discussion générale</i></b> . . . . .	<b>221</b>
<b>1</b>	<b>La dimension proximale de la priorisation : l'évaluation cognitive des priorités</b> . . . . .	<b>222</b>
1.1	La plausibilité psychologique des heuristiques . . . . .	223
1.2	Vers une définition des règles heuristiques . . . . .	226
<b>2</b>	<b>La dimension distale de la priorisation : causes et conséquences des manifestations de la priorisation</b> . . . . .	<b>227</b>
2.1	Les conditions d'apparition de la priorisation . . . . .	227
2.2	Les conséquences de la priorisation . . . . .	229
<b>10</b>	<b><i>Conclusion</i></b> . . . . .	<b>237</b>
<b>1</b>	<b>Un processus d'orientation du contrôle exécutif</b> . . . . .	<b>237</b>

<b>2 Implications pratiques</b> .....	239
2.1 Enrichir la représentation des tâches .....	240
2.2 Aider au maintien d'une priorisation rationnelle .....	241
<b>3 Perspectives de recherche</b> .....	242
3.1 Évaluer systématiquement les dimensions proximales et distales de la priorisation .....	242
3.2 Étudier la priorisation en situations dégradées .....	242
3.3 Se réconcilier avec une approche normative de la priorisation .....	243
3.4 Approfondir l'étude des relations entre la priorisation et le contrôle exécutif .....	243
3.5 Approfondir l'étude des relations entre priorisation et détection du conflit, par l'utilisation de mesures neurophysiologiques .....	244
Bibliographie générale .....	247

## APPENDICE

<i>Autre contribution</i> .....	273
<i>Réponses à la question ouverte de la troisième contribution</i> .....	285
<i>Consignes</i> .....	289
<b>1 Formulaire de consentement éclairé</b> .....	290
<b>2 Consignes de la double-tâche de N-BACK</b> .....	291
2.1 Entraînement à la tâche de N-BACK .....	291
2.2 Tâche de double N-BACK avec récompenses .....	293
<b>3 Consignes de la double-tâche de surveillance</b> .....	296
3.1 Phase de familiarisation .....	296
3.2 Phase d'augmentation de la demande .....	297
3.3 Phase de familiarisation aux attributs .....	297
3.4 Phase de test .....	298
<b>4 Consignes de la double-tâche surveillance et apprentissage probabiliste</b> .....	300
4.1 Phase d'entraînement à la tâche de surveillance du PFD .....	300
4.2 Phase d'entraînement à la tâche de prédiction d'une panne .....	301
4.3 Phase d'entraînement à la double-tâche .....	302
4.4 Phase d'évaluation : double-tâche .....	302
4.5 Questionnaire d'évaluation des stratégies individuelles .....	303

<b><i>Codage expérimental</i></b>	305
<b>5 Codage de la double-tâche de <i>N-BACK</i></b>	306
5.1 Définition des variables	306
5.2 Exécution de la tâche	308
<b>6 Codage de la double-tâche de surveillance</b>	329
6.1 Définition des variables et exécution de la tâche	329
<b>7 Codage de la double-tâche de surveillance/prédiction</b>	340
7.1 Sous-tâche PFD	340
7.2 Sous-tâche FPT	372



# Liste des figures

<b><i>Les erreurs de priorisation en aéronautique</i></b>	<b>3</b>
1.1 Accidents aéronautiques mortels entre 1960 et 2010 .....	4
1.2 Le modèle de l'erreur de Reason (1990) .....	4
1.3 Un siècle d'évolution dans le cockpit .....	11
1.4 L'unité TOTE appliquée à l'enfonçage d'un clou .....	14
1.5 Cadre d'analyse de l'activité (Leplat, 2006) .....	15
<b><i>La performance humaine en situation multitâche</i></b>	<b>23</b>
2.1 Le <i>continuum</i> des situations multitâches. Traduit de Salvucci et Taatgen (2011) .....	24
2.2 Le modèle du filtrage attentionnel de Broadbent (1958) .....	26
2.3 Le modèle des ressources multiples de Wickens .....	32
2.4 Modèle de la mémoire de travail (Baddeley, 2003) .....	41
2.5 Représentation synthétique du contrôle cognitif .....	44
<b><i>Les fondements de la priorisation</i></b>	<b>53</b>
3.1 Représentation schématique de l'espace problème .....	55
3.2 Modèle de l'activité des contrôleurs du trafic aérien (ATCo) .....	56
3.3 Un modèle simple de résolution du problème de la file d'attente ...	58
3.4 La dynamique « en rafales » de l'activité humaine .....	59
3.5 Gestion des tâches, dans les dix minutes précédant l'accident du L-1011 .....	62
3.6 Environnement de la double-tâches de Gopher et al. (1982) .....	64
3.7 L'environnement SYNWORK (Elsmore, 1994) .....	68

3.8	La tâche de gestion des priorités (PMT pour <i>priority management task</i> ) utilisée par <a href="#">Matton et al. (2016)</a> . . . . .	70
3.9	Capture d'écran des deux systèmes de vision synthétique (SVS) utilisés dans l'étude de <a href="#">Iani et Wickens (2007)</a> . . . . .	73
3.10	Environnement multitâche MATBII . . . . .	88
3.11	Modèle élémentaire de la métacognition . . . . .	90
 <b><i>L'oculométrie pour l'étude de la priorisation</i></b>		99
4.1	Illustration d'une séquence de saccades et de fixations. . . . .	104
 <b><i>Première contribution. Priorisation et charge de travail</i></b>		127
6.1	Boitier de réponses et eye-tracker . . . . .	130
6.2	Environnement de la tâche de <i>N-Back</i> . . . . .	132
6.3	Environnement de la double-tâche de <i>N-Back</i> . . . . .	133
6.4	Séquençage de la double-tâche de <i>N-Back</i> . . . . .	133
6.5	Taux de détection globaux, par association de difficultés . . . . .	138
6.6	Coûts des taux de détection . . . . .	140
6.7	Proportion de temps de fixation. . . . .	140
6.8	Proportions des temps de fixation pour l'ensemble des trois AOIs . .	143
6.9	Corrélations de Pearson, entre les différences absolues moyennes des temps de fixation, et les taux moyens de détection obtenus, pour chaque combinaison de difficulté. . . . .	144
 <b><i>Deuxième contribution. Les heuristiques de priorisation</i></b>		155
7.1	Environnement de la double-tâche de surveillance . . . . .	160
7.2	Des comportements oculaires disparates . . . . .	166
7.3	Taux de détection global en fonction de la vitesse de rotation. . . . .	167
7.4	Effet des attributs et du tertile sur les taux de détection . . . . .	168
7.5	Effet différencié des attributs sur les temps de fixation, en fonction du tertile . . . . .	171
 <b><i>Troisième contribution. La priorisation en situation d'incertitude</i></b>		182
8.1	Environnement de la double-tâche de surveillance/prédiction de panne. . . . .	188
8.2	Performances obtenus lors de l'entraînement monotâche, à la sous-tâche détection de pannes (FPT) . . . . .	196

8.3	Effets des priorités sur la performance à la sous-tâche FPT .....	198
8.4	Effets des priorités sur la performance à la sous-tâche PFD .....	198
8.5	Densité spatiale des fixations du regard.....	200
8.6	Une forte disparité inter-individuelle dans l'allocation générale des ressources visuelles .....	200
8.7	Relation entre la tendance des participants à se prioriser et leur niveau de performance globale. Chaque point représente un participant. Comme la figure le suggère, il n'y avait aucune corrélacion entre ces deux mesures.....	203
8.8	Erreur moyenne de l'évaluation subjective de la performance en fonction du groupe.....	206
8.9	Corrélacions entre les probabilités de panne estimées et réelles ....	208
8.10	Erreur moyenne des estimations des contingences indice-résultat ..	209
8.11	La métaphore computationnelle ACT-R .....	213



REVUE DE  
LITTÉRATURE



## CHAPITRE 1

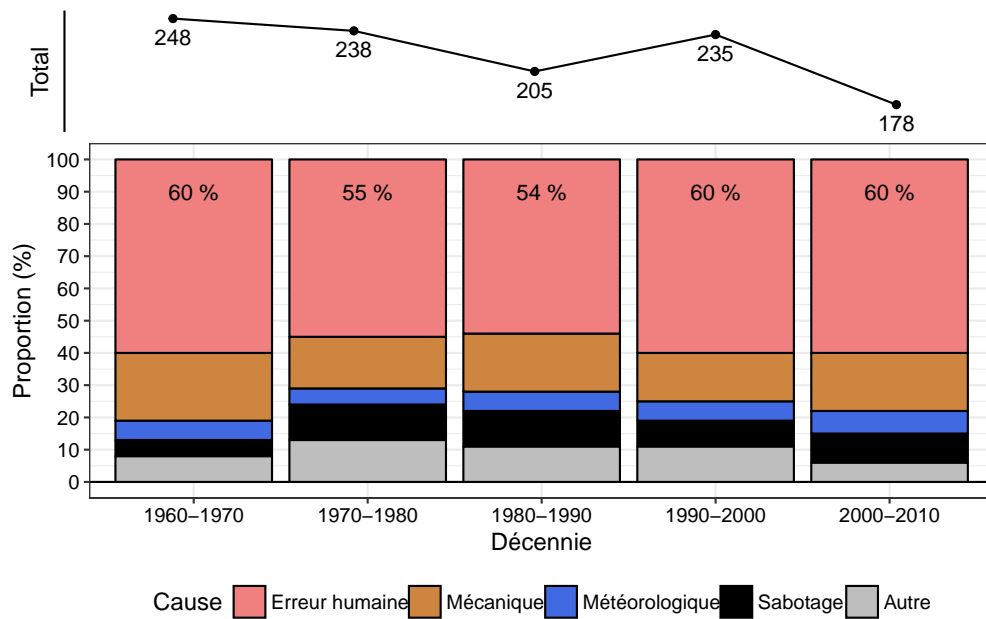
# *Les erreurs de priorisation en aéronautique*

<b>1 L'erreur humaine en aéronautique</b> .....	3
1.1 Qu'est-ce qu'une erreur humaine ?.....	5
1.2 L'émergence des erreurs de priorisation.....	6
<b>2 Les exigences cognitives des systèmes dynamiques</b> .....	10
2.1 Situation dynamique et dédoublement du contrôle cognitif .....	14
2.2 Le contrôle des ressources en situation multitâche .....	15
<b>3 Conclusion</b> .....	16

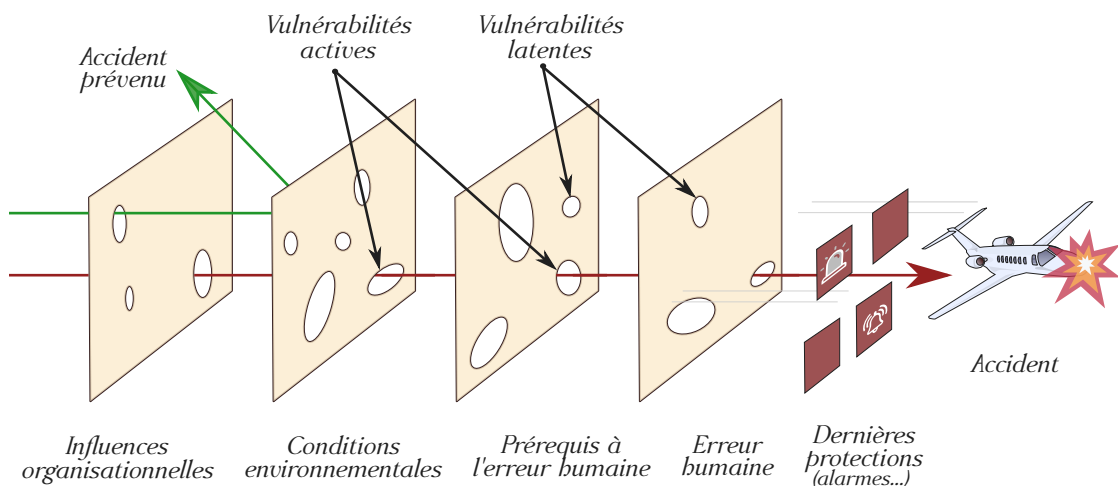
## 1. L'erreur humaine en aéronautique

La plus grande part des accidents survenus dans le domaine du transport aérien est aujourd'hui attribuée à l'erreur humaine – principalement celle des pilotes et, plus occasionnellement, celle des opérateurs de maintenance ou des contrôleurs. Malgré une diminution continue du nombre d'accidents mortels, recensés durant ces dernières décennies, on estime que plus de la moitié des accidents impliquent principalement une erreur humaine (Figure 1.1). Par exemple, entre 1996 et 2005, 55 % des accidents mortels qui ont été recensés dans l'aviation commerciale, ont été attribués à l'équipage de bord ([Boeing Airplane Safety, 2006](#)). Ce taux est encore plus élevé lorsque l'on considère l'aviation générale, regroupant les vols privés et commerciaux. Par exemple, aux États-Unis, en 2006, 79 % des accidents mortels, survenus dans le domaine de l'aviation générale, ont été attribués à des erreurs de pilotage ([Krey, 2007](#)).

Pour autant, le transport aérien demeure le moyen de transport *le plus sûr*. En effet, le risque moyen de périr lors d'un vol commercial est de 1/12 500 000, soit 65 fois moins que l'est celui de perdre la vie à bord de sa voiture, pour des distances de parcours équivalentes ([Sivak et Flannagan,](#)



**Figure 1.1** – Pourcentages d’accidents aériens mortels par décennie (de 1960 à 2010) dans le domaine de l’aviation commerciale, classés par cause. L’erreur humaine apparaît comme l’une des causes les plus fréquemment évoquées. Extrait et adapté de [PlaneCrashinfo.com](http://PlaneCrashinfo.com) (2017)



**Figure 1.2** – Le modèle de l’erreur de Reason. Tout accident provient d’une conjonction de vulnérabilités qui deviennent simultanément actives. Adapté de [Reason \(1990\)](http://Reason (1990))



2003). Autrement dit, alors même que la sécurité aérienne atteint des sommets – uniques dans l’histoire de l’industrie –, la contribution de l’erreur humaine à ces risques semble ne pas diminuer, au point même d’apparaître comme une donnée incompressible. Au-delà des risques humains, la prévention des incidents/accidents comporte un enjeu financier considérable. Il n’existe pas, à ce jour, d’étude systématique évaluant le coût financier de l’erreur humaine. Néanmoins, certains exemples sont éloquentes. Ainsi, on estime que 92 % des collisions au sol, entre avions et véhicules de sol, sont attribuables à des erreurs de la part des opérateurs, et que ces collisions représentent un coût annuel total de 10 milliards de dollars, pour les compagnies aériennes (Lacagnina, 2007). En outre, le domaine aérien est en pleine expansion. Le volume du transport aérien s’accroît régulièrement, et devrait même doubler lors des deux prochaines décennies (Dismukes, 2017). Cette évolution devrait s’accompagner d’une densification du trafic, tant au sol que dans les airs, et donc d’une augmentation des probabilités de collisions. Par ailleurs, et contrairement à un raisonnement intuitif, cette augmentation ne devrait pas être proportionnelle (c.-à-d. deux fois plus de risques pour deux fois plus de trafic), mais plutôt *exponentielle* à celle du trafic.

### 1.1. Qu’est-ce qu’une erreur humaine ?

Mais avant de poursuivre, il convient de préciser ce que nous entendons par « erreur ». Ces dernières années, un consensus très fort a émergé dans la communauté des Facteurs Humains, selon laquelle les erreurs commises par des opérateurs qualifiés, tels que des pilotes professionnels, des contrôleurs ou des mécaniciens, ne doivent pas être considérées comme des causes premières, mais plutôt comme symptômes (1) des défauts et limitations inhérents aux systèmes sociotechniques dans lesquels ils travaillent, et (2) des compromis qu’ils *doivent* réaliser entre sécurité et production des systèmes (Amalberti, 1996; Rasmussen et al., 1990; Reason, 1990; Woods et al., 1994). En d’autres termes, c’est l’ensemble des propriétés du système qui concourent à en préserver la sécurité : non seulement le comportement des opérateurs, mais aussi les influences organisationnelles ou les conditions environnementales qui pèsent sur leur activité. Cette conception de l’erreur est très bien illustrée par le modèle de Reason (1990, Figure 1.2), qui avance que tout accident provient, en fait, d’une conjonction de vulnérabilités (des différents niveaux du système), qui deviennent effectives simultanément.

## 1.2. L'émergence des erreurs de priorisation

Pour améliorer la sécurité des vols, et répondre à la densification du trafic que nous avons évoquée, l'industrie a depuis une cinquantaine d'années développé de nouvelles technologies d'aide et d'assistance, qui ont métamorphosé le cockpit. De nouveaux dispositifs ont fait progressivement leur apparition, parmi lesquels le pilote automatique (*autopilot*), l'auto-manette (*auto-throttle*), des systèmes pour favoriser l'anti-collision (CDTI), les communications (Datalink), la gestion générale du vol (FMS) ou encore le diagnostic de pannes (ECAM). Ces nouveaux dispositifs, s'ils se sont accompagnés d'une réduction drastique du nombre d'accidents/incidents aériens (Liu, 1997), ont en même temps profondément modifié les rôles et fonctions des opérateurs humains, et de nouveaux types d'erreur humaine sont apparus.

En particulier, compte tenu de l'augmentation du nombre de systèmes de contrôle à bord, les processus de gestion des tâches et d'allocation des ressources attentionnelles sont devenus centraux (Chou et al., 1996; Shappell et Wiegmann, 2000). Dans un rapport de 2014, la *Flight Safety Foundation* reconnaissait que les phénomènes de surveillance étaient impliqués dans un nombre important d'accidents aériens. Le crash du Colgan Air Flight 3407, survenue en 2009, et ayant amené la mort de 49 personnes, en est un exemple tragique. Dans son rapport, le *National Transportation Safety Board* (2010) relevait « un échec de l'équipage à surveiller la vitesse de l'appareil, en relation avec l'apparition d'un indicateur de faible-vitesse ».

Parmi les facteurs qui ont été identifiés comme pouvant contribuer à une surveillance inappropriée des systèmes, certains auteurs ont avancé des erreurs de *priorisation* (Jonsson et Ricks, 1995; Wilson, 1998). En général, on parle d'erreur de priorisation lorsqu'une tâche à faible priorité se voit allouer une quantité substantielle de ressources, *au détriment* d'une tâche à priorité élevée. Par exemple, dans le domaine du pilotage, il existe une règle simple de priorisation, que tout pilote novice doit apprendre : il s'agit de la règle ANCS (pour *Aviate* > *Navigate* > *Communicate* > *Manage Systems*). Cette règle simple spécifie une hiérarchie à visée normative, selon laquelle toute tâche appartenant à une catégorie (p.ex., piloter) *doit* avoir la priorité sur les tâches de catégorie inférieure (p.ex., communiquer). Par exemple, il tombe sous le sens que le maintien de l'avion dans les airs (*Aviate*) comporte une priorité plus grande que son orientation (*Navigate*). Cette règle est très bien connue des pilotes. Toutefois, comme le relèvent Colvin et al. (2005) et Funk (1991), nombreux sont les cas d'accidents ou d'incidents, où ce schéma n'est pas respecté. C'est le cas dans l'exemple suivant.

### 1.2.1. Exemple d'incident lié à une erreur de priorisation. L'incident d'un Learjet 40, Stockholm (2008)

La description de l'incident s'appuie sur un rapport publié en 2010 par *Rosvall et Karlsson*, membres du SHK (Statens haverikommission), le bureau d'investigation des accidents aériens Suédois.

Le vol auquel nous nous intéressons ici était un vol purement logistique entre Paris et Stockholm : il n'y avait pas de passagers à bord. Au moment de l'incident, le vol était guidé par radar et allait entreprendre une approche ILS de l'aéroport de Bromma (Stockholm). Le co-pilote était le PF (*Pilot Flying*) et manœuvrait par le biais du pilote automatique (ci-après PA), conformément aux instructions données par le contrôle aérien. Lorsqu'un nouveau cap – de 330° à gauche – a été donné, le PF a entré la nouvelle valeur de cap dans le PA. Toutefois, dans les faits, l'avion n'a pas changé de cap. Dans le même temps, l'équipage a été autorisé à débiter l'approche ILS et le mode d'atterrissage automatique (APPR) était actif. Les deux pilotes se sont alors affairés à la préparation de l'atterrissage (*checklist*). Lorsqu'ils ont réalisé qu'ils traversaient le circuit d'approche, le PNF (*Pilot Not Flying*; ici le commandant de bord), a repris le contrôle de l'appareil, désactivé le PA, et réalisé un virage abrupt à gauche, pour rejoindre le bon circuit. Pendant cette manœuvre, l'avion a entamé une descente très prononcée et involontaire. Deux antennes se trouvaient non loin, à une altitude de 1171 pieds, tandis qu'à son niveau le plus bas, l'avion avait atteint une altitude de 650 pieds. L'ATC a commencé à transmettre des avertissements à l'équipage, assortis d'un nouveau cap à suivre, et de l'ordre de remonter immédiatement – ce que les pilotes ont confirmé oralement. Malgré cela, l'avion continuait de descendre et l'alarme de proximité avec le sol (GPWS pour *Ground Proximity Warning System*) s'est alors déclenchée, menant le PNF à prendre informellement (sans utiliser la phraséologie standard) le contrôle du vol, et à initier un *go-around* vers la gauche. Après un retour à 2500 pieds, la procédure a pu recommencer, sans encombre jusqu'à l'atterrissage.

Le rapport a fait ressortir, dans ses conclusions « une erreur de priorisation et de répartition de la charge de travail entre les deux pilotes » (p.23). En particulier, le rapport a pointé que les pilotes, occupés à des procédures de préparation de l'atterrissage, n'ont pas pris le temps de vérifier le comportement de l'appareil après le changement (théorique) de cap. Or, le PA était en mode basique – ce que les deux pilotes n'avaient pas remarqué; le cap était donc verrouillé, ce qui expliquait le comportement de l'avion. Pour finir, notons que le rapport a aussi pointé un manque potentiel de « programmes d'entraînement des pilotes à la compréhension et la gestion du PA et du FMS » (p.24), comme facteur pouvant expliquer ce défaut de priorisation.

### 1.2.2. Les différents visages de l'erreur de priorisation

L'exemple précédent illustre à la fois le rôle central de la priorisation dans la bonne tenue d'un système aussi complexe que le cockpit, mais aussi l'intrication manifeste entre la priorisation humaine et certaines des conséquences de l'interaction homme-automatisme. En effet, dans le cas du Learjet 40, le défaut de priorisation peut se voir rapproché d'un phénomène de *complaisance* envers les automatismes (*complacency*; Parasuraman et al., 1993; Wiener, 1981), puisque c'est bien un manque de surveillance de ces derniers qui a été mis en cause. Mais il n'y a pas que la complaisance qui puisse menacer la priorisation. D'autres phénomènes, tels que la *tunnélisation attentionnelle*, la *persévération*, la *surdité inattentionnelle*, ou encore l'*entropie visuelle*, peuvent, en fait, se voir interprétés en termes de priorisation. Ainsi, après avoir défini succinctement tous ces phénomènes, nous montrerons que tous ont, en commun, un défaut de priorisation.

- Complaisance** La complaisance peut être opérationnellement définie comme l'absence manifeste de réponse au dysfonctionnement d'un automatisme, en raison d'un « état psychologique [de l'opérateur], caractérisé par un faible niveau de suspicion » (Wiener, 1981). Cette confiance excessive amène généralement les opérateurs à allouer moins de ressources à la gestion des automatismes, qu'à la surveillance des paramètres basiques du vol, tel que l'attitude de l'appareil (Huettig et al., 1999; Diez et al., 2001; Sarter et al., 2007).
- Tunnélisation attentionnelle** On parle de tunnélisation attentionnelle pour caractériser un comportement d'allocation de l'attention vers une zone spécifique du champ visuel, pour un temps *excessif* pouvant mener à la négligence critique d'autres informations (Régis et al., 2014; Wickens et Alexander, 2009). Ce phénomène a été identifié comme contributif de nombreux accidents aériens, et notamment de collisions au sol sans perte de contrôle – ou accidents CFIT (*controlled flight into terrain* Shappell et Wiegmann, 2003), souvent précédés par d'une allocation inappropriée des ressources, ayant résultée en une négligence importante des indicateurs du comportement vertical de l'appareil.
- Entropie visuelle** Si la tunnélisation correspond à une focalisation exclusive et excessive des ressources, l'*entropie visuelle* pro-

cède, à l’opposé, d’une incapacité à fixer son attention, résultant en un comportement visuel erratique. De nombreuses études ont montré que, chez les pilotes, ces comportements visuels étaient souvent favorisés par une charge de travail élevée (Di Nocera et al., 2007) et qu’ils résultaient en une diminution générale de la performance, par comparaison aux pilotes qui parvenaient à maintenir une allocation structurée de leurs ressources (van de Merwe et al., 2012; Vine et al., 2015).

**Surdité  
inattentionnelle**

La surdité inattentionnelle correspond à l’incapacité manifeste, pour un opérateur, de détecter un stimulus auditif saillant. Ce phénomène est, en général, favorisé par la présence d’une charge perceptive visuelle élevée (Giraudet et al., 2015; Macdonald et Lavie, 2011), d’une charge de travail plus forte (Dehais et al., 2014), ainsi que par un conflit entre les informations visuelles et auditives (Scannella et al., 2013).

**Pers v ration**

Enfin, le terme de persévération a été employé pour caractériser la persistance d’un opérateur dans un comportement stratégique erroné, malgré la présence manifeste d’indices le contredisant (Dehais et al., 2017b; Hall et al., 1982). Par exemple, en 2009, le co-pilote du tristement-célèbre crash du vol 447, entre Rio et Paris, avait tenté de maintenir son appareil en montée, en dépit de 70 alarmes de décrochage, suite au givrage des sondes Pitot ayant fortement perturbé les indicateurs de vitesse (BEA, 2012).

Toutes ces instances de l’erreur humaine ont ceci en commun que, par un jeu de raisons diverses (automatismes, charge de travail, charge perceptive, stress...), elles mènent toutes (1)   un dysfonctionnement manifeste de l’allocation des ressources, favorisant la négligence perceptive ou stratégique d’informations critiques, ainsi qu’à (2) une violation possible des règles de priorité élémentaires, et notamment de la règle ANCS.   ce stade, il n’est pas question d’avancer que la priorisation est un facteur causal des phénomènes que nous avons décrit. Simplement, nous souhaitons faire remarquer, par ce biais, que la priorisation, en tant que processus stratégique d’allocation des ressources, *traverse tous ces phénomènes*.   la limite, peu importe, pour l’instant, de savoir que la priorisation est une cause ou une conséquence (de la complaisance, de la tunnélisation etc.). Si, comme nous le postulons, la

priorisation est impliquée *d'une façon ou d'une autre* dans l'ensemble de ces phénomènes, il apparaît central d'en saisir le fonctionnement : c'est-à-dire à la fois la logique, au plan cognitif, mais aussi les facteurs d'influence, ainsi que les conséquences.

Toutefois, malgré l'importance de la priorisation, et sa contribution au maintien d'une performance acceptable dans les environnements complexes, il n'existe à notre connaissance aucune étude ayant tenté de déterminer, de façon *fondamentale*, les *processus cognitifs supportant l'évaluation des priorités* dans des environnements multitâches. Pourtant, la densification (du trafic) que nous avons évoquée ne fera qu'accentuer le rôle critique des activités de priorisation, et la probabilité que des erreurs en résultent. Dans la prochaine partie, nous étayerons cette proposition en montrant qu'il existe un lien direct entre la nature (complexe/dynamique) des systèmes les plus modernes, tels que le cockpit, et les exigences (de priorisation) qui, en retour, pèsent sur les opérateurs.

## 2. Les exigences cognitives des systèmes dynamiques

La révolution informatique que le monde a connue ces cinquante dernières années a profondément modifié la nature de la plupart des activités. Dans le domaine aéronautique comme dans d'autres domaines, l'implication toujours plus forte de systèmes automatisés a engendré une redéfinition fondamentale des rôles et fonctions assignables à l'opérateur humain. D'acteur principal de l'activité, il est devenu un *superviseur* de la bonne tenue des *opérations*. Par exemple, dans le cockpit, le pilote ne manipule que très rarement les instruments de contrôle de l'appareil, mais s'occupe principalement de programmer, contrôler et ajuster les systèmes de navigation automatiques, qui prennent en charge ces tâches à sa place (voir Figure 1.3). Pour traduire cette évolution, Norman (1988) a employé le terme de « *périphérialisation* ». Ce dernier terme, qui signifie littéralement « mettre à la périphérie », a été défini comme un état psychobiologique complexe, résultant d'un usage intensif des automatismes, et débouchant sur l'impossibilité grandissante, pour l'opérateur humain, d'influencer directement le cours de l'activité d'un système (Wiener et Curry, 1980).

Ce phénomène ne concerne pas uniquement le contrôle direct de la situation, mais aussi tous les processus de traitement de l'information : acquérir des données, les analyser ou prendre des décisions, sont devenues autant d'opérations qu'il partage dorénavant avec des automatismes (Parasuraman et al., 2000). Ces évolutions, ainsi que l'ensemble des innovations associées, ont largement été documentées, dans des domaines aussi divers que



Albatros D-Va (1917)



Antonov An-12 (1959)



Airbus A-380 (2007)



**Figure 1.3** – Un siècle d'évolution dans le cockpit : de l'Albatros D-V à l'Airbus A-380, en passant par l'Antonov An-12. Le *glass cockpit* de l'Airbus A-380 traduit une volonté de réduire l'encombrement visuel, caractéristique de cockpits plus traditionnels comme celui de l'Antonov An-12.

l'aviation (Spitzer, 2016), l'automobile (Walker et Stanton, 2017), la médecine (Carayon, 2016) ou la robotique (Sheridan, 2016). Elles ont été porteuses d'une complexification<sup>1</sup> des systèmes, et ont été accompagnées d'un déplacement de l'intérêt des chercheurs, de la dimension physique (action) vers la dimension cognitive des situations (Dornheim, 1992; Ricks et al., 1994). Pour citer Jonsson et Ricks (1995) :

*« Deux exemples sont représentatifs [...] Un vol transcontinental peut être entièrement programmé depuis l'aérogare, à l'aide du gestionnaire de vol [ou FMS pour flight management system], exonérant l'équipage de modifications manuelles par le biais du tableau de bord en cours du vol, ou bien – ce qui n'arrive quasiment plus – de piloter l'aéronef manuellement. Sur le McDonnell Douglas MD-11, des reconfigurations successives à des états de panne peuvent avoir lieu sans aucune intervention humaine. Dans chacun de ces exemples, la performance des pilotes repose sur la surveillance des systèmes ainsi que l'évaluation de leur bon fonctionnement. En raison de ces avancées technologiques, les concepteurs sont obligés de tenir compte d'un certain nombre de questions, tels que la façon dont les pilotes surveillent la progression du vol, la compréhension qu'ils ont du fonctionnement du FMS, les informations dont ils ont besoin, ainsi que les processus cognitifs et les modèles mentaux qui supportent leur traitement de l'information. Ainsi, la cognition des pilotes a significativement gagné en considération, dans la conception des cockpits les plus modernes. »*

Extrait et traduit de Jonsson et Ricks (1995, p.1)

Pour rendre compte de ces situations nouvelles, des concepts ont été mis en avant : on a parlé de « systèmes cognitifs conjoints » (Rasmussen et al., 1994), de « situations dynamiques » (Amalberti, 2001; Hoc, 2004b) ou encore d'« environnements multitâches » (Meyer et Kieras, 1997; Salvucci et Taatgen, 2011b). Par exemple, l'expression de « systèmes cognitifs conjoints » soutient l'idée que les tâches de l'opérateur ou des automatismes, peuvent n'avoir aucun sens si on les considère isolément, et qu'il est préférable de penser la tâche comme un tout dévolu à un système homme-automatisme, décomposée en sous-tâches, lesquelles sont alors *distribuées* entre les divers agents en

1. Complexe est un terme, emprunté au XIV<sup>e</sup> siècle, au latin *complexus*, qui signifiait « fait d'éléments imbriqués ». Au XVI<sup>e</sup> siècle, le mot est repris comme adjectif pour qualifier *tout ensemble qui se compose d'éléments hétérogènes*. Contrairement à ce que véhicule le sens commun, *complexe* ne signifie pas *compliqué* (au sens de difficile), mais renvoie plutôt à la dimension protéiforme d'un ensemble (Rey, 2011). Parler de *complexité* pour une situation de travail, c'est donc mettre en avant, non pas la difficulté de l'activité qui y prend place, mais plutôt la difficulté à rendre compte de sa structure.



présence, qu'ils soient humains ou artificiels (sur la cognition distribuée, voir [Stanton et al., 2006](#)).

Du point de vue de l'opérateur humain, cette redistribution des tâches va de pair avec le renforcement du caractère *dynamique* de l'activité. En effet, est considéré *dynamique* tout système dont l'évolution des propriétés (physiques ou structurelles) comporte une logique intrinsèque, et de ce fait, n'est *que partiellement* contrôlé par les opérateurs ([Samurcay et Hoc, 1988](#)). Prenons l'exemple de la navigation. En mer, si tout le monde cesse le travail, cela n'empêchera pas l'activité de *suivre son cours*. La situation du bateau continuera d'évoluer, au gré des vents ou des courants; il dérivera, selon une dynamique propre. Autrement dit, dans une telle situation, l'arrêt de l'activité humaine n'est pas l'arrêt de l'activité tout court<sup>2</sup>. De même les automatismes, en externalisant une partie grandissante de l'activité, vient renforcer son caractère dynamique du point de vue de l'opérateur.

En outre, les automatismes ne sont, en général, pas les seuls systèmes *externes* que les opérateurs doivent gérer. On estime, par exemple, qu'au cours de son activité, un pilote entre en relation avec 6 systèmes différents, dont il doit articuler les logiques propres : parmi lesquels le système aérodynamique (l'avion en tant que mobile dans l'air); le système de propulsion (le potentiel énergétique de l'appareil); le trafic aérien ou encore le système interne à l'avion, c'est-à-dire ses équipements, son équipage et ses passagers (voir [Pinet, 2011](#)).

De telles caractéristiques ne sont pas sans conséquence pour l'activité, et l'ensemble des *régulations* que les opérateurs y déploient. Mais avant de montrer pourquoi, il faut rappeler ce que l'on entend par « régulation ». Le terme existe depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, où il désignait le « fait d'agir sur un système complexe et d'en coordonner les actions pour un fonctionnement *correct et régulier* » ([Rey, 2011](#)). Emprunté (et popularisé) par la théorie cybernétique dans les années 50 ([Ashby, 1956](#)), il est ensuite importé en psychologie du travail par [Miller et al. \(1960\)](#). La régulation y désigne alors l'ensemble des adaptations déployées par les opérateurs pour maintenir la poursuite du ou des but(s) assigné(s) au système de travail ([Leplat, 2006](#)), dans une boucle incessante de comparaison-exécution, prenant place jusqu'à ce que l'état-cible du système soit atteint. Cet aller-retour continu entre prise d'information et action peut être symbolisé par l'unité TOTE (Test-Operate-Test-Exit, Figure 1.4). Reprenons l'exemple donné par [Miller et al. \(1960\)](#), d'un opérateur qui enfonce un clou. Dans un premier temps, l'opérateur « teste » (T) l'état du clou; si celui-ci n'est pas conforme à son état-cible (pas suffisamment

---

2. Par opposition, on qualifie de *statique* tout système dont la maîtrise et l'évolution sont entièrement dévolues aux opérateurs humains.

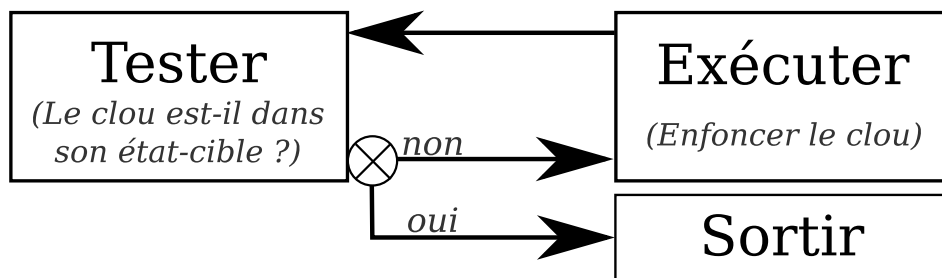


Figure 1.4 – L'unité TOTE appliquée à l'enfonçage d'un clou (Miller et al., 1960, p.34)

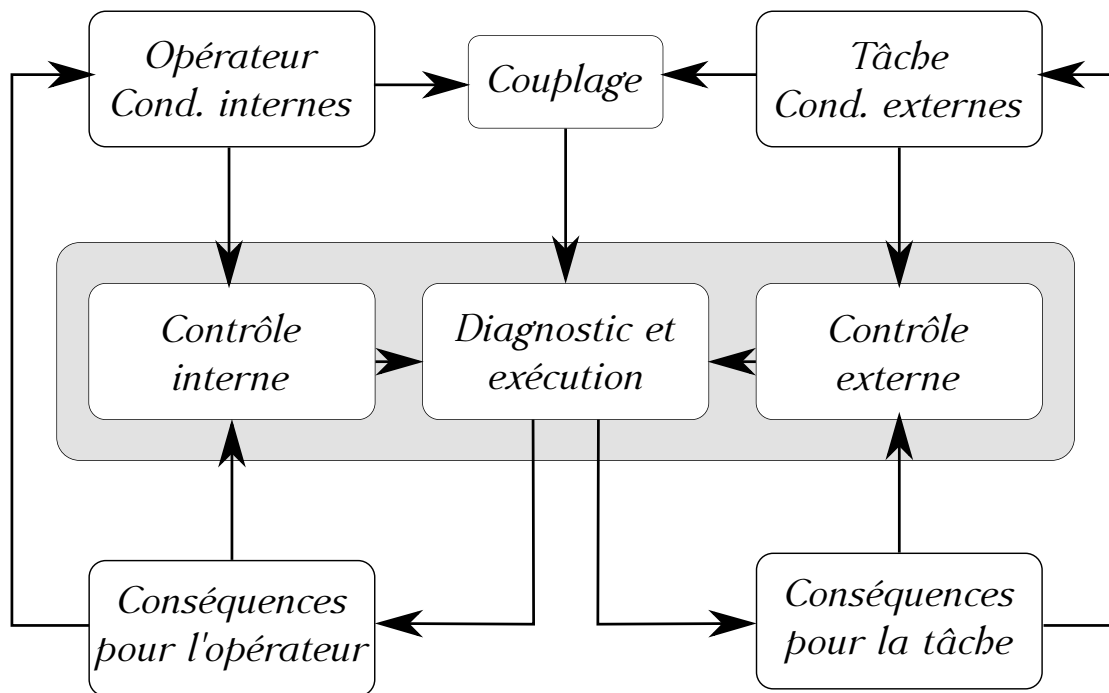
enfoncé), il opère (O) un coup de marteau ; s'en suit un nouveau test (T) et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'état du clou soit conforme à l'état-cible ; l'opérateur sort (*exit*, E) alors de son activité.

Il s'agit évidemment de l'exemple le plus simple. Celui où un seul opérateur contrôle le résultat de sa propre activité et la régule : c'est une situation *monotâche* et *statique*. Les situations qui nous intéressent sont au contraire *multitâches* et *dynamiques*. Multitâches, car le nombre d'opérations que les opérateurs doivent contrôler y est très élevé ; dynamique car l'état du système y évolue, pour partie, indépendamment de l'action directe des opérateurs, comme nous l'avons déjà dit. Dans ces situations, les activités régulatrices des opérateurs peuvent aussi être symbolisées comme des cycles de comparaison-exécution. Néanmoins, cette unité d'analyse ne permet pas de rendre compte de la complexité de ces régulations, et il faut y ajouter au moins deux raffinements.

## 2.1. Situation dynamique et dédoublement du contrôle cognitif

La première conséquence des situations dynamiques sur les activités régulatrices des opérateurs, est un *dédoublement* des processus de contrôle. En effet, si l'opérateur doit assurer la bonne tenue de l'ensemble des opérations, dans un système dynamique *ces dernières ne sont plus toutes de son fait* – et ce d'autant plus que sont impliqués des automatismes. Dans de telles situations, il ne s'agit plus seulement pour l'opérateur de contrôler « ce qu'il fait », mais aussi de contrôler « ce qui se passe » et, puisque sa situation est au sens littéral une *co-opération* dynamique, de déployer des processus de contrôle spécifiques, s'il souhaite maintenir une représentation satisfaisante de la situation (Hoc et al., 2000).

À ce propos, Amalberti (2001) avance qu'il existe au moins deux types de contrôle : un contrôle *interne* et un contrôle *externe*. Alors que le contrôle interne renvoie à la vérification et à la régulation des activités propres à l'opérateur (p.ex., décisions, actions), la notion de contrôle *externe* fait référence à la



**Figure 1.5** – Cadre général pour l'analyse de l'activité, tiré de [Leplat \(2006\)](#). L'action de l'opérateur (au centre du schéma) résulte d'un couplage (ou compromis) entre les conditions externes de la tâche (p.ex., but, pression temporelle, conditions atmosphériques...) et les conditions internes de l'opérateur (p.ex., un état de fatigue). Les conséquences de l'action (en bas du schéma) sur la tâche/l'opérateur, font l'objet d'un contrôle externe/interne qui, le cas échéant, peut engendrer une nouvelle action corrective.

surveillance et à la régulation des opérations qui ont lieu dans l'environnement (externe) : autant les actions entreprises par d'autres, que les opérations soutenues par des automatismes. Or la complexification des systèmes de travail allant de pair avec une externalisation des opérations, le maintien d'une bonne conscience de la situation (au sens de [Endsley, 1995](#)) repose donc sur une exigence accrue de contrôle externe (Figure 1.5).

## 2.2. Le contrôle des ressources en situation multitâche

La seconde conséquence majeure de la complexité des environnements sur l'activité régulatrice des opérateurs émerge de leur caractère *multitâche*.

Comme l'avance [Rogers \(1996\)](#), « à mesure que les systèmes deviennent plus intelligents et complexes, et que de plus en plus de tâches ou opérations automatisées doivent être gérées, on peut s'attendre à ce que la charge *inhérente à la gestion des tâches* par l'équipage augmente » (p.239). Aux tâches traditionnelles de contrôle et de surveillance de l'état de l'appareil,

viennent se surajouter de nouvelles tâches de communication et de gestion relatives aux automatismes, faisant augmenter immanquablement la demande attentionnelle pesant sur les opérateurs. Si, d'un côté, les automatismes fournissent à l'équipage des ressources externes additionnelles, ces ressources doivent, d'un autre côté, être correctement gérées, ce qui accroît l'importance des processus de gestion des tâches, du côté des opérateurs.

Au-delà de cette exigence accrue sur les processus de gestion des tâches, l'augmentation du nombre de tâches va de pair avec une sur-sollicitation de certaines ressources. En effet, non seulement la gestion des automatismes peut solliciter des ressources déjà utilisées par ailleurs, mais de surcroît ces tâches nouvelles ont un caractère commun : la plupart sollicitent les ressources visuelles des opérateurs, qui doivent régulièrement les surveiller pour en contrôler l'état, et engager une action corrective le cas échéant. Dans le cockpit traditionnel, les sensations visuelles, auditives et tactiles, jouaient toutes un rôle important dans la transmission de l'information aux pilotes. Au contraire, les cockpits modernes imposent une pression plus grande sur la modalité visuelle, si bien que l'organisation de l'information spatiale est devenue une question centrale chez les concepteurs (Braune et al., 1991; Ricks et al., 1994, 1991). Par exemple, selon le principe de compatibilité-proximité (Wickens et Carswell, 1995), un isomorphisme doit être établi entre la proximité spatiale des indicateurs, et leur proximité « mentale ».

Quoiqu'il en soit, comme le soulignait Billings (1996), la modernisation des cockpits a engendré, dans les faits, une augmentation de « l'information à acquérir et traiter, pour s'assurer de l'état de l'aéronef et de ses automatismes ». En conséquence, la priorisation y tient une place plus importante ; elle requiert plus de temps et d'effort, et porte sur un ensemble plus important de tâches (Wilson, 1998). Ces contraintes, inhérentes à la dimension multitâche de ces situations, seront développées plus longuement au prochain chapitre (p.23).

### 3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que la priorisation tient un rôle central dans les comportements d'allocation des ressources en situation complexe, et s'est trouvé impliquée dans nombre d'accidents/incidents aériens. En outre, nous avons montré que l'importance prise par la priorisation est à mettre en relation avec la nature complexe et dynamique des systèmes sociotechniques modernes. En particulier, nous avons avancé que l'agentivité<sup>3</sup> toujours plus

---

3. Le terme « agentivité » provient de l'anglais *agency*, que l'on peut traduire littéralement par « pouvoir d'agir ». Il s'agit de la faculté d'un dispositif ou d'une personne à influencer le système dont il fait partie.

forte des interfaces intensifie les besoins de supervision de la part d'un opérateur humain dont les ressources sont limitées.

Dans le chapitre suivant, nous passerons en revue un ensemble de travaux qui montrent comment les limitations du système de traitement de l'information humain, peuvent permettre d'expliquer les menaces qui pèsent sur la performance des opérateurs, dans de tels systèmes. Nous montrerons alors l'importance des processus de *contrôle cognitif* dans le maintien d'une performance *acceptable*, mais aussi l'exigence de priorisation qui les traverse.

## Bibliographie du chapitre

- Amalberti, R. (1996). *La conduite de systèmes à risques*. Presses universitaires de France.
- Amalberti, R. (2001). La maîtrise des situations dynamiques. *Psychologie française*, 46(2) :107–118.
- Ashby, W. R. (1956). An introduction to cybernetics. *An introduction to cybernetics*.
- BEA (2012). Accident survenu le 1er juin 2009 à l'airbus a330-203 exploité par air france vol af 447 - rio de janeiro - paris. Rapport final, Bureau d'Enquêtes et d'Analyses. BEA f-cp090601.
- Billings, C. E. (1996). *Human-centered aircraft automation : Principles and guidelines*. National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center.
- Boeing Airplane Safety (2006). Statistical summary of commercial jet aircraft accidents : Worldwide operations, 1959-2005. *Boeing Commercial Airplane, Seattle, WA*.
- Braune, R., Hofer, E., et Dresel, K. M. (1991). Flight deck information management- a challenge to commercial transport aviation. In *International Symposium on Aviation Psychology, 6 th, Columbus, OH*, pages 78–84.
- Carayon, P. (2016). *Handbook of human factors and ergonomics in health care and patient safety*. CRC Press.
- Chou, C.-C., Madhavan, D., et Funk, K. (1996). Studies of cockpit task management errors. *The International Journal of Aviation Psychology*, 6(4) :307–320.
- Colvin, K., Funk, K., et Braune, R. (2005). Task prioritization factors : Two part-task simulator studies. *The International Journal of Aviation Psychology*, 15(4) :321–338.
- Dehais, F., Causse, M., Vachon, F., Régis, N., Menant, E., et Tremblay, S. (2014). Failure to detect critical auditory alerts in the cockpit : evidence for inattentive deafness. *Human factors*, 56(4) :631–644.
- Dehais, F., Hodgetts, H. M., Causse, M., Behrend, J., Durantin, G., et Tremblay, S. (2017). Momentary lapse of control : A neuroergonomics approach to understanding and mitigating perseveration in human error. Article. Soumis.

- Di Nocera, F., Camilli, M., et Terenzi, M. (2007). A random glance at the flight deck : Pilots' scanning strategies and the real-time assessment of mental workload. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(3) :271–285.
- Diez, M., Boehm-Davis, D. A., Holt, R. W., Pinney, M. E., Hansberger, J. T., et Schoppek, W. (2001). Tracking pilot interactions with flight management systems through eye movements. In *Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology*, pages 1–6. The Ohio State University Columbus.
- Dismukes, R. K. (2017). *Human error in aviation*. Routledge.
- Dornheim, M. A. (1992). Changes hike md-11 training success. *Aviation Week & Space Technology*, 137(21) :93–95.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1) :32–64.
- Flight Safety Foundation (2014). A practical guide for improving flight path monitoring. Rapport, Flight Safety Foundation.
- Funk, K. (1991). Cockpit task management : Preliminary definitions, normative theory, error taxonomy, and design recommendations.
- Giraudet, L., St-Louis, M.-E., Scannella, S., et Causse, M. (2015). P300 event-related potential as an indicator of inattentive deafness? *PLoS one*, 10(2) :–0118556.
- Hall, R. E., Fragola, J., et Wreathall, J. (1982). Post-event human decision errors : operator action tree/time reliability correlation. Technical report.
- Hoc, J.-M. (2004). *Vers une coopération homme-machine en situation dynamique*, chapter 16, pages 269–283. Presses Universitaires de France.
- Hoc, J.-M., Amalberti, R., et Plee, G. (2000). Vitesse du processus et temps partagé : planification et concurrence attentionnelle. *L'année psychologique*, 100(4) :629–660.
- Huettig, G., Anders, G., et Tautz, A. (1999). Mode awareness in a modern glass cockpit. In *Proceedings of the 10th International Symposium on Aviation Psychology*, volume 1, pages 130–135.
- Jonsson, J. E. et Ricks, W. R. (1995). Cognitive models of pilot categorization and prioritization of flight-deck information. Technical report, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, United States.
- Krey, N. (2007). Nall report : accident trends and factors for 2006. *Frederick, MD, AOPA Air Safety Foundation*.
- Lacagnina, M. (2007). Defusing the ramp. *AeroSafety world*, 2(5).
- Leplat, J. (2006). La notion de régulation dans l'analyse de l'activité. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, 8-1. consulté le 11 mars 2017.

- Liu, K. K. (1997). The highly-automated airplane : Its impact on aviation safety and an analysis of training philosophy. Technical report, Air Force Institute of Technology.
- Macdonald, J. S. et Lavie, N. (2011). Visual perceptual load induces inattentive deafness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(6) :1780–1789.
- Meyer, D. E. et Kieras, D. E. (1997). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance : Part 1. basic mechanisms. *Psychological Review*, 104(4) :3–65.
- Miller, G. A., Galanter, E., et Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. Adams Bannister Cox.
- National Transportation Safety Board (2010). Loss of control on approach colgan air, inc. operating as continental connection flight 3407, bombardier dhc-8-400, n200wq. Rapport d'accident, National Transportation Safety Board, Clarence Center, New York. NTSB/AAR-10/01.
- Norman, D. A. (1988). *The Psychology Of Everyday Things*. Basic Books.
- Parasuraman, R., Molloy, R., et Singh, I. L. (1993). Performance consequences of automation-induced 'complacency'. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(1) :1–23.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., et Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A : Systems and Humans*, 30(3) :286–297.
- Pinet, J. (2011). *Traitement de situations inattendues d'extrême urgence en vol : test d'un modèle cognitif auprès de pilotes experts*. PhD thesis, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II.
- PlaneCrashinfo.com (2017). Causes of fatal accidents by decade. Site web. Consulté le 13 septembre 2017 sur <http://www.planecrashinfo.com/cause>.
- Rasmussen, J., Nixon, P., et Warner, F. (1990). Human error and the problem of causality in analysis of accidents. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, pages 449–462.
- Rasmussen, J., Pejtersen, A., et Goodstein, L. P. (1994). *Cognitive systems engineering*. New York, Wiley.
- Reason, J. (1990). *Human error*. Cambridge university press.
- Régis, N., Dehais, F., Rachelson, E., Thooris, C., Pizziol, S., Causse, M., et Tessier, C. (2014). Formal detection of attentional tunneling in human operator–automation interactions. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 44(3) :326–336.
- Rey, A. (2011). *Dictionnaire historique de la langue française*. Le robert.

- Ricks, W. R., Abbott, K. H., Jonsson, J. E., Boucek, G., et Rogers, W. H. (1991). Information management for commercial aviation – A research perspective. In *Proceedings of the International Symposium on Aviation Psychology*, volume 1, pages 60–65, Columbus, OH, Ohio State University. International Symposium on Aviation Psychology.
- Ricks, W. R., Jonsson, J. E., et Rogers, W. H. (1994). Cognitive representations of flight-deck information attributes. *The International Journal of Aviation Psychology*, 4(1) :65–83.
- Rogers, W. H. (1996). Flight deck task management : A cognitive engineering analysis. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 40 of 4, pages 239–243.
- Rosvall, G. et Karlsson, R. (2010). Aeroplane incident to oe-gva on approach to stockholm/bromma airport in stockholm county. Technical report, Swedish Accident Investigation Board. Rapport d’incident.
- Salvucci, D. et Taatgen, N. (2011). *The Multitasking Mind*. Oxford University Press.
- Samurçay, R. et Hoc, J.-M. (1988). De l’analyse du travail à la spécification d’aides à la décision dans des environnements dynamiques. *Psychologie française*, pages 187–196.
- Sarter, N. B., Mumaw, R. J., et Wickens, C. D. (2007). Pilots’ monitoring strategies and performance on automated flight decks : An empirical study combining behavioral and eye-tracking data. *Human factors*, 49(3) :347–357.
- Scannella, S., Causse, M., Chauveau, N., Pastor, J., et Dehais, F. (2013). Effects of the audiovisual conflict on auditory early processes. *International Journal of Psychophysiology*, 89(1) :115–122.
- Shappell, S. A. et Wiegmann, D. A. (2000). The human factors analysis and classification system–hfacs. Technical report, US Federal Aviation Administration, Office of Aviation Medicine.
- Shappell, S. A. et Wiegmann, D. A. (2003). A human error analysis of general aviation controlled flight into terrain accidents occurring between 1990-1998. Technical report, Federal Aviation Administration, Washington, D.C. DOT/FAA/AM-03/4.
- Sheridan, T. B. (2016). Human–robot interaction : status and challenges. *Human factors*, 58(4) :525–532.
- Sivak, M. et Flannagan, M. J. (2003). Flying and driving after the september 11 attacks. *American Scientist*, 91(1) :6–8.
- Spitzer, C. R. (2016). *Avionics : Elements, software and functions*. CRC Press.
- Stanton, N. A., Stewart, R., Harris, D., Houghton, R. J., Baber, C., McMaster, R., Salmon, P., Hoyle, G., Walker, G., et Young, M. S. (2006). Distributed situation awareness in dynamic systems : theoretical development and application of an ergonomics methodology. *Ergonomics*, 49(12-13) :1288–1311.



- van de Merwe, K., van Dijk, H., et Zon, R. (2012). Eye movements as an indicator of situation awareness in a flight simulator experiment. *The International Journal of Aviation Psychology*, 22(1) :78–95.
- Vine, S. J., Uiga, L., Lavric, A., Moore, L. J., Tsaneva-Atanasova, K., et Wilson, M. R. (2015). Individual reactions to stress predict performance during a critical aviation incident. *Anxiety, Stress, & Coping*, 28(4) :467–477.
- Walker, G. H. et Stanton, N. A. (2017). *Human factors in automotive engineering and technology*. CRC Press.
- Wickens, C. D. et Alexander, A. L. (2009). Attentional tunneling and task management in synthetic vision displays. *The International Journal of Aviation Psychology*, 19(2) :182–199.
- Wickens, C. D. et Carswell, C. M. (1995). The proximity compatibility principle : its psychological foundation and relevance to display design. *Human factors*, 37(3) :473–494.
- Wiener, E. L. (1981). Complacency : Is the term useful for air safety. In *Proceedings of the 26th Corporate Aviation Safety Seminar*, volume 117.
- Wiener, E. L. et Curry, R. E. (1980). Flight-deck automation : Promises and problems. *Ergonomics*, 23(10) :995–1011.
- Wilson, J. R. (1998). *The effect of automation on the frequency of task prioritization errors on commercial aircraft flight decks : an ASRS incident report study*. PhD thesis, Oregon State University.
- Woods, D. D., Johannesen, L. J., Cook, R. I., et Sarter, N. B. (1994). Behind human error : Cognitive systems, computers and hindsight. Technical report, Dayton University Research Institute.



## CHAPITRE 2

# *La performance humaine en situation multitâche*

<b>1 Les limites architecturales de l'opérateur humain</b> .....	24
1.1 L'hypothèse d'un canal unique .....	25
1.2 La théorie d'une ressource unitaire .....	27
1.3 La théorie des ressources multiples .....	31
1.4 Les modèles computationnels de la performance multitâche .....	34
<b>2 Le contrôle en situation multitâche</b> .....	36
2.1 Mises en évidence du contrôle .....	37
2.2 Unité et diversité du contrôle .....	39
<b>3 La priorisation comme dimension évaluative du contrôle</b> .....	44
<b>4 Conclusion</b> .....	46

Dans le présent chapitre, nous passerons en revue un ensemble de travaux portant sur la performance humaine en situation multitâche. Cette revue permettra de mettre en perspective l'ensemble des limitations de traitement de l'information qui pèsent sur l'activité des opérateurs en situation complexe. Nous verrons, en outre, que face à la densité de ces situations, les opérateurs disposent de processus de contrôle qui leur permettent de limiter, voire dépasser les effets délétères d'une activité multitâche sur leur performance. Enfin, nous montrerons que la *priorisation*, en tant que processus cognitif, pourrait permettre de comprendre pourquoi et comment ce contrôle est orienté : vers quelle tâche, quel but etc.

Le terme « multitâche » désigne toute situation où l'individu doit *partager son temps* entre plusieurs tâches. Cette première définition renvoie à une multitude de situations que l'on distingue habituellement en fonction de la fréquence des permutations de tâches (Salvucci et Taatgen, 2011b). Lorsque cette fréquence est relativement élevée, on parle d'exécution *concurrente* entre



## 1.1. L'hypothèse d'un canal unique

C'est à [Telford \(1931\)](#) que l'on doit un premier travail sur le traitement concurrent de deux stimulations. Il a constaté que lorsque deux stimulations, appelant chacune une réponse, étaient séparées par un intervalle de temps (intervalle inter-stimuli, IIS) trop court (moins de 0.5 secondes), la réponse à la seconde stimulation s'en trouvait retardée, par rapport à un IIS plus élevé (1.0 seconde ou plus). Ce fait l'amena à postuler, pour le traitement de l'information, un mécanisme analogue à ce qu'est la *période réfractaire* (ou de repos) pour le système nerveux : une « période durant laquelle l'état de polarisation de la cellule [nerveuse] la rend incapable d'émettre un nouveau signal électrique » ([Roques, 1997](#)). Par exemple, dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, il était établi que chez le chien, une seconde excitation électrique du cortex moteur n'est efficace (c.-à-d., résulte en un réflexe moteur) qu'après un intervalle d'au moins 100 millisecondes ([Broca et Richet, 1897](#), cité par [Fraisse, 1957](#)).

L'idée d'une *période réfractaire psychologique* (PRP) fut raffinée par [Welford \(1952\)](#), qui formula l'*hypothèse d'un canal unique* du traitement de l'information. Selon cette hypothèse, tout traitement de l'information implique un mécanisme *central*, qui ne peut réaliser plusieurs opérations parallèlement. Non seulement toute entrée du système cognitif doit, selon cette hypothèse, « attendre » la libération du mécanisme central, dans le cas où il serait déjà impliqué dans le traitement d'une autre stimulation, mais encore cette attente est toujours rallongée d'une PRP incompressible, estimée à une demi-seconde. Ces premières trouvailles furent enrichies et travaillées de façon plus systématique, à travers un paradigme approprié : le protocole PRP (pour une revue, voir [Pashler, 1994](#)). Une question s'imposait alors : s'il est vrai que le traitement de l'information comporte une dimension centrale incompressible, celle-ci concerne-t-elle toutes les étapes du traitement de l'information, qui prennent place entre la stimulation et la réponse ? Ou bien correspond-elle à une étape particulière ? Et si oui, peut-on identifier laquelle ? En bref : *quelles sont les sources de limitation du traitement de l'information chez l'Homme ? S'il existe, où est son goulet d'étranglement ?*

### Une limitation précoce ?

[Broadbent \(1958\)](#), le premier, avança l'idée d'une limitation de nature précoce. En se basant sur les résultats d'expériences d'écoute dichotique ([Cherry, 1953](#), par exemple), il fit l'hypothèse d'un goulet d'étranglement perceptif. Selon cette hypothèse, tous les stimuli – ainsi que leurs dimensions physiques (localisation, intensité etc.), entreraient d'abord dans un tampon (*buffer*) sensoriel, où ils seraient analysés en parallèle et rendus disponibles à

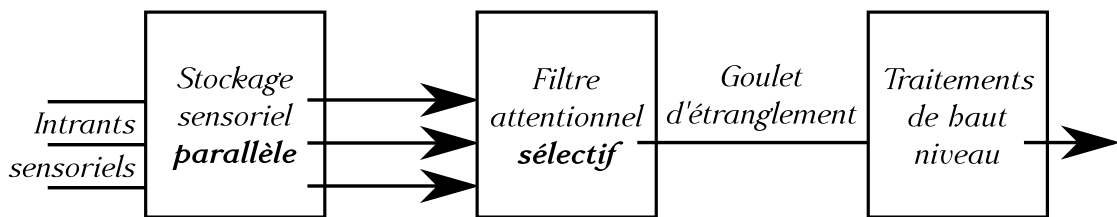


Figure 2.2 – Le modèle du filtrage attentionnel de Broadbent (1958)

un filtre attentionnel *sélectif*. Comme son nom l'indique, ce filtre réaliserait *une sélection* sur le matériel disponible, en fonction de ses propriétés ou encore des demandes de la tâche... sélection qui serait alors transmise à des traitements de plus haut niveau (identification, opérations perceptives), par un canal à capacité limité : un goulet d'étranglement (Figure 2.2).

Néanmoins cette hypothèse n'était pas tout à fait satisfaisante. Elle ne permettait pas d'expliquer, par exemple, pourquoi dans certaines conditions, des sujets pouvaient prendre conscience de contenus sémantiques, de flux auditifs auxquels ils ne prêtaient pas attention (Treisman, 1960). Pour rendre compte de ces limites, des auteurs ont développé des théories qui postulaient un goulet d'étranglement plus *tardif* – advenant en fait, non pas avant, mais après l'analyse et l'identification sémantique des stimuli (Deutsch et Deutsch, 1963, par exemple). Nous présentons maintenant une théorie de la sélection *tardive* particulièrement influente : celle portant sur la sélection de la *réponse*.

### Une réponse après l'autre

Selon les théories du goulet d'étranglement de la sélection de la réponse, plusieurs stimuli peuvent être identifiés et stockés en mémoire à court terme en parallèle. En revanche, la *sélection de la réponse* (la conversion du code symbolique du stimulus en un code symbolique de la réponse) ne peut opérer que pour un stimulus à la fois (Pashler, 1984; Welford, 1967). C'est donc à ce niveau que se situerait le goulet d'étranglement. Cette théorie est soutenue, en particulier, par des résultats qui montrent que le nombre de réponses possibles affecte significativement la durée de la PRP. Par exemple, Karlin et Kestenbaum (1968) ont montré que, lorsque pour la première stimulation, le nombre d'associations stimulus-réponse (S-R) possibles augmente, cela se traduit par un allongement significatif de la PRP, pour la réaction suivante.

Toutefois, cette théorie fut, elle aussi vivement critiquée et on proposa, à la place, un goulet d'étranglement encore plus tardif, intervenant au niveau de la production du mouvement (Keele, 1973). En fait, toutes ces théories admettaient leur lot de réfutations, si bien que l'idée même d'identifier les étapes limitantes du traitement de l'information (perception, sélection de

la réponse, production de l'action) a pu paraître ambiguë et infructueuse (Allport, 1980). Par ailleurs, le découpage des différentes étapes de traitement (identification, réponse, action) pouvait paraître arbitraire, dans la mesure où d'autres découpages – plus précis – ont pu être proposés (Sanders, 1980, par exemple). De ces incertitudes, il sortit deux hypothèses alternatives, qui ont encore du crédit aujourd'hui : l'hypothèse d'une ressource unitaire (section 1.2), et l'hypothèse des ressources multiples (section 1.3).

## 1.2. La théorie d'une ressource unitaire

Les théories d'un canal unique tentaient, en fait, d'expliquer les limitations de la performance multitâche par le truchement d'un goulet d'étranglement central, forme d'entonnoir de l'information, dont il s'agissait de déterminer la place exacte dans la chaîne du traitement. Au contraire, les théories des ressources postulent que ces limitations traduisent l'existence d'une forme de « réservoir » mental, dont c'est l'allocation qui détermine la performance (Wickens, 1991, par exemple). Pour simplifier : ce n'est de ce point de vue, pas la *capacité* du canal qui compte, mais plutôt la façon dont les ressources lui sont attribuées.

Ainsi, selon les tenants d'une ressource unitaire, la performance multitâche est d'abord influencée par l'existence d'un processeur *général* (contre *spécifique*), aux capacités limitées, et qui les alloue de façon *flexible* et *continue* aux différentes tâches et étapes de traitement possibles (Meyer et Kieras, 1997). Les ressources y sont vues comme un ensemble de « réserves » mentales, qui sont – comme l'avance Kahneman (1973) :

1. **limitées**, quoique cette limite puisse varier d'un moment à l'autre, selon le niveau de vigilance ou de demande de la tâche par exemple ;
2. **divisibles**, ce qui signifie que plusieurs processus peuvent bénéficier d'un même ensemble de ressources simultanément ;
3. **contrôlables**, dans la mesure où l'agent est en mesure de les allouer de façon *préférentielle* à des unités de perception ou d'exécution. Au passage, cette question de la contrôlabilité d'un réservoir de ressources limitées et divisibles, sera plus longuement illustrée dans la section 2.2, du chapitre suivant, p.63. Elle est au cœur de la réflexion sur la priorisation. Si le contrôle et l'allocation des ressources disponibles (qu'elles soient unitaires ou multiples) n'est pas possible, il n'est pas non plus de priorisation possible, puisque celle-ci se présente d'abord comme une modulation descendante (*top-down*) de l'allocation des ressources, donc *reposant sur leur contrôle*.

De nombreux travaux ont soutenu la théorie unitaire (Moray, 1969; Navon et Gopher, 1979; Norman et Bobrow, 1975; Sperling et Doshier, 1986). Par exemple, dans une étude de 1967, Kahneman et al. ont montré que, dans un contexte de double-tâche, le niveau d'effort alloué à l'une des deux tâches pouvait être indépendant du niveau d'effort investi dans l'autre tâche. Dans leur expérimentation, on présentait aux participants des séquences auditives de chiffres (p.ex., 3816) à laquelle ils devaient répondre oralement, en incrémentant chaque chiffre (p.ex., 4927). Dans le même temps, ils réalisaient une tâche visuelle, pour laquelle ils devaient détecter une lettre-cible dans une série de lettres présentées. Alors que la dilatation de leur pupille, ainsi que leur précision à la tâche visuelle, augmentaient avec le temps, leur performance à la tâche d'incrémentation de chiffres demeurait constante. Dans la mesure où la dilatation pupillaire est un bon indicateur du niveau de vigilance, ainsi que de l'effort mental (Hess et Polt, 1964; Beatty, 1982), cela signifie que la quantité de ressources allouée à la tâche visuelle augmentait avec le temps, alors que l'effort investi dans la tâche vocale demeurait constant.

Si la théorie des ressources unitaires a beaucoup séduit par sa simplicité et son élégance, il reste qu'elle échouait à expliquer certains phénomènes. En particulier, postuler le caractère unitaire des ressources, c'était faire l'hypothèse que :

1. deux tâches interféreront<sup>1</sup>, quelles qu'elles soient, et quels que soient les dispositifs perceptifs ou effecteurs qu'elles sollicitent ;
2. l'intensité de cette interférence devrait subir les effets additifs des demandes respectives des tâches d'intérêt (Kahneman, 1973, pp. 178–179).

Or des auteurs, au premier rang desquels Wickens (1991), ont fait des observations contredisant au moins l'une de ces deux prédictions, voire les deux simultanément. Ces faits polémiques sont de quatre ordres : l'insensibilité à la difficulté, l'effet d'altération structurelle, le découplage entre structure et difficulté, et la possibilité d'un partage du temps optimal.

### **Insensibilité à la difficulté**

On parle d'insensibilité à la difficulté lorsqu'une modification de la demande d'une première tâche n'a pas d'effet significatif sur la performance

---

1. La notion d'*interférence* désigne ici un effet de détérioration de la performance, produit par l'exécution simultanée de deux tâches ou plus. Pour pouvoir dire que deux tâches interfèrent, il faut que leur concurrence (c.-à-d., leur exécution simultanée) engendre un coût de performance, pour au moins l'une des deux. On parle alors de coût de concurrence (Navon et Gopher, 1979).



à une tâche concurrente (North, 1977; McLeod, 1977). Par exemple, dans l'expérience de North (1977) les participants réalisaient une tâche principale de choix forcé, en même temps qu'une tâche secondaire qui pouvait être soit une tâche de barrage de chiffres, soit une tâche de poursuite. La difficulté de la tâche principale était manipulée. Lorsqu'elle était réalisée seule, la performance à cette tâche se dégradait à mesure que sa difficulté augmentait. En condition double-tâche, une augmentation de la difficulté de la tâche principale engendrait une diminution de la performance à la tâche secondaire de barrage mais pas à la tâche secondaire de poursuite, ce qui rentre en contradiction avec la théorie unitaire. En effet, si *unité des ressources* il y a, alors toute *augmentation* des ressources impliquées dans une tâche devrait se payer d'une *diminution* des ressources disponibles pour les tâches concurrentes, ce qui n'était manifestement pas le cas ici, lorsque la tâche secondaire était la tâche de poursuite.

### Effet d'altération structurelle

On parle d'altération structurelle à deux conditions : (a) lorsque la performance à une tâche est influencée par une modification de la demande structurelle de la tâche concurrente (p.ex., modalité de réponse), (b) sans que cette modification n'entraîne une altération de la performance à cette dernière. Par exemple, dans l'expérience de McLeod (1977), les participants réalisaient simultanément une tâche secondaire de poursuite (visuo-manuelle) et une tâche principale de discrimination auditive. La modalité de réponse pour cette dernière tâche, pouvait être manuelle ou vocale – ce qui n'avait aucune influence sur sa difficulté (b). En revanche, l'interférence de cette tâche sur la tâche secondaire était bien moins prononcée lorsqu'une réponse *vocale* était demandée. Ce genre d'observations viole nettement les deux prédictions corollaires de la théorie unitaire. D'autres résultats similaires furent obtenus, en modifiant comme ici, la modalité de réponse de la tâche principale (Wickens, 1980), la modalité des stimuli (Treisman et Davies, 1973) ou encore le *codage des représentations mentales* (verbal ou visuo-spatial, voir encadré 2.1 ; Wickens et al., 1983).

### Découplage structure/difficulté

Parfois, l'effet de la structure est si fort, qu'il a plus d'effet sur l'interférence entre les deux tâches, que la difficulté elle-même : et, bien que ce soit contre-intuitif, une tâche principale plus difficile peut engendrer une interférence moindre (Wickens, 1991). C'est ce qu'a pu observer Wickens (1976). Dans l'expérience proposée, les participants réalisaient une tâche secondaire de

**Encadré 2.1 – Le codage des représentations mentales**

L'expression *codage des représentations mentales* renvoie à l'idée que, pour pouvoir être traitée comme information, toute stimulation doit passer par une phase d'*encodage*. Par définition, l'encodage correspond à la transcription d'une donnée d'un format à l'autre. Dans le domaine mental, on considère généralement que deux formats-cibles co-existent : le format *visuo-spatial* et le format *verbal* : c'est la théorie du double-encodage (Paivio, 1990). On retrouve, d'ailleurs, le même type de distinction dans le modèle de la mémoire de travail (MDT) de Baddeley (2003) ou encore dans le modèle des ressources multiples de Wickens (2002) que nous présenterons un peu plus loin. Toutefois, notons qu'il existe des théories alternatives du codage, comme la *théorie du codage commun* (Prinz, 1990).

poursuite (visuo-manuelle) et une tâche principale de discrimination auditive ou de génération de force. Alors que les sujets ont rapporté, de façon unanime, la moindre difficulté de la tâche de génération de force, celle-ci entraînait pourtant une interférence plus grande avec la tâche principale de poursuite. Là encore, la théorie unitaire aurait prédit que la moindre sollicitation des ressources disponibles pour la tâche de génération de force, aurait dû s'accompagner, non pas d'une diminution, mais d'une augmentation de la performance pour la tâche de poursuite, dans la mesure où plus de ressources étaient théoriquement disponibles.

**Partage optimal du temps**

Les effets d'altération structurelle ainsi que le découplage potentiel entre structure et difficulté peuvent même favoriser un *partage optimal du temps* : soit une situation dans laquelle les deux tâches n'interfèrent pas entre elles (Wickens, 1991). Par exemple, Greenwald et Shulman (1973) ont montré qu'il était possible d'« éliminer » l'effet PRP en rendant les associations S-R compatibles au plan idéo-moteur (p.ex., répéter un mot entendu ; pointer un emplacement du doigt). Les auteurs en ont conclu que l'effet PRP était principalement dû à un mécanisme à capacité limitée, qui opère la traduction d'un stimulus encodé en un codage de réponse, et qui n'est pas nécessaire dès lors que cette compatibilité idéomotrice existe. Ce travail a été répliqué plus récemment (Greenwald, 2003, mais voir Lien et al., 2005 pour une controverse sur la notion de compatibilité idéo-motrice).

Quoiqu'il en soit, l'existence de ces phénomènes remettait fondamentalement en question l'existence exclusive d'un phénomène unitaire, dans l'expli-

cation des modulations de la performance humaine en situation multitâche. C'est de ces limites que la théorie des ressources multiples est née.

### 1.3. La théorie des ressources multiples

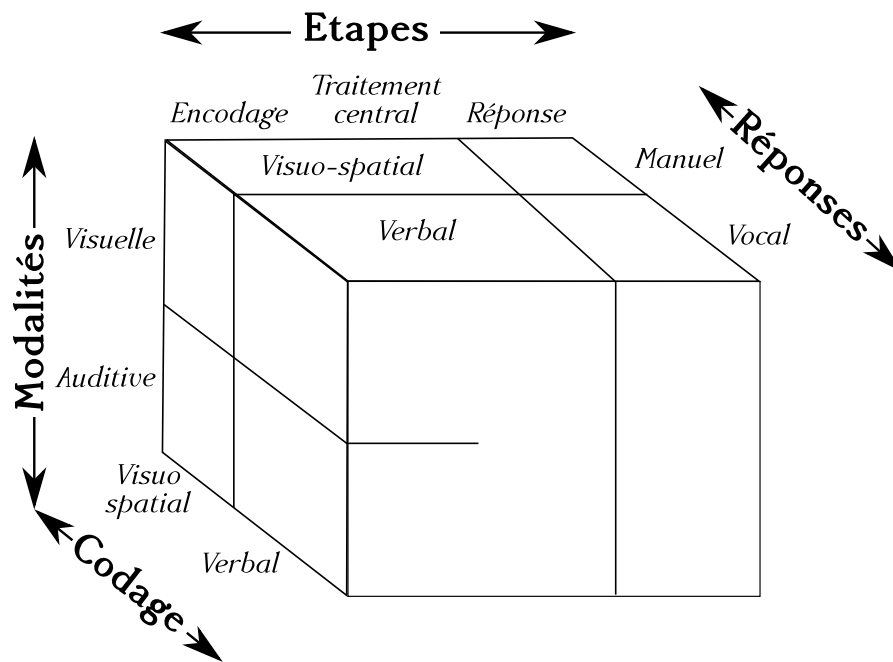
Selon la théorie des ressources multiples, le traitement de l'information dispose de *plusieurs* ensembles de ressources. Chaque ensemble dispose de ses propres *capacités*, qui sont, ici aussi, *variables, divisibles et contrôlables* (Navon et Gopher, 1979). De ce point de vue, si deux ou plusieurs tâches sollicitent un même ensemble de ressources, alors celles-ci peuvent être divisées et allouées à ces tâches, en fonction de leurs niveaux de demande respectifs. Ainsi, de ce point de vue, ces tâches sont réalisables simultanément, quoique le *partage* des ressources pourra entraîner une dégradation de la performance. À l'opposé, si deux tâches ne sollicitent pas le même ensemble de ressources, celles-ci devraient, théoriquement, pouvoir être réalisées simultanément, sans qu'il en coûte sur le plan de la performance (pas d'interférence).

Le problème ici est le suivant. Dès lors que l'on suppose l'existence de plusieurs ensembles de ressources, la question est : quels sont ces ensembles ? et comment les identifier ?

#### La taxonomie de Wickens (1991)

La taxonomie la plus classique, pour appréhender les différents ensembles de ressources est sans nul doute celle proposée par Wickens (1991). Selon cette taxonomie, l'indépendance des ressources est fonction de trois dimensions, que sont l'*étape de traitement*, le *codage* mental sollicité, et la *modalité de traitement* (Figure 2.3). Pour chacune de ces dimensions, diverses modalités sont proposées, qui correspondent à autant d'ensembles de ressources théoriquement indépendants.

1. **L'étape de traitement** : cette première dimension ségrègue deux ensembles de ressources. Un premier ensemble correspond à l'étape *perceptivo-cognitive* du traitement ; le second à l'étape de la *réponse*. Ainsi deux tâches interféreront d'autant plus qu'elles concernent toutes deux l'une de ces deux étapes ;
2. **Le codage mental** : de la même façon, le codage mental comporte deux modalités que sont le codage *verbal* et le codage *visuo-spatial* (Paivio, 1990). Deux tâches interféreront donc d'autant plus qu'elles sollicitent un même codage. Par exemple, devoir retenir une série de lettres et, dans le même temps, effectuer des calculs mathématiques, sont deux tâches qui sollicitent un codage verbal et interfèrent, de ce fait, plus fortement



**Figure 2.3** – Représentation schématique de la structure des ressources multiples du système de traitement humain. Chaque ligne traversant une face du cube représente une séparation entre deux ensembles de ressources. Tiré et traduit de Wickens (1991)

(ce qui est, d'ailleurs, la situation initiale de toute tâche d'empan avec opérations ; Turner et Engle, 1989; Unsworth et al., 2005);

3. **La modalité de traitement** : enfin, la théorie avance aussi des séparations attribuables aux diverses modalités de traitement, tant au niveau sensoriel (visuel *ou* auditif) qu'au plan de la réponse (vocale *ou* manuelle). Là encore, deux tâches interféreront d'autant moins qu'elles solliciteront des modalités sensorielles ou de réponse distinctes. Par exemple, une tâche impliquant un traitement sensoriel *auditif* et une réponse *vocale*, interférera peu avec une tâche sollicitant un traitement *visuel* et une réponse *manuelle*.

Finalement, la théorie des ressources multiples, en postulant l'existence d'ensembles de ressources indépendants, parvient à expliquer certains phénomènes comme l'insensibilité à la difficulté, l'altération structurelle, le découplage entre structure et difficulté, mais encore la possibilité d'un partage du temps optimal (*perfect time sharing*; Schumacher et al., 2001). La théorie se présente comme une extension de la théorie unitaire, reprenant à son compte les propriétés que celle-ci confère aux ressources (quantifiables, limitées, divisibles, variables, contrôlables), mais avançant tout de suite leur caractère multiple. Cette hypothèse fut par ailleurs renforcée par des observations

d'ordre neurophysiologique ou neuroanatomique. Par exemple, [Kinsbourne et Hicks \(1978\)](#) ont montré que deux tâches montraient une interférence moindre lorsqu'elles n'impliquaient pas préférentiellement le même hémisphère cérébral. Certains auteurs ont avancé que ce phénomène pouvait être soutenu par une spécialisation fonctionnelle des deux hémisphères cérébraux, lesquels soutiendraient chacun, un type de codage particulier (visuo-spatial contre verbal) et, par là même, se présenteraient comme le pendant neuroanatomique de l'existence de ressources multiples (p.ex., [Friedman et Polson, 1981](#)). Dans une expérience de 1986, [Liederman](#) a par exemple montré que, lorsque deux tâches simples et similaires sont présentées séparément, chacune dans un champ visuel (gauche contre droite), l'interférence est moins importante que lorsqu'elles sont présentées dans la même champ visuel (l'une au-dessus de l'autre). Là encore, les auteurs en concluent l'existence de deux ensembles de ressources indépendants, correspondant à la distinction neuroanatomique des deux hémisphères cérébraux.

Malgré son pouvoir prédictif, la théorie des ressources multiples a suscité de vives critiques. En effet, la théorie ne comporterait pas de principes suffisamment contraignants pour l'empêcher de *tout expliquer* ([Neumann et al., 1987](#)). Comme le rappelle [Kantowitz \(1987\)](#), une bonne théorie doit pouvoir être *testée*, et par conséquent, doit pouvoir être *réfutable* ([Popper, 1973](#)). Or de ce point de vue, la faiblesse de la théorie des ressources multiples provient de ce qu'il est toujours possible de lui adjoindre une ressource supplémentaire, dès lors qu'elle échoue à rendre compte de certains phénomènes. Autrement dit, la possibilité de raffiner la théorie sans limite, reviendrait à lui conférer un nombre illimité de degrés de liberté – et rendrait donc la théorie irréfutable. [Wickens \(1987\)](#) s'en est défendu en invoquant les points suivants. Tout d'abord, la théorie des ressources multiples ne s'autorise pas à définir une quantité illimitée de ressources, mais au contraire, cherche à en identifier un nombre minimal. De ce point de vue, c'est donc une théorie *moins parcimonieuse* que la théorie d'une ressource unitaire, mais qui, néanmoins, *tend à la parcimonie*. De plus, les ressources ne se présentent pas simplement comme le négatif des performances observées, mais correspondent aussi à une certaine organisation du substrat neuroanatomique. Par exemple, comme nous l'avons évoqué plus haut, la dichotomie entre processus verbal et spatial correspond (au moins partiellement) à la dichotomie entre les deux hémisphères cérébraux. Enfin, l'auteur a aussi rappelé que l'existence de la théorie des ressources multiples était tout simplement due à l'impossibilité pour une théorie plus parcimonieuse, qu'est la théorie d'une ressource unitaire, d'expliquer certains des phénomènes observés en contexte de double-tâche (p.28). Autrement dit, malgré son fondement circulaire, la notion de ressources serait acceptable dans

la mesure où elle permet d'expliquer et prédire une quantité importante de faits empiriques (Navon, 1984).

#### 1.4. Les modèles computationnels de la performance multitâche

Sur la base des nombreuses théories que nous avons présentées dans ce chapitre, certains auteurs ont tenté d'élaborer des modèles cognitifs précis de la performance multitâche. Ces modèles allaient du multitâche concurrent (Meyer et Kieras, 1997) au multitâche séquentiel (Altmann et Trafton, 2007), en passant par les permutations de tâches (*task switching*; Monsell, 2003). À chaque fois, ces modèles devaient permettre de prédire la *quantité* d'interférence entre deux tâches ou plus. Récemment, Salvucci et Taatgen (2008) ont proposé une nouvelle théorie du comportement multitâche, la *Threaded cognition*, tentant d'intégrer l'ensemble des connaissances développées dans les trois domaines cités.

Dans la théorie de la *Threaded cognition*, les tâches à réaliser peuvent solliciter des *modules* distincts : un module visuel ; un module d'opérations manuelles ; un module d'intentions, chargé de gérer les buts ; un module déclaratif, chargé des opérations en mémoire déclarative ; et enfin un module imaginal, chargé du maintien d'une représentation du/des but(s) et de l'information occurrente (comme le réalise la mémoire de travail Anderson, 2009). Ces modules peuvent opérer en parallèle, mais ont un fonctionnement sériel en eux-mêmes (voir le modèle ACT-R ; Anderson, 2009). En raison de cette sérialité, chaque module ne peut être impliqué que dans une opération à la fois, quoique différents modules puissent opérer en parallèle. Ce double principe – de sérialité *intra*-module, et de parallélisme *inter*-modules – est, selon la théorie, valable en toute situation, monotâche comme multitâche. Dans le domaine du multitâche, la théorie avance que, bien que plusieurs tâches peuvent être actives simultanément, chaque module particulier ne peut être utilisé que pour une opération à la fois, compte tenu sa dynamique sérielle. Par exemple, si deux tâches sollicitent le module visuel simultanément, seule l'une d'entre elles pourra être traitée, l'autre devant attendre la libération du module (visuel). Bien sûr, le cas du système visuel est le plus évident : nul ne peut regarder à deux endroits simultanément. Toutefois, la théorie postule que ce mécanisme élémentaire concerne tous les modules, y compris les modules *centraux*, comme le module déclaratif. Par exemple, si deux tâches requièrent une récupération mnésique simultanément, l'une des deux tâches devra attendre que l'opération de récupération soit achevée pour l'autre tâche. D'autre part, la *Threaded cognition* postule que, dès lors que deux tâches

sollicitent des modules distincts, ces derniers pourront être opérés en parallèle, sans qu'aucune interférence en résulte.

Pour résumer les modèles que nous venons de présenter, on peut dire qu'ils peuvent se voir regroupés en quatre familles :

- A. **Modèles structurels** : ces modèles soutiennent l'idée qu'en situation complexe, la performance est primordialement limitée par la capacité d'un ou plusieurs mécanismes de traitement. Ces modèles supposent un goulet d'étranglement central, affectant la réalisation de toute tâche très demandeuse (Broadbent, 1958; Welford, 1967).
- B. **Modèles d'une ressource unitaire** : ces approches postulent l'existence d'une ressource centrale et unitaire de traitement. Ici, une diminution de la performance est interprétée comme une allocation *insuffisante* de la ressource centrale. C'est typiquement le cas dans des paradigmes de double-tâche : lorsque la ressource accordée à une tâche secondaire est insuffisante au regard de sa demande (Kahneman, 1973; Norman et Bobrow, 1975).
- C. **Modèles des ressources multiples** : ces modèles proposent que l'opérateur humain dispose de plusieurs mécanismes de traitement, qui ont chacun une capacité propre (Navon et Gopher, 1979; Wickens, 1991). Dans ce cadre, la performance est principalement conditionnée par la mesure dans laquelle les tâches actives sollicitent des ensembles communs de ressources.
- D. **Modèles computationnels** : enfin, des modèles plus récents, notamment la *Threaded cognition* (Salvucci et Taatgen, 2008), avancent que la performance multitâche émerge d'un fonctionnement cognitif général de nature modulaire (Anderson, 2009), au sein duquel plusieurs modules (vocal, manuel, auditif etc.), qui comportent chacun un fonctionnement *sérial*, peuvent opérer en *parallèle*.

De cette partie, il ressort que le questionnement à propos de l'origine de nos limitations de traitement a reçu des réponses diverses. Alors que certains auteurs postulent et cherchent à localiser l'existence d'un goulet d'étranglement central – quelque-part dans la chaîne du traitement de l'information, d'autres ont voulu rapporter nos limites à celles de nos ressources mentales : capacité divisible et allouable du « travail » cognitif.

Toutefois, il serait incomplet de réduire notre compréhension de la performance multitâche à une description – aussi exhaustive soit-elle – de *capacités* de traitement. En effet, cette approche ne tient pas compte d'un autre fait essentiellement à l'œuvre dans ces situations : le *contrôle*. Comme l'indique Newell (1973), il est tout à fait possible d'observer, face à une seule



et même tâche, des comportements de résolution différents, d'un individu à l'autre, et la description du comportement multitâche ne peut s'épuiser dans la simple mise en relation de la nature d'une tâche, avec les capacités du traitement de l'information humain. Il y faut aussi inclure tous les processus de contrôle, par lesquels les individus déploient une méthode plutôt qu'une autre. Plus généralement, dans la mesure où toute tâche admet plusieurs modes de traitement, il faut postuler, du côté de celui qui l'exécute, une latitude de choix entre des modes divers d'exécution. Cette latitude, c'est celle du contrôle, et c'est d'ailleurs ce qu'avancait déjà la théorie des ressources unitaires (Kahneman, 1973, section 1.2, ci-dessus), en attribuant aux ressources un caractère *contrôlable*. Ainsi, dans la section suivante, nous nous proposons de passer en revue les principales théories et observations du contrôle en situation multitâche. Ce faisant nous souhaitons montrer la pertinence de la notion de priorisation, comme dimension essentielle de ce contrôle.

## 2. Le contrôle en situation multitâche

Il n'est pas possible de comprendre la performance multitâche en se contentant d'étudier les composantes du traitement cognitif (étapes, codage...) ainsi que leur éventuelle limitation (Logan, 1985). En contexte écologique par exemple, le comportement et la performance qui en découle, ne correspondent pas à la somme des traitements élémentaires de l'information. Il faut aussi tenir compte des processus de contrôle, qui soutiennent la *coordination* et la *régulation* de ces traitements. En d'autres termes, une dégradation de la performance n'est pas le signe exclusif d'une limitation de traitement, mais peut aussi s'expliquer par une défaillance du contrôle (Burgess et al., 2000; Kramer et al., 1995; Logan, 1985; Shallice et Burgess, 1991).

Le terme « contrôle », apparu au XV<sup>e</sup> siècle, résulte d'une déformation de l'expression « contre-rôle », apparue au siècle précédent, et qui désignait un registre (*rôle*) tenu en double, l'un servant à vérifier l'autre (d'où *contre*). De là le mot tire son sens de « vérification » ou de « surveillance ». Sous l'influence du terme anglais « *control* », on l'employa au XIX<sup>e</sup> siècle à propos de la vérification du bon fonctionnement d'un appareil. Par extension, le terme a ensuite été employé (XX<sup>e</sup>) pour désigner toute activité de *maîtrise*, y compris sur soi-même (*self-control*; Rey, 2011). Cette brève analyse étymologique révèle le double-sens du terme *contrôle*. Contrôler, c'est *vérifier* l'état de quelque-chose, par comparaison à un état de référence. Mais contrôler, c'est aussi *maîtriser*, c'est-à-dire modifier un état pour le rendre conforme au modèle : par exemple corriger un registre pour le rendre identique au contre-registre.

En psychologie cognitive, Richard (1990) avance que « le contrôle est



constitué par les activités qui, une fois la tâche fixée, concourent à sa réalisation sans apparaître directement dans cette réalisation » (p. 271). Autrement dit, il s'agit de l'ensemble des processus qui permettent à un individu d'évaluer et modifier son activité, en référence à un état interne : souvent la représentation mentale d'un but (Miller et al., 1960).

## 2.1. Mises en évidence du contrôle

### Le syndrome dysexécutif chez des patients cérébrolésés

L'implication du contrôle exécutif<sup>2</sup> dans la bonne tenue d'activités dynamiques et multitâches a d'abord été mis en évidence auprès de populations de patients cérébrolésés, qui montraient ce qu'on a alors appelé un *syndrome dysexécutif*. Dans l'étude de Shallice et Burgess (1991), trois patients présentant de graves lésions préfrontales, étaient confrontés à deux situations multitâches. La première situation impliquait la réalisation de six tâches relativement simples (p.ex., problème arithmétique, identification d'images...), sur une durée de 15 minutes. Les patients avaient pour but de réaliser le plus de tâches possibles, et étaient libres de planifier leur activité comme ils le souhaitaient, dans le temps imparti. La seconde situation – plus écologique – prenait place en environnement réel; les individus devaient y effectuer un ensemble de huit tâches, dont six étaient relativement simples (achats); la septième tâche consistait à se rendre à un certain endroit 15 minutes après le départ; pour la huitième, plus difficile, les sujets devaient obtenir et inscrire sur une feuille un ensemble de quatre informations (p.ex., le prix d'un kilo de pommes de terre, la météo du lendemain...). Avant le test, les trois patients passaient un ensemble de tests de mémoire et de fonctions exécutives. Pour toutes ces évaluations, chaque patient était comparé à des sujets sains, équivalents en terme de quotient intellectuel (appariement par QI).

Dans les deux situations, les trois patients montraient des niveaux de performance largement inférieurs à ceux des sujets sains. Compte tenu des résultats qu'ils avaient obtenus aux tests de mémoire et de contrôle exécutif, les auteurs ont attribué cette diminution de performance à un *syndrome dysexécutif*, plutôt qu'à de moindres capacités de traitement. Ce syndrome incluait des difficultés à établir un plan d'exécution et à le modifier; des difficultés à identifier et à utiliser des marqueurs d'action<sup>3</sup>; ainsi qu'une difficulté à

---

2. Dans le champ de la psychologie cognitive, on emploie indistinctement les expressions de « contrôle cognitif » (p.ex., Botvinick et al., 2001; Posner et al., 2004) ou de « contrôle exécutif » (p.ex., Baddeley, 1996; Brown, 1987; Miyake et al., 2000). De ce fait, nous rencontrerons ces deux expressions dans la suite de ce manuscrit.

3. Un marqueur est un message relié à un évènement, et qui indique à l'agent que

maintenir et articuler des buts. Les difficultés ne provenaient donc pas d'une moindre capacité à réaliser des traitements simples, mais bien plutôt à *gérer* leur réalisation conjointe.

### L'identification du contrôle en environnement expérimental

Dans la mesure où les processus de contrôle contribuent, tout comme les processus de traitement, à la détermination de la performance en situation complexe, il peut sembler malaisé de dissocier et identifier clairement leur contribution respective (Gopher et al., 2000). Une solution logique consiste à tenter d'identifier les variables, et les manipulations expérimentales qui ont des effets *exclusifs* sur chaque classe de phénomènes. Dans cette perspective, Gopher et al. (2000) ont conduit une série d'expérimentations, où était évaluée l'influence de diverses manipulations sur les coûts de permutations de tâches. Dans leur étude, les participants devaient traiter des séries de chiffres (p.ex., 4444444) et leur appliquer des consignes changeantes. Par exemple, les participants devaient comparer le chiffre affiché (4; tâche A) ou le nombre de chiffres de la série (7; tâche B) au chiffre 5. Il leur était aussi demandé de favoriser alternativement la précision (stratégie attentionnelle 1) *ou* la vitesse (stratégie attentionnelle 2) de leurs réponses. Chaque bloc se composait de 15 essais, au cours desquels il y avait un ou plusieurs changements à prendre en compte. Les participants pouvaient disposer de plus ou moins d'informations sur la nature des changements à venir.

Les résultats ont relevé que les coûts inhérents à ces changements (ou permutations) n'étaient pas significativement modulés par la difficulté ou la nature des tâches (A *ou* B). En revanche, ils étaient influencés par le domaine de la permutation (changer de tâche *ou* de stratégie attentionnelle), ainsi que par l'information délivrée quant à la nature de la transition, avant un bloc. Les auteurs ont avancé que ces résultats traduisaient clairement l'implication des processus de contrôle dans des activités cognitives élémentaires, et l'effet de ces processus sur certaines composantes de la performance dans une procédure PRP – dont on a longtemps pensé qu'elle n'indiquait pas autre chose que des capacités de traitement de l'information, de l'encodage à la réponse (Meyer et Kieras, 1997, voir section 1.1, plus haut).

---

l'évènement en question, est relié à une action possible. Par exemple, dans la tâche « aller chercher les enfants à 16 h », l'évènement « 16 h » est affublé d'un marqueur, il devient le signe d'une action à entreprendre (Burgess et al., 2000). En fait, un marqueur est ce qui, du point de vue psychologique, transforme un évènement en un *stimulus* : un « *agent externe, objet, évènement, aspect, changement d'aspect, susceptible d'influencer le comportement du sujet* (Piéron, 1953).

## 2.2. Unité et diversité du contrôle

Le *contrôle* est un concept d'un haut niveau de généralité, et qui embrasse une forte pluralité de fonctions et processus tels que le raisonnement verbal, la résolution des problèmes, la planification, la gestion des tâches, l'allocation des ressources, la résistance à l'interférence, la flexibilité mentale ou encore la capacité à traiter la nouveauté (Burgess et al., 2000; Damasio, 2006). Dans cette partie, nous nous attacherons donc à synthétiser ce concept protéiforme. Néanmoins il ne s'agit pas ici de faire le relevé exhaustif de toutes les théories du contrôle, mais d'avancer et articuler celles qui sont les plus éprouvées et approuvées.

Historiquement, Luria (1966) est le premier à avoir formalisé une théorie du contrôle. Selon lui, le cerveau humain se compose de trois unités fonctionnelles en interaction. La première, qui se situe dans le tronc cérébral, maintient et régule l'activité (*arousal*) du cortex. La deuxième, incluant les lobes temporal, pariétal et occipital, est responsable des processus d'encodage, de traitement, et de stockage de l'information. La troisième unité est localisée dans la région antérieure du cerveau (lobes frontaux) et soutient la *programmation*, la *vérification* et la *régulation* du comportement. Au sein de cette dernière unité, Luria (1966) considère que la partie la plus antérieure, le cortex préfrontal, agit comme une superstructure qui contrôle l'activité mentale et le comportement. En conséquence, tout dommage causé à cette aire empêcherait la mise en place de programmes comportementaux complexes ou la possibilité, pour la personne, de vérifier et réguler les résultats de son comportement, comme d'autres auteurs le constateront plus tard (Burgess et al., 2000; Shallice et Burgess, 1991).

Par ailleurs, Logan (1985) décrit le contrôle comme la capacité générale à *gérer des stratégies*, une stratégie étant elle-même définie comme « une organisation optionnelle des ressources ou des habiletés cognitives, en vue d'atteindre un certain but dans un certain environnement » (traduit de Logan, 1985). Pour lui, cette gestion constituerait un cycle incessant de quatre processus, qui sont le *choix*, l'*instanciation*<sup>4</sup>, l'*exécution* et la *désactivation* des stratégies.

Plus tard, et s'inspirant de la théorie fonctionnelle de Luria (1966), Norman et Shallice (1986) ont proposé un modèle, au sein duquel les processus de

---

4. L'instanciation (ou construction) d'une stratégie correspond, en quelque sorte, à son opérationnalisation, dans une situation donnée. Alors qu'à l'étape du choix, la stratégie est abstraite, elle devient opérationnelle, ou effective, par l'instanciation. Autrement dit une même stratégie peut être appliquée à des contextes divers, à travers des instances spécifiques de cette stratégie.

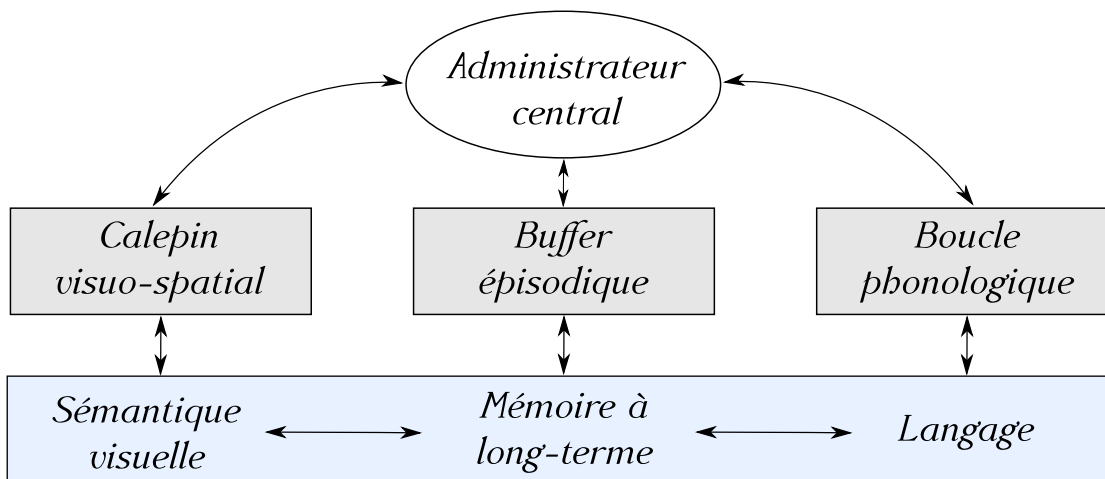
*programmation, vérification et régulation* des schémas d'action<sup>5</sup>, se déclinent en deux sous-systèmes : le gestionnaire des conflits et le système attentionnel superviseur (SAS). Le gestionnaire des conflits est responsable de l'activation rapide, et automatique de schémas d'action dans des situations routinières. Le SAS, quant à lui, soutient le traitement des situations nouvelles, pour lesquelles il n'existe pas de schémas connus. Il est ainsi capable de modifier un schéma existant, ou d'en créer un nouveau plus adapté. Pour les auteurs, l'implication du SAS serait requise dans les situations : (1) incluant la planification et la prise de décision; (2) impliquant de la résolution de problèmes; (3) où les réponses ne sont pas automatiques ou contiennent des séquences nouvelles d'actions; (4) où un risque est attendu; (5) qui requièrent le dépassement d'une réponse automatique. Cette distinction a son importance puisqu'elle permet de comprendre la différence fondamentale entre *régulation* et *contrôle*. En effet, le modèle du SAS indique qu'une large part de la régulation est soutenue par le déploiement automatique de schémas d'action pré-existants, et que le contrôle – incarné ici par le SAS – n'est qu'un moment de cette régulation, celui où les schémas d'action pré-existants ne sont pas satisfaisants. En somme, la régulation est autant soutenue par des processus automatiques que des processus contrôlés.

Le SAS a été rapproché de l'administrateur central (AC) du modèle de la mémoire de travail (MDT) de [Baddeley \(2003, voir Figure 2.4\)](#), où il assumerait des fonctions diverses. Tout d'abord, il serait en charge d'*allouer les ressources attentionnelles* entre les trois différents modules esclaves de la MDT, que sont la boucle phonologique, le *buffer* épisodique et le calepin visuo-spatial : soit en favorisant l'un de ces modules (attention focalisée), soit en partageant les ressources attentionnelles entre plusieurs modules (attention divisée). Et puis, l'AC aurait d'autres fonctions, comme la *permutation de tâches* ou l'*interfaçage avec la mémoire à long-terme*. Dans cette perspective, il est important de noter que chaque composante de la MDT admet une limitation, notamment l'AC, dont la ressource (attentionnelle) est limitée et doit donc être partagée, comme nous venons de le dire.

Par ailleurs, certains auteurs ont proposé qu'il n'existait pas réellement de distinction entre les capacités de la mémoire de travail (p.ex., l'empan de la boucle phonologique) et les capacités attentionnelles de l'AC ([Engle et Kane, 2003](#)). En fait, la capacité de rétention serait une propriété émergente de l'« attention exécutive », définie comme la capacité à maintenir actifs les schémas S-R les plus pertinents ([Miller et Cohen, 2001](#)), tout particulièrement

---

5. Les schémas d'action sont des séquences d'opérations apprises (ou programmes) qui s'appliquent à des situations spécifiques. Il peut s'agir d'opérations cognitives comme comportementales.



**Figure 2.4** – Modèle revu et corrigé de la mémoire de travail. La zone bleue correspond à des systèmes de connaissances cristallisées, alors que les zones grises représentent des systèmes fluides, sous contrôle de l'administrateur central. Figure tirée et traduite de [Baddeley \(2003\)](#)

en présence d'éléments distracteurs. Ainsi, un haut niveau de rétention refléterait d'abord une grande capacité de maintien des informations par l'AC, et non les capacités intrinsèques des divers modules esclaves de la mémoire de travail. Outre cette fonction de *maintien*, les auteurs avancent aussi que l'AC serait en charge de la résolution des conflits, entre des réponses appropriées à la tâche, et des réponses dominantes mais inappropriées (c.-à-d., l'inhibition ; voir [Kane et al., 2007](#)). Contrairement au modèle traditionnel de la MDT, ces dernières théories proposent une conception plus unitaire, dans la mesure où seule l'attention y est considérée comme une ressource à partager. Dans la continuité de ces modèles, d'autres auteurs ont cherché à mettre en évidence la dimension temporelle des opérations réalisées par la MDT. Le modèle de partage temporel des ressources (*Time-Based Resource-Sharing model* ; [Barrouillet et al., 2004](#)) suppose en effet que l'attention est une ressource unitaire, qui doit être partagée au cours du temps entre les opérations de *traitement* et les opérations de *maintien* de l'information. Dans la mesure où toute trace mnésique est amenée à décliner dès lors que l'attention n'est plus portée sur elle, la proportion de temps pendant laquelle d'autres *traitements* sollicitent la ressource attentionnelle de la MDT correspond à la force du déclin de ces traces, et donc à la difficulté de les récupérer. Dans cette perspective, le coût cognitif d'une tâche de mémoire n'est donc pas fonction d'une capacité du calepin visuo-spatial *per se*, mais plutôt fonction de la disponibilité des ressources de l'AC, sur un plan temporel.

Ainsi, les descriptions des fonctions assumées par l'AC montrent une grande diversité. Sans compter que d'autres modèles hiérarchiques du contrôle

proposent d'autres typologies. C'est le cas du modèle SRK (pour *Skill, Rule et Knowledge*) de Rasmussen et al. (1994), un modèle qui propose trois niveaux de contrôle, en fonction du niveau de familiarité que l'opérateur entretient avec la tâche (voir aussi Koechlin et al., 2003, pour un modèle anatomo-fonctionnel). Par ailleurs, Miyake et al. (2000) ont cherché à identifier les fonctions élémentaires rendant possible tout comportement de contrôle exécutif (fonctions exécutives). Pour y parvenir, ils ont déployé une approche corrélationnelle et sont parvenus à la distinction de trois fonctions élémentaires et partiellement indépendantes que sont la permutation (*switching*), l'inhibition (*inhibiting*) et la mise à jour (*updating*).

**Permutation** Il s'agit de la *capacité à changer de règle(s) de réponse, en raison d'une modification de la tâche, de la consigne, ou à l'obtention d'un résultat insatisfaisant*. La permutation a un coût temporel mesurable qui est plus fort lorsqu'elle est dirigée par les concepts (alterner entre deux règles de réponse pour des stimuli de même nature), plutôt que par des indices externes (alterner entre deux règles de réponse, en fonction de la nature des stimuli; Spector et Biederman, 1976). De la même façon, le coût de permutation est d'autant plus élevé que la nouvelle règle de réponse est plus complexe (c.-à-d., implique un nombre important d'associations S-R; Rubinstein et al., 2001).

**Inhibition** Ce terme qualifie le *processus par lequel une réponse dominante ou automatique est réprimée, en faveur d'une réponse plus pertinente*. Ce processus est prépondérant dans tous les paradigmes qui confrontent les participants à des situations inattendues (Stroop, 1935; Eriksen et Eriksen, 1974; Posner, 1980). Dans le paradigme Stroop par exemple (voir MacLeod, 1991, pour une revue), les participants doivent identifier la couleur d'un stimulus mot-couleur. Lorsque le stimulus est incongruent (p.ex., le mot rouge présenté en bleu → ROUGE), le traitement plus rapide (Frasse, 1969) et irrépressible (Posner et Snyder, 1975) du mot entre en conflit avec la réponse à donner. Le temps supplémentaire requis, pour répondre, par rapport à une situation contrôle (BLEU), est considéré comme celui de l'inhibition.

**Mise à jour** Enfin, le *contrôle repose sur la capacité du système cognitif à mettre à jour le contenu de la MDT*. Cette capacité est, par exemple, fortement impliquée dans les tâches de rang-N, où les participants entendent une série d'items (p.ex., chiffres)

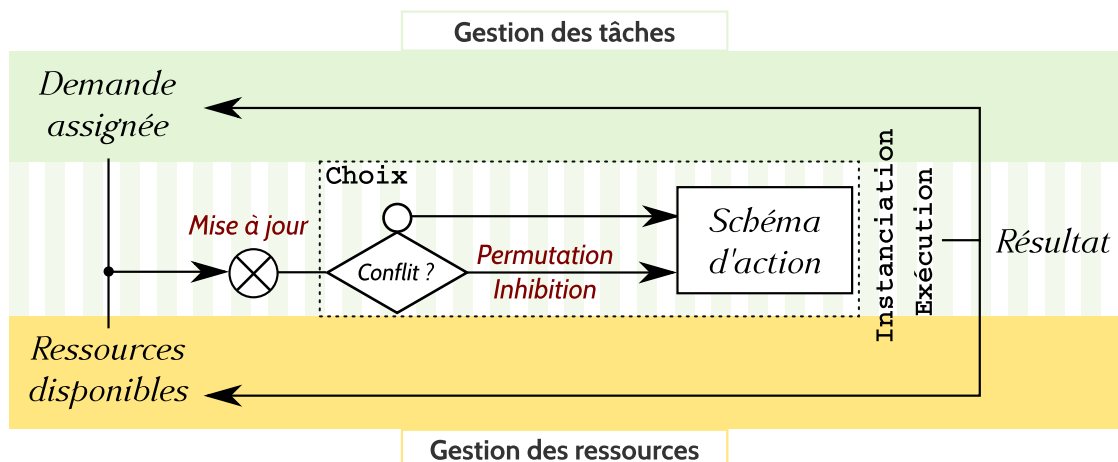


et doivent comparer chaque item avec l'item présenté N rangs avant (Owen et al., 2005). Par exemple, lors d'une tâche numérique de rang-1, les participants comparent chaque chiffre d'une série avec le chiffre précédent, et doivent signaler toute correspondance. Pour une tâche de rang-2, chaque chiffre doit être comparé à l'avant-dernier chiffre présenté, et ainsi de suite. Dès lors que N est supérieur à 1, la mise à jour en mémoire de travail est nécessaire, et la charge liée au maintien, fonction de N.

### En résumé

Au regard des éléments que nous venons de développer, il apparaît que la fonction première du contrôle cognitif/exécutif, son *enjeu général*, consiste en l'atteinte d'un but fixé, ou d'une demande assignée (p.ex., Miller et Cohen, 2001). Ceci étant dit, la notion de contrôle cognitif renvoie à tous les processus, intangibles ou manifestes, qui soutiennent cette fonction générale (Richard, 1990). La capacité de *choisir, instancier, exécuter* et *désactiver* des schémas d'action (ou stratégies; Logan, 1985) y tient un rôle central. Tout, dans la littérature du contrôle, rejoint l'idée suivante : pour une situation donnée, plusieurs schémas d'action sont possibles, et l'enjeu du contrôle consiste à chercher, définir et appliquer le schéma le plus pertinent, de façon programmatique (proactive) ou régulatrice (réactive; Braver, 2012; Luria, 1966). Ce véritable processus de *recherche* – pour reprendre l'expression de Hills et al. (2010) – repose, à son tour, sur d'autres processus esclaves. En particulier sur les fonctions exécutives de *mise à jour, inhibition* et *permutation* (Miyake et al., 2000), qui lui confèrent son caractère dynamique, et donnent la possibilité à l'agent, d'instancier rapidement les bons schémas d'action face à des données changeantes ou des événements distrayeurs. De plus, comme nous l'avons déjà montré (p.14), dans le cadre d'une situation dynamique et multitâche, tout individu se doit d'articuler deux logiques. Il doit, d'une part construire, exécuter et/ou amender une planification de tâches (gestion des tâches); mais il doit aussi, d'autre part, être en mesure d'allouer ses ressources aux différentes tâches en présence, en fonction d'un but et de l'environnement de la tâche (gestion de ressources). Or ces deux logiques entrent parfois en conflit lorsque, par exemple, la gestion des ressources ne laisse pas apparaître de *solution* pour la gestion des tâches : on parle alors de *surcharge* de travail.

Autrement dit, le contrôle renvoie à tous les processus qui concourent à la recherche des schémas d'action les plus pertinents, eu égard aux logiques internes (ressources) et externes (demande) à l'opérateur. La Figure 2.5 (p.44) illustre cette synthèse.



**Figure 2.5** – Représentation synthétique du contrôle cognitif. La mécanique de la rétroaction soutient la possibilité des processus de vérification et de régulation, par l'entremise de processus de plus bas niveaux, comme la mise à jour, la permutation ou l'inhibition.

### 3. La priorisation comme dimension évaluative du contrôle

La description que nous venons de donner du contrôle n'est pas complète. En effet, le contrôle n'est pas seulement une mécanique programmatique ou régulatrice de recherche des schémas d'action. Il y faut aussi une dimension *évaluative*. La plupart des théories se focalisent exclusivement sur la nature de l'influence que le contrôle exerce. Au contraire, on sait peu de choses sur la façon dont l'*intervention* du contrôle est, elle-même, dirigée (Botvinick et al., 2001). Par exemple, s'il est reconnu que les mécanismes de contrôle cognitif soutiennent la gestion des ressources (Kahneman, 1973; Smith et Jonides, 1999), l'agent doit pouvoir en outre évaluer, vers quelles opérations internes ou externes il déploiera ce contrôle des ressources. De la même façon, lorsque Logan (1985) avance que le choix d'un schéma d'action est une composante fondamentale du contrôle, il ne nous dit pas *comment* ce choix est opéré. Et quand bien même le but déterminerait tout, il reste que plusieurs buts sont toujours possibles et que la question du choix se pose à nouveau (Duncan, 1990). Autre exemple : si l'existence d'un processus de *permutation* de tâches est crucial, il est tout autant crucial de comprendre pourquoi, à un instant donné, ce processus sera invoqué et orienté par l'agent. Ce manque théorique est tout à fait problématique, dans la mesure où, en l'absence de plus d'explications,



une large part du contrôle est attribué à une forme d'*homoncule*<sup>6</sup>, qui sait, tout simplement, quand et comment déployer des processus de contrôle (voir [Monsell et Driver, 2000](#), pour une discussion approfondie).

Pour reprendre ce qu'en dit [Botvinick et al. \(2001\)](#), une définition du contrôle, pour être complète, doit répondre aux trois questions suivantes :

1. *Quels processus soutiennent le recrutement du contrôle ? Il n'est pas possible qu'un individu sache toujours, avant même de commencer une tâche, la mesure dans laquelle elle requiert du contrôle. [...]*
2. *Une fois que les bons processus de contrôle sont impliqués dans la performance, comment leur influence est-elle modulée ou optimisée ? Il existe de nombreuses preuves, en effet, que les ajustements du contrôle ont lieu en ligne, en réponse à des variations de la performance. [...] Pour prendre un exemple de la littérature sur l'effet Stroop, les participants tendent à montrer moins d'interférence aux essais incongruents lorsque ceux-ci sont plus fréquents que les essais congruents [...]*
3. *Quels processus déterminent quand et comment le contrôle doit « se retirer » ?*

Tiré et traduit de [Botvinick et al. \(2001\)](#)

En d'autres termes, le contrôle cognitif doit comporter un mécanisme lui permettant de reconnaître la nécessité et la modalité de son implication : un mécanisme évaluatif.

C'est à ce point précis que la notion de *priorisation* présente un intérêt. Bien que chez [Botvinick et al. \(2001\)](#), l'argumentaire de l'homoncule serve à avancer une hypothèse sur la surveillance des conflits comme initiateur du contrôle, il est possible d'appliquer le même argumentaire à d'autres phénomènes, comme la gestion des ressources. Dans les faits, l'implication du contrôle cognitif va de pair avec la gestion des ressources, dans la mesure où celui-ci comporte un coût cognitif intrinsèque ([Kool et al., 2013](#)). Dans les environnements complexes, de la même façon qu'il n'est pas possible d'allouer des ressources de façon équivalente et l'ensemble des tâches en présence ([Adams et Pew, 1990](#)), il n'est pas plus possible de contrôler, en continu, l'ensemble des tâches

---

6. Le terme homoncule (ou *homunculus*), qui signifie littéralement « petit homme », renvoie à l'existence d'une entité, à l'intérieur du système mental, qui aurait forme humaine – qui aurait, en tout cas, ses facultés. Cette hypothèse a par exemple été utilisée dans le domaine de la vision où, pour expliquer la faculté de voir, on a postulé l'existence d'une forme d'homoncule, qui regarderait les images projetées, par la lumière sur la rétine, comme un spectateur au cinéma. Le problème de ce raisonnement est évident, puisque l'existence d'un homoncule suppose une nouvelle théorie de la vision *pour l'homoncule*. Là encore il faut postuler un homoncule dans un homoncule, et dériver dans une régression logique à l'infini.

et des opérations en cours. Le contrôle cognitif, et les ressources associées, doivent donc être orientées de façon préférentielle, vers certaines opérations, au détriment des autres. Le système de traitement de l'information doit donc comporter un mécanisme, qui lui permette, à un instant donné, d'évaluer le besoin de contrôle des différentes composantes du système de travail, afin que les processus déployés correspondent aux demandes objectives des tâches du système (Kramer et al., 1995). À cette fin nous pensons que le concept de priorisation a toute sa place, et peut permettre d'enrichir notre compréhension de l'allocation stratégique des ressources (et du contrôle), en situation complexe.

## 4. Conclusion

L'homme cognitif est, pour partie, définissable par ses limites. Quelle que soit la structure (unitaire, multiple...) de ses ressources, il montre une difficulté remarquable à effectuer plusieurs tâches simultanément, sans que sa performance à chacune de ces tâches ne s'en trouve affectée. Bien que, dans certaines conditions, la structure de la tâche lui permet d'atténuer quelque peu ces effets délétères – lorsque par exemple les tâches sollicitent des ressources indépendantes chez lui, ces effets délétères s'affichent comme la règle, et non l'exception. En outre, les processus de contrôle cognitif/exécutif sur lesquels il semble s'appuyer, lui confèrent une capacité d'adaptation qui a du poids dans ces situations. Ainsi, l'opérateur n'est pas un exécutant passif, dont l'activité serait exclusivement dirigée par la demande, mais un individu capable de contrôle, c'est-à-dire capable de modifier, d'une manière adaptative, les stratégies qu'il emploie effectivement pour résoudre la complexité des situations dans lesquelles il opère. En retour, ce déploiement stratégique doit être expliqué. Par exemple, le contrôle que les opérateurs réalisent sur l'allocation de leurs ressources n'est pas hasardeux : ce n'est pas du contrôle pour du contrôle. Autrement dit, comme nous l'avons montré, le contrôle a une fin, quelque-chose qui le détermine ; ce n'est pas simplement un *homoncule* qui dirige ces processus à son gré. Comme nous venons de le dire, nous proposons que c'est la priorisation qui dirige, au premier chef, l'orientation des processus de contrôle, et notamment de contrôle des ressources. Car, comme nous allons le voir au chapitre suivant, la priorisation, pensée comme processus cognitif d'ordonnement (des tâches, des buts etc.), se présente comme un phénomène *médiateur* pertinent, une forme de *proxy* entre les buts d'un opérateur ou d'un système, et les ressources qu'il y déploie.

## Bibliographie du chapitre

- Adams, M. J. et Pew, R. W. (1990). Situational awareness in the commercial aircraft cockpit : A cognitive perspective. In *Digital Avionics Systems Conference, 1990. Proceedings., IEEE/AIAA/NASA 9th*, pages 519–524.
- Allport, D. A. (1980). Attention and performance. *Cognitive psychology : New directions*, 1 :12–153.
- Altmann, E. M. et Trafton, J. G. (2007). Timecourse of recovery from task interruption : Data and a model. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14(6) :1079–1084.
- Anderson, J. R. (2009). *How can the human mind occur in the physical universe?* Oxford University Press.
- Baddeley, A. (1996). Exploring the central executive. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology : Section A*, 49(1) :5–28.
- Baddeley, A. (2003). Working memory : looking back and looking forward. *Nature reviews neuroscience*, 4(10) :829–839.
- Barrouillet, P., Bernardin, S., et Camos, V. (2004). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology : General*, 133(1) :83.
- Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological bulletin*, 91(2) :276.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., et Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological review*, 108(3) :624.
- Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control : a dual mechanisms framework. *Trends in cognitive sciences*, 16(2) :106–113.
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. Pergamon Press.
- Broca, A. et Richet, C. (1897). Période réfractaire dans les centres nerveux. *CR Acad. Sci*, 124 :96–99.
- Brown, A. (1987). Metacognition, executive control, self-regulation, and other more mysterious mechanisms. *Metacognition, motivation, and understanding*, pages 65–116.
- Burgess, P. W., Veitch, E., de Lacy Costello, A., et Shallice, T. (2000). The cognitive and neuroanatomical correlates of multitasking. *Neuropsychologia*, 38(6) :848–863.
- Cherry, E. C. (1953). Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears. *The Journal of the acoustical society of America*, 25(5) :975–979.
- Damasio, A. R. (2006). *Erreur de Descartes (L')*. Odile Jacob.

- Deutsch, J. A. et Deutsch, D. (1963). Attention : Some theoretical considerations. *Psychological review*, 70(1) :80.
- Duncan, J. (1990). Goal weighting and the choice of behaviour in a complex world. *Ergonomics*, 33(10-11) :1265–1279.
- Engle, R. W. et Kane, M. J. (2003). Executive attention, working memory capacity, and a two-factor theory of cognitive control. *Psychology of learning and motivation*, 44 :145–199.
- Eriksen, B. A. et Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 16(1) :143–149.
- Fraisse, P. (1957). La période réfractaire psychologique. *L'Année Psychologique*, 57(2) :315–328.
- Fraisse, P. (1969). Why is naming longer than reading? *Acta Psychologica*, 30 :96–103.
- Friedman, A. et Polson, M. C. (1981). Hemispheres as independent resource system : Limited-capacity processing and cerebral specialization. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 7(5) :1031.
- Gopher, D., Armony, L., et Greenshpan, Y. (2000). Switching tasks and attention policies. *Journal of Experimental Psychology : General*, 129(3) :308–339.
- Greenwald, A. G. (2003). On doing two things at once : Iii. confirmation of perfect timesharing when simultaneous tasks are ideomotor compatible. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 29(5) :859.
- Greenwald, A. G. et Shulman, H. G. (1973). On doing two things at once : Ii. elimination of the psychological refractory period effect. *Journal of experimental psychology*, 101(1) :70.
- Hess, E. H. et Polt, J. M. (1964). Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving. *Science*, 143(3611) :1190–1192.
- Hills, T. T., Todd, P. M., et Goldstone, R. L. (2010). The central executive as a search process : priming exploration and exploitation across domains. *Journal of Experimental Psychology : General*, 139(4) :590.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall series in experimental psychology. Prentice-Hall.
- Kahneman, D., Beatty, J., et Pollack, I. (1967). Perceptual deficit during a mental task. *Science*, 157(3785) :218–219.
- Kane, M. J., Conway, A. R., Hambrick, D. Z., et Engle, R. W. (2007). Variation in working memory capacity as variation in executive attention and control. *Variation in working memory*, pages 21–48.

- Kantowitz, B. H. (1987). 3. mental workload. In Hancock, P. A., editor, *Human Factors Psychology*, chapter Advances in Psychology, pages 81–121. North-Holland.
- Karlin, L. et Kestenbaum, R. (1968). Effects of number of alternatives on the psychological refractory period. *The Quarterly journal of experimental psychology*, 20(2) :167–178.
- Keele, S. W. (1973). *Attention and human performance*. Goodyear Publishing Company.
- Kinsbourne, M. et Hicks, R. E. (1978). Functional cerebral space : A model for overflow, transfer and interference effects in human performance. *Attention and performance VII*, pages 345–362.
- Koechlin, E., Ody, C., et Kouneiher, F. (2003). The architecture of cognitive control in the human prefrontal cortex. *Science*, 302(5648) :1181–1185.
- Kool, W., McGuire, J. T., Wang, G. J., et Botvinick, M. M. (2013). Neural and behavioral evidence for an intrinsic cost of self-control. *PloS one*, 8(8) :72626.
- Kramer, A. F., Larish, J. F., et Strayer, D. L. (1995). Training for attentional control in dual task settings : A comparison of young and old adults. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 1(1) :50.
- Liederman, J. (1986). Subtraction in addition to addition : Dual task performance improves when tasks are presented to separate hemispheres. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 8(5) :486–502.
- Lien, M.-C., McCann, R. S., Ruthruff, E., et Proctor, R. W. (2005). Confirming and disconfirming theories about ideomotor compatibility in dual-task performance : a reply to greenwald (2005). *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 31(1) :226–229.
- Logan, G. D. (1985). Executive control of thought and action. *Acta Psychologica*, 60 :193–210.
- Luria, A. R. (1966). *Higher cortical functions in man*. Basic Books.
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the stroop effect : an integrative review. *Psychological bulletin*, 109(2) :163.
- McLeod, P. (1977). A dual task response modality effect : Support for multiprocessor models of attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 29(4) :651–667.
- Meyer, D. E. et Kieras, D. E. (1997). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance : Part 1. basic mechanisms. *Psychological Review*, 104(4) :3–65.
- Miller, E. K. et Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual review of neuroscience*, 24(1) :167–202.

- Miller, G. A., Galanter, E., et Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. Adams Bannister Cox.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., et Howerter, A. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks : A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41 :49–100.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3) :134–140.
- Monsell, S. et Driver, J. (2000). Banishing the control homunculus. *Control of cognitive processes : Attention and performance XVIII*, pages 3–32.
- Moray, N. (1969). *Listening and attention*. Penguin Books.
- Navon, D. (1984). Resources—a theoretical soup stone? *Psychological review*, 91(2) :216.
- Navon, D. et Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3) :214.
- Neumann, O., Heuer, H., et Sanders, A. F. (1987). Beyond capacity : A functional view of attention. *Perspectives on perception and action*, 14 :361–394.
- Newell, A. (1973). You can't play 20 questions with nature and win : Projective comments on the papers of this symposium. In *Visual Information Processing : Proceedings of the Eighth Annual Carnegie Symposium on Cognition*. Academic Press.
- Norman, D. A. et Bobrow, D. J. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7 :44–64.
- Norman, D. A. et Shallice, T. (1986). Attention to action. In *Consciousness and Self-Regulation*, pages 1–18. Springer.
- North, R. A. (1977). Task components and demands as factors in dual-task performance. Technical report, DTIC.
- Owen, A. M., McMillan, K. M., Laird, A. R., et Bullmore, E. (2005). N-back working memory paradigm : A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human brain mapping*, 25(1) :46–59.
- Paivio, A. (1990). *Mental representations : A dual coding approach*. Oxford University Press.
- Pashler, H. (1984). Processing stages in overlapping tasks : Evidence for a central bottleneck. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 10 :358–377.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks : data and theory. *Psychological bulletin*, 116(2) :220.
- Piéron, H. (1953). *Vocabulaire de la psychologie*. Presses Universitaires de France.
- Popper, K. (1973). La logique de la découverte scientifique. *Paris Payot*.

- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly journal of experimental psychology*, 32(1) :3–25.
- Posner, M. I., Snyder, C. R., et Solso, R. L. (2004). Attention and cognitive control. *Cognitive psychology : Key readings*, 205.
- Posner, M. I. et Snyder, C. R. R. (1975). Facilitation and inhibition in the processing of signals. *Attention and performance V*, pages 669–682.
- Prinz, W. (1990). A common coding approach to perception and action. In *Relationships between perception and action*, pages 167–201. Springer.
- Rasmussen, J., Pejtersen, A., et Goodstein, L. P. (1994). *Cognitive systems engineering*. New York, Wiley.
- Rey, A. (2011). *Dictionnaire historique de la langue française*. Le Robert.
- Richard, J.-F. (1990). *Les activités mentales : comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Paris : Colin.
- Roques, C.-F. (1997). *Pratique de l'électrothérapie : électrophysiothérapie pratique appliquée à la médecine physique et à la masso-kinésithérapie*. Springer Science & Business Media.
- Rubinstein, J. S., Meyer, D. E., et Evans, J. E. (2001). Executive control of cognitive processes in task switching. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 27(4) :763–797.
- Salvucci, D. et Taatgen, N. (2011). *The Multitasking Mind*. Oxford University Press.
- Salvucci, D. et Taatgen, N. A. (2008). Threaded cognition : an integrated theory of concurrent multitasking. *Psychological Review*, 115(1) :101–130.
- Sanders, A. F. (1980). 20 stage analysis of reaction processes. *Advances in Psychology*, 1 :331–354.
- Schumacher, E. H., Seymour, T. L., Glass, J. M., Fencsik, D. E., Lauber, E. J., Kieras, D. E., et Meyer, D. E. (2001). Virtually perfect time-sharing in dual-task performance : Uncorking the central cognitive bottleneck. *Psychological Science*, 12(2) :101–108.
- Shallice, T. I. M. et Burgess, P. W. (1991). Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. *Brain*, 114(2) :727–741.
- Smith, E. E. et Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283(5408) :1657–1661.
- Spector, A. et Biederman, I. (1976). Mental set and mental shift revisited. *The American Journal of Psychology*, pages 669–679.
- Sperling, G. et Doshier, B. A. (1986). *Strategy and optimization in human information processing*, chapter 2, pages 1–65. Citeseer.

- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of experimental psychology*, 18(6) :643.
- Telford, C. W. (1931). The refractory phase of voluntary and associative response. *Journal of Experimental Psychology*, 14 :1-35.
- Treisman, A. M. (1960). Contextual cues in selective listening. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 12(4) :242-248.
- Treisman, A. M. et Davies, A. (1973). Divided attention to ear and eye. *Attention and performance IV*, pages 101-117.
- Turner, M. L. et Engle, R. W. (1989). Is working memory capacity task dependent? *Journal of memory and language*, 28(2) :127-154.
- Unsworth, N., Heitz, R. P., Schrock, J. C., et Engle, R. W. (2005). An automated version of the operation span task. *Behavior research methods*, 37(3) :498-505.
- 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 :2-19.
- Welford, A. T. (1967). Single-channel operation in the brain. *Acta psychologica*, 27 :5-22.
- Wickens, C. D. (1976). The effects of divided attention on information processing in manual tracking. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 2(1) :1.
- Wickens, C. D. (1980). The structure of attentional resources. *Attention and performance VIII*, 8 :239-257.
- Wickens, C. D. (1987). 2. attention. In Hancock, P. A., editor, *Human Factors Psychology*, chapter Advances in Psychology, pages 29-80. North-Holland.
- Wickens, C. D. (1991). Processing resources and attention. *Multiple-task performance*, 1991 :3-34.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2) :159-177.
- Wickens, C. D., Sandry, D. L., et Vidulich, M. (1983). Compatibility and resource competition between modalities of input, central processing, and output. *Human factors*, 25(2) :227-248.



## CHAPITRE 3

# *Les fondements de la priorisation*

<b>1 Une réponse adaptative à la simultanéité</b> .....	53
<b>2 Les manifestations empiriques de la priorisation</b> .....	57
2.1 Sur la planification des tâches .....	58
2.2 Sur l'allocation des ressources .....	63
<b>3 Les modèles de la priorisation</b> .....	76
3.1 La priorité attentionnelle des stimuli .....	78
3.2 La priorité des stratégies computationnelles .....	79
3.3 Des attributs des tâches à leur priorité .....	81
3.4 Un mécanisme métacognitif? .....	89
<b>4 Conclusion</b> .....	91

Dans le présent chapitre, nous nous attacherons à répondre à trois questions fondamentales à propos de la priorisation : *pourquoi*, *quoi* et *comment*. Tout d'abord, quelle est la fonction de la priorisation, quel est son rôle? Autrement dit : *pourquoi* ce processus existe-t-il? Et puis, quelles sont ses conséquences les plus visibles : par *quoi* la priorisation se manifeste-t-elle empiriquement? Enfin, quels sont les processus de traitement de l'information qui peuvent permettre d'expliquer *comment* fonctionne la priorisation? Ces trois questions feront l'objet des sections respectives de ce chapitre. Comme ces questions sont liées, ce découpage a avant tout vocation à structurer la revue.

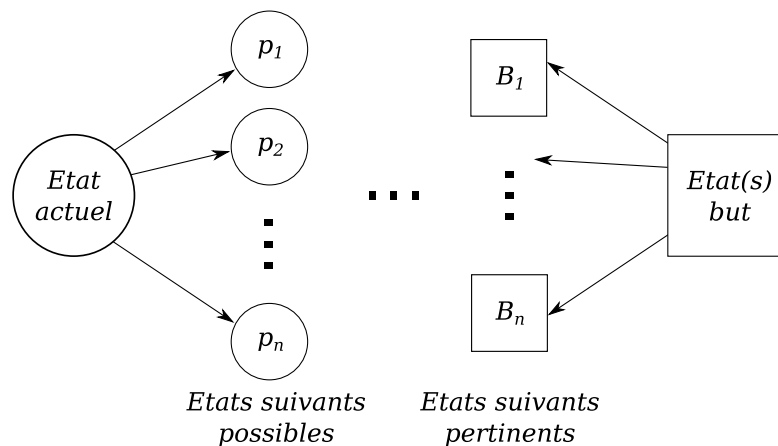
## **1. La priorisation comme réponse adaptative à la simultanéité**

S'il est un point sur lequel les auteurs s'accordent à propos de la priorisation, c'est sur sa fonction. En effet, pour eux, la capacité à établir des priorités n'a de sens que parce qu'il existe, dans le rapport qu'un opérateur

entretient avec son environnement, un *problème potentiel de simultanété* (Kurzban et al., 2013). Dans le domaine naturel par exemple, l'animal en recherche de nourriture ne peut pas *visiter* deux localisations simultanément, et se trouve logiquement en position de choix, dès que deux alternatives ou plus se présentent.

Chez l'Homme, comme chez l'animal, la même question de la *simultanété* se pose, et la partie précédente a bien montré l'étendue de ses limitations de traitement de l'information. Prenons l'exemple du regard. La fovéa prodigue une grande acuité visuelle, mais ne peut simultanément se porter sur toutes les zones du champ visuel. Autrement dit, la focalisation visuelle a un caractère exclusif : focaliser son regard sur telle partie du champ visuel empêche tout autre possibilité de focalisation ouverte. La même chose peut être dite de la mémoire de travail. Un nombre limité de données peut être maintenu en mémoire de travail (Miller et Cohen, 2001), exigeant nécessairement des décisions à propos de *ce qui est maintenu*. Ainsi le problème de la simultanété est aussi permanent que l'est l'exigence de choisir. C'est ainsi que Duncan (1990) le formule élégamment, dans le domaine de la résolution des problèmes. Après avoir rappelé le rôle joué par les *buts* dans la détermination du comportement humain (Miller et al., 1960), il pose immédiatement la question suivante : dans la mesure où plusieurs buts ou sous-buts sont souvent disponibles, « comment le système [cognitif] sélectionne-t-il les états-but qui dirigeront le comportement momentanément ? » (traduit de Duncan, 1990, p.1265). Et, sitôt cet état-but sélectionné, l'opérateur doit encore être en capacité de sélectionner la stratégie la plus pertinente, parmi toutes les stratégies possibles. Pour ce faire, l'auteur avance que tout individu doit être en capacité de discriminer les différentes stratégies qui s'offrent à lui, en leur attribuant un *poids* – que nous dénommerons *priorité* par la suite. Ce phénomène de *pondération* (ou *priorisation*) peut être symbolisé par un complexe, composé de deux états – l'état *actuel* et l'état *but* – entre lesquels l'individu cherche à sélectionner le meilleur « chemin » possible. Dans le champ de la résolution de problèmes, ce complexe s'est vu donner le nom d'« espace-problème », soit l'ensemble des états (sous-buts) successifs possibles entre un état actuel et un état but/cible (Figure 3.1). Pour Duncan (1990), le poids de chaque état dépend de la concordance entre ce qui est possible (vu l'état actuel) et ce qui est souhaitable (vu l'état but), ainsi que d'autres attributs, comme la familiarité ou la complexité du « chemin », par exemple.

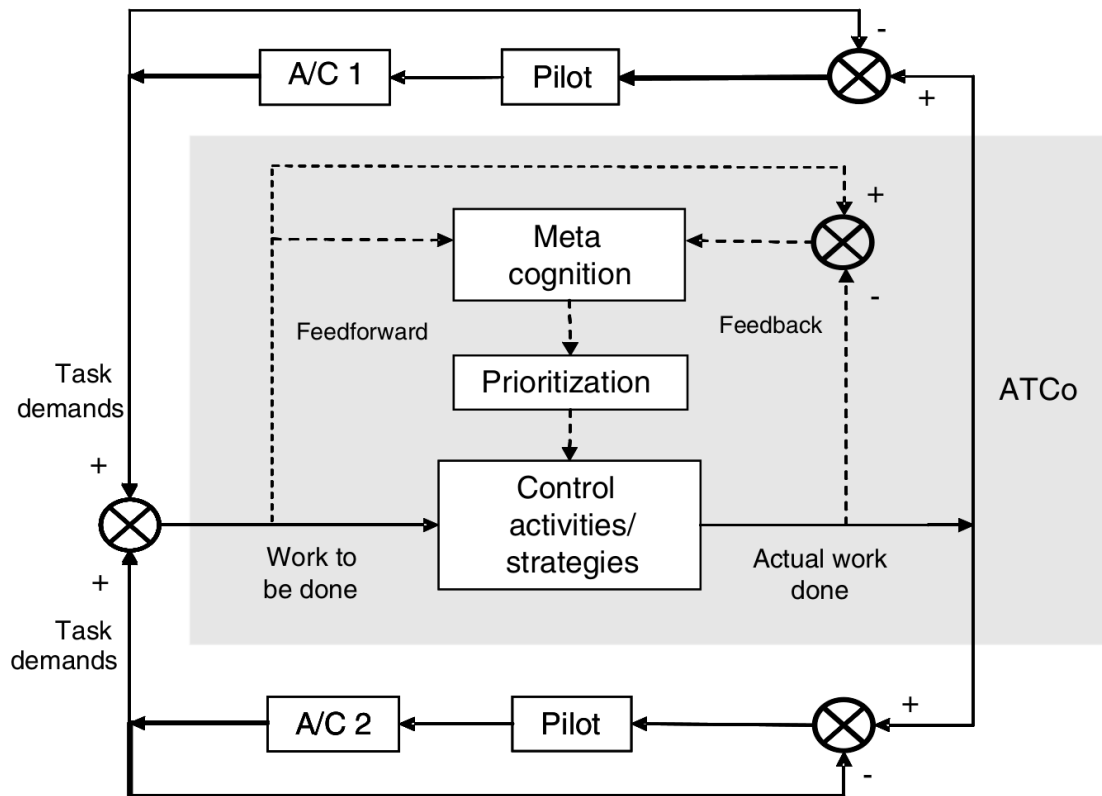
Pour Freed (2000), la priorisation est avant tout un phénomène *réactif*. L'auteur avance en effet, que la fonction première de la priorisation est de soutenir la *gestion* de la surcharge de travail. La *gestion*, c'est-à-dire la réduction, si possible, des coûts liés au non-respect d'une échéance – lorsque,



**Figure 3.1** – Représentation schématique de l'espace problème. Le choix est dirigé par une concordance, entre l'activation des états possibles ( $p_i$ ) reliés à l'état actuel, et l'activation des états pertinents ( $B_i$ ) reliés à l'état but. De plus, le poids de chaque état peut être modulé par des attributs comme sa familiarité, ou encore sa complexité. Adapté et traduit de [Duncan \(1990\)](#)

par exemple, le recouvrement des ressources sollicitées par plusieurs tâches différentes met en péril leur réalisation. Dans de telles situations, prioriser, c'est évaluer les poids respectifs des différentes tâches disponibles, pour biaiser la séquence de leur exécution (planification), dans la perspective de réaliser, *prioritairement*, les tâches les plus importantes. Il s'agit donc d'un processus *réactif*, à deux titres. Premièrement puisque, d'un point de vue normatif, un tel mécanisme ne devrait intervenir qu'en situation de surcharge de travail. Secondement parce qu'un tel mécanisme doit pouvoir – au sein d'un environnement dynamique – *réagir* à la survenue d'un évènement inattendu, pouvant nécessiter la modification complète du plan d'action. De ce point de vue, la *priorisation* est donc essentielle à la flexibilité exécutive, puisque par elle, une opération urgente et inattendue doit pouvoir outrepasser les autres.

De la même façon, mais en utilisant la terminologie de l'ergonomie, [Loft et al. \(2007\)](#) soutiennent que le processus de *priorisation* est au cœur de la régulation des activités et des stratégies (Figure 3.2). À la différence des travaux précédents, ces auteurs ne donnent pas à la priorisation la fonction de « gérer la surcharge de travail ». Pour eux, la surcharge n'est *qu'une situation parmi d'autres*, à l'occasion de laquelle les opérateurs peuvent être amenés à réviser les priorités des buts qu'ils poursuivent. Mais les priorités sont toujours présentes, et modulent en continu la façon dont les opérateurs régulent leur activité. On retrouve cette idée chez [Salvucci et Taatgen \(2011b\)](#), pour qui la priorisation est un processus métacognitif de planification des tâches ; même chose chez [Funk \(1991\)](#) ou [Adams et Pew \(1990\)](#), qui expliquent



**Figure 3.2** – Modèle de l'activité des contrôleurs du trafic aérien (ATCo). La régulation (ou le contrôle) dépend des demandes entrantes, ainsi que des priorités de divers buts (sécurité, ordre, rapidité). Tiré de Loft et al. (2007, p.380)

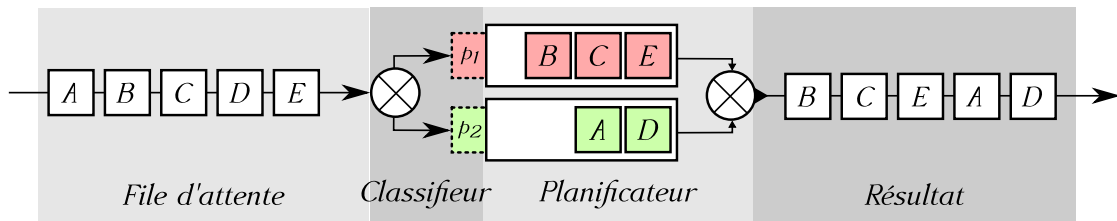
que, dans le cockpit, c'est d'abord la priorité intrinsèque des buts et sous-but qui détermine la planification des tâches ainsi que l'allocation des ressources (voir aussi Jonsson et Ricks, 1995). En d'autres termes, pour tous ces auteurs, la *priorisation* n'est que la *dimension évaluative* (voir Botvinick et al., 2001) d'un processus de contrôle qui ne s'arrête jamais. De plus, l'activité déployée ne peut pas s'expliquer uniquement par les demandes à satisfaire et les ressources disponibles. En effet, il faut prendre en compte une pondération des buts suivis. Comme le rappellent justement Raby et Wickens (1994), la priorité est un implicite fort des modèles de gestion de la charge de travail. Dans la mesure où ceux-ci s'emploient à spécifier *quelle* tâche (dés)activer et *quand* (Miller et al., 1960), il en découle qu'un gestionnaire optimal de la charge de travail *doit* comporter un modèle hiérarchique des tâches, déterminé par leur priorité.

Retenons pour l'heure que la nécessité d'établir des priorités et les stratégies d'allocation des ressources correspondantes, trouve sa source dans la simultanéité des sollicitations : que les réponses à cette simultanéité

s'expriment de façon réactive ou programmatique, pour reprendre la terminologie employée précédemment (section 2.2, p.39). Maintenant que nous avons établi la fonction fondamentale de la priorisation, concentrons nous sur ses manifestations empiriques. Dans la section suivante, nous nous attacherons à mettre en avant les conséquences exécutives de la priorisation. Il s'agira de comprendre *par quoi* la priorisation se manifeste, au plan comportemental. Ce faisant nous découvrirons comment et par quels paradigmes les scientifiques se sont emparés de la question jusqu'à ce jour. Nous développerons ensuite les travaux qui s'attachent à décrire *comment* ces priorités sont calculées (section 3, p.76).

## 2. Les manifestations empiriques de la priorisation

L'existence, au plan cognitif, d'un processus de priorisation, ne peut être établie qu'à partir d'observations empiriques de ses conséquences supposées sur l'activité. Dans la présente section, nous nous attacherons à présenter une série de résultats qui mettent en évidence les conséquences *visibles* de la priorisation. Celles-ci sont, comme nous le verrons, de deux ordres : elles concernent la planification des tâches et l'allocation des ressources, deux fonctions essentielles du contrôle exécutif (Smith et Jonides, 1999). Bien sûr, planification des tâches et allocation des ressources n'entretiennent pas une stricte indépendance. Là où l'allocation des ressources renvoie à la proportion de ressources allouées à telle ou telle tâche, sans considération temporelle, la planification des tâches s'intéresse, au-delà de la proportion de temps passé, à l'*ordre* dans lequel les tâches sont exécutées. Mais les deux phénomènes sont conjoints : il est rare qu'une activité n'implique pas simultanément un séquençage et une allocation, un ordonnancement ainsi qu'une pondération. À chaque fois, nous passerons en revue les travaux les plus fondamentaux, ainsi que les travaux de domaines plus appliqués comme le pilotage ou le contrôle aérien. Par soucis de compréhension, nous devons aussi présenter des travaux à visée normative. Ces travaux ne sont toutefois pas tant éloignés de la description des manifestations empiriques de la priorisation. En effet, toute approche normative de la priorisation, comme nous le verrons, se donne pour objectif de contrôler par la priorisation, le déroulement empirique d'une activité. Pour finir nous évoquerons l'importance du facteur inter-individuel et de l'expertise.



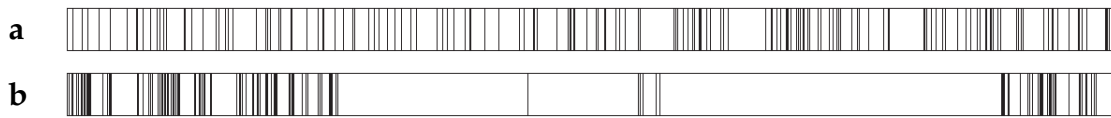
**Figure 3.3** – Un modèle simple de résolution du problème de la file d'attente, avec un serveur unique, par l'entremise d'un système de priorisation à deux niveaux ( $p_1 < p_2$ , où  $p_i$  est la priorité attribuée). Le planificateur favorise l'exécution des clients prioritaires (le client le plus à droite est servi en premier). La politique présentée ici ne l'est qu'à titre illustratif ; elle n'est pas nécessairement optimale.

## 2.1. Priorisation et planification des tâches

À l'origine, la question de la planification des tâches, dans les systèmes complexes d'administration, s'est posée sous la forme du problème de la *file d'attente* (*the queuing problem* ; Cobham, 1954). Un système de file d'attente, dans son acception la plus simple, consiste en un ensemble de *clients*, intégrant une file d'attente à des temps aléatoires, et attendant de recevoir un service – lui aussi d'une durée aléatoire. Le terme de *client* est évidemment générique, et peut tout aussi bien désigner un ensemble d'aéronefs rejoignant un aéroport, un ensemble d'acheteurs faisant la queue pour payer, une somme d'appels entrants dans un service d'urgence, ou encore – ce qui nous intéresse plus précisément – un ensemble de tâches, dans un système de travail, en attente d'exécution. Dans ce cadre de recherche, les scientifiques ont principalement adopté une approche normative. La question se posait en ces termes : étant donné un *serveur*, et un ensemble de clients dans la file d'attente, comment *planifier* le service aux clients de telle sorte que leur temps d'attente cumulé soit minimal ? Autrement dit, quelle politique de planification des ressources engendre la meilleure performance possible<sup>1</sup> pour un système de service donné ? De nombreuses théories existent et le but n'est pas, ici, de les passer en revue. Notons simplement que de nombreuses propositions suggèrent l'introduction d'un module de priorisation (Cobham, 1954 ; Kleinrock, 1976 ; Penttinen, 1999), pour favoriser, par exemple, le service des clients peu demandeurs (courte durée de traitement). Ce mécanisme simple est illustré par la Figure 3.3.

Toutefois, ces approches normatives ont un pouvoir de compréhension

1. À noter que tout dépend du critère de performance choisi. Ici, nous choisissons arbitrairement de raisonner sur le critère du temps. Nous pourrions tout aussi bien poser que la performance d'un système est déterminée par la *qualité* du service rendu, ou bien encore par un compromis entre temps passé et qualité du service etc.



**Figure 3.4** – Différence entre une dynamique prédite par une loi de Poisson (a) et une dynamique humaine réelle, mieux prédite par une loi de Pareto (b). L'axe horizontal dénote le temps passé. Chaque barre verticale représente une action individuelle. Tiré de Barabasi (2005)

limité, dans la mesure où elles ne cherchent pas à rendre compte des mécanismes effectivement déployés par les opérateurs humains pour prioriser, mais plutôt à établir un modèle optimal de planification de tâches, incluant éventuellement une phase de priorisation. Néanmoins, il existe au moins un auteur, qui a proposé une approche empirique du problème de la priorisation dans de tels domaines. Dans une activité de communication électronique (*mailing*), Barabasi (2005) a étudié les temps de délai laissés, entre deux actions, et a montré que ces intervalles se distribuent selon une loi de Pareto, soit une distribution à *queue longue* : concrètement une telle activité est marquée par une *faible proportion de délais très longs, et une forte proportion de délais très courts*. Autrement dit, la dynamique humaine est caractérisée par des épisodes d'actions en rafale (*bursts*), espacés par des temps d'attente plus longs (Figure 3.4). Une telle distribution est, à vrai dire, incompatible avec deux hypothèses à propos de la dynamique humaine : elle ne peut s'expliquer par une exécution *aléatoire* des tâches, ni par une exécution *linéaire* (premier arrivé = premier servi), deux modes d'exécution où les intervalles suivraient théoriquement une loi de Poisson. L'auteur note aussi que le délai séparant la réception et la réponse à un message électronique, n'est pas corrélé à sa taille (en octets). Il en conclut que cette dynamique bien particulière ne peut s'expliquer que par l'existence d'un mécanisme de *priorisation*, c'est-à-dire un mécanisme qui affuble une priorité à chaque nouvelle tâche disponible, permettant de raccourcir les délais d'exécution des tâches les plus importantes, et rallonger ceux des tâches qui le sont moins. Ainsi, par une approche élégante, Barabasi (2005) a bien démontré l'existence de la priorisation humaine, et son influence fondamentale sur la dynamique de l'activité humaine.

« Ce que je montre ici, c'est que le caractère "en rafale" de la dynamique de l'action humaine est la conséquence d'un système de file d'attente (*queuing*), dirigé par la prise de décision humaine : chaque fois qu'un individu fait face à plusieurs tâches et en sélectionne une sur la base d'un certain paramètre de priorité perçue, le temps d'attente des diverses tâches suivra une distribution de Pareto. »

Tiré et traduit de Barabasi (2005), p.209

**Encadré 3.1 – Un modèle normatif de CTM (*Cockpit task management*)**

*La liste ci-dessous spécifie le cycle idéal des fonctions que doivent assumer les membres de l'équipage. La priorisation y est un pilier.*

1. Créer un agenda initial
2. Jusqu'à l'achèvement ou l'échec du but de la mission :
  - (a) Évaluer la situation actuelle
  - (b) Activer les tâches dont l'évènement précurseur est arrivé
  - (c) Évaluer le statut des tâches actives
  - (d) Désactiver les tâches dont le but est satisfait ou inatteignable
  - (e) Évaluer les exigences en ressources de chaque tâche
  - (f) Prioriser les tâches actives
  - (g) Allouer les ressources aux tâches, *dans l'ordre des priorités* :
    - i. Initier d'abord les tâches nouvellement activées qui ont *la plus forte priorité*
    - ii. Interrompre les tâches à *faible priorité* (si nécessaire)
    - iii. Reprendre les tâches interrompues (si possible)
  - (h) Mettre l'agenda à jour

Tiré et traduit de Funk (1991), p.277

### **Priorisation et planification des tâches dans le cockpit**

Dans le domaine du pilotage, l'éclatement de l'activité en ensembles de tâches et sous-tâches a poussé les chercheurs à proposer des modèles normatifs de la planification des tâches (CTM pour *cockpit task management*, Funk, 1991). Ces modèles proposent de spécifier les procédures et fonctions que l'équipage doit idéalement assumer pendant toute la durée du vol. Parmi ces fonctions, on trouve l'initiation, l'évaluation, la priorisation, l'interruption, la reprise, l'annulation des tâches, ou encore l'allocation des ressources (Chou et al., 1996). La priorisation y apparaît comme une fonction centrale, notamment lorsqu'il s'agit pour l'équipage d'allouer ses ressources aux diverses tâches disponibles (Encadré 3.1, p.60). Comme précédemment, la priorisation dans le cockpit doit avoir comme conséquence exécutive de favoriser les tâches à forte priorité, au détriment des tâches à faible priorité, lesquelles peuvent, le cas échéant, être interrompues.

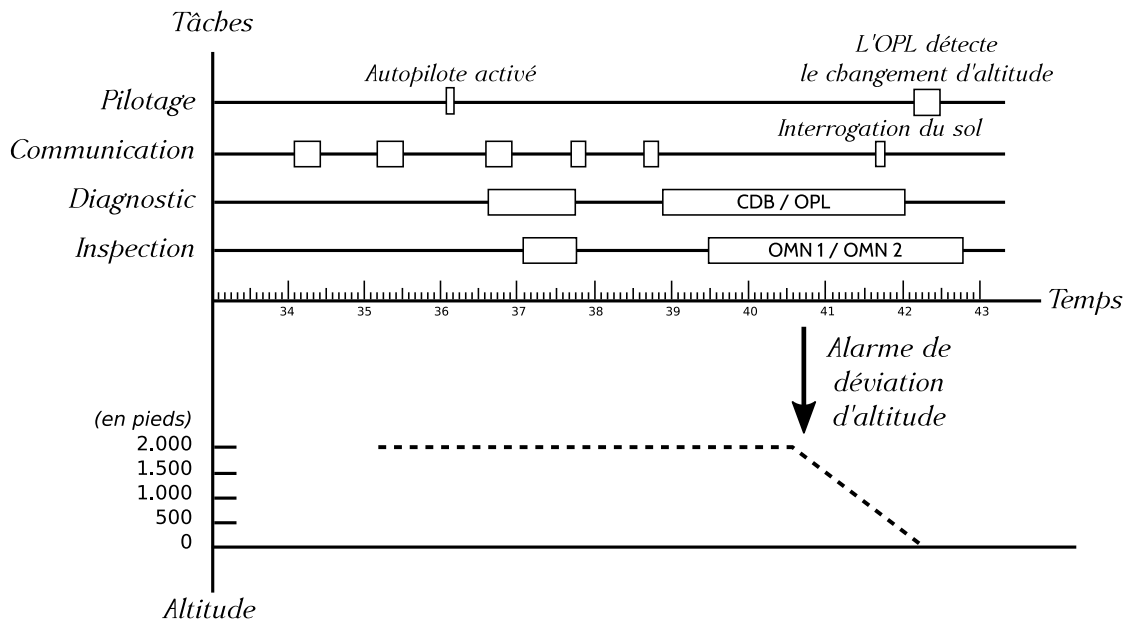


Si ces approches ont une visée *normative*, elles se basent néanmoins sur une étude approfondie des cas d'accidents aériens, et une taxonomie des fonctions humaines impliquées dans l'émergence de l'erreur. À noter que, ayant analysé une période de 10 ans, [Chou et al. \(1996\)](#) ont relevé que, sur 324 accidents, 80 (24 %) impliquaient un défaut de la CTM, dont 30 % étaient assortis d'un défaut de priorisation (tableau 3.1, p.61). Un défaut dans cette fonction a, par exemple, été avancé comme facteur explicatif de nombres d'accidents aériens. C'est le cas pour le fameux accident du L-1011, dans les marécages des Everglades ([L10111973, 1973](#)).

**Tableau 3.1** – Erreurs de planification des tâches, identifiées parmi un ensemble de 324 rapports d'accidents, du NTSB (*National transport safety board*). Certains accidents peuvent impliquer plusieurs types d'erreurs. \* Sur l'ensemble des accidents contenus dans le rapport. Extrait et traduit de [Chou et al. \(1996\)](#)

Erreurs CTM	Nombre d'accidents	Pourcentage total*
Initiation	35 (44 %)	10.8 %
Priorisation	24 (30 %)	7.4 %
Désactivation	21 (26 %)	6.5 %
Total	80 (100 %)	324 (100 %)

**Exemple d'un défaut de priorisation. Le crash du vol 401, Eastern Air Lines L-1011 (1972)** L'accident du vol 401 de la Eastern Air Lines en 1972 – exemple souvent cité – illustre parfaitement le rôle critique du *contrôle externe* dans la gestion des tâches en situations dynamiques ([L10111973, 1973](#)). Alors que l'avion approchait de l'aéroport international de Miami – sa destination, l'équipage sortit le train d'atterrissage mais constata que la lumière verte, signalant la bonne sortie du train de nez, était restée éteinte. L'équipage réitéra la manœuvre, sans succès : la lumière demeurait éteinte. À ceci trois explications étaient possibles : ou bien le train avant avait effectivement un problème ; ou bien l'ampoule était simplement grillée ; ou bien les deux en même temps. L'équipe fit le test de l'« arbre de Noël » : test destiné à allumer l'ensemble du tableau de bord afin d'en vérifier l'état technique. Ce test confirma que l'ampoule était effectivement défectueuse. Toutefois, il demeurait une faible probabilité de double-panne. Le commandant de bord décida de rejoindre un circuit d'attente, afin d'identifier avec certitude la cause de la panne, avant d'atterrir. Pendant qu'il délivrait ses consignes à l'équipage, il exerça par inadvertance une légère pression sur le manche, ce qui eu pour effet



**Figure 3.5** – Gestion des tâches, dans les dix minutes précédant l'accident du L-1011. Le haut de la figure représente la répartition des ressources à travers les quatre tâches actives. Le bas de la figure représente l'altitude de l'appareil. L'abscisse représente le temps, en minutes. CMB : commandant de bord; OPL : officier pilote de ligne; OMN : officier mécanicien naviguant. Adapté et traduit de Chou et al. (1996).

de désactiver le pilote automatique, et par la même d'engager l'avion dans une descente. Tout occupés qu'ils étaient à identifier clairement la véritable raison de la panne, aucun des membres de l'équipage ne s'en rendit compte. Lorsque l'alarme de l'altimètre résonna, l'avion venait de passer sous les 100 pieds, avec une vitesse de descente de 50 pieds par seconde. Il était donc trop tard et l'avion s'abîma dans les marécages des Everglades, au nord-ouest de Miami, 10 minutes après la survenue de la panne. L'enquête révéla que seule l'ampoule était défectueuse, et que l'avion aurait pu atterrir sans encombre.

Ainsi, alors que tous les membres de l'équipage attribuaient leurs ressources à la résolution d'une ambiguïté, nul ne contrôla ni l'altitude de l'appareil, ni l'état du pilote automatique, pendant les dix minutes qui séparaient la survenue de la panne de l'accident.

Chou et al. (1996) avancent que le manque de contrôle externe sur la tâche principale de pilotage a pu être suscité par un défaut de priorisation. En particulier, l'équipage a pu attribuer une priorité trop forte à la tâche de diagnostic et de réparation de l'indicateur lumineux du train d'atterrissage, l'empêchant, par la même, d'allouer les ressources suffisantes à la tâche de pilotage – ce qui, le cas échéant, lui eut permis d'identifier le désengagement

involontaire du pilote automatique (Figure 3.5).

## 2.2. Priorisation et allocation des ressources

À bien des égards, l'étude des conséquences exécutives de la priorisation serait réductrice si elle ne s'intéressait qu'à l'ordonnancement des tâches. Et il est en effet possible que la priorisation, au-delà même de leur séquençage, ait une influence sur la *quantité* de ressources dévolue à telle ou telle tâche. Il est, par exemple, tout à fait possible qu'une tâche *prioritaire* ne soit pas nécessairement la première tâche exécutée, mais plutôt celle bénéficiant d'un temps supérieur d'exécution. Ceci peut être d'autant plus saillant dans les environnements complexes où des permutations de tâches fréquentes sont requises, et où il importe moins de séquencer des tâches que de leur allouer un temps de traitement satisfaisant.

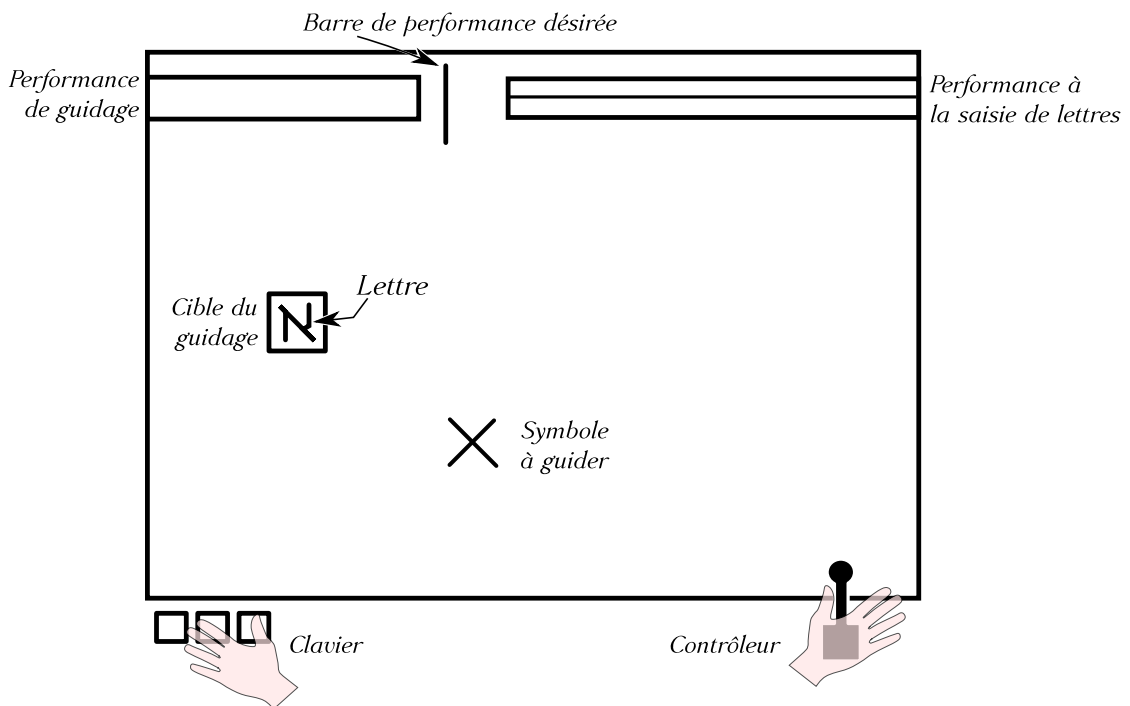
Dans la présente section, nous nous attacherons à décrire les travaux les plus importants, ayant contribué à lier priorisation et allocation des ressources. Les questions importantes, auxquelles les chercheurs tentaient alors de répondre étaient les suivantes (Gopher et Navon, 1980, note 1) :

- a) Dans quelle mesure peut-on exercer un contrôle volontaire sur nos ressources ?
- b) Cette habileté se développe-t-elle avec l'entraînement ?
- c) L'opérateur humain alloue-t-il ses ressources de façon optimale ?

Sans mentionner directement l'existence d'un processus de priorisation sous-jacent, ces travaux ont tous, d'une façon ou d'une autre, mis en avant la possibilité, pour les individus, de tenir compte de priorités assignées pour y accorder le contrôle de leurs ressources..

### 2.2.1. Influencer l'allocation des ressources grâce aux priorités

À l'origine, l'utilisation de différents niveaux de priorités dans les paradigmes double-tâches devait permettre d'isoler les différentes politiques d'allocation des ressources, pouvant peser sur la performance (Woodhead, 1966; Brickner et Gopher, 1981; Gopher et al., 1982). Il faut, pour le comprendre, revenir un instant à la théorie des ressources multiples. Souvenons-nous que, selon cette théorie, la mesure dans laquelle deux tâches sollicitent les mêmes ressources est déterminante des compromis de performance réalisés. Toutefois, comme l'avancent Gopher et al. (1982), il peut être malaisé de le vérifier, compte tenu de la dimension stratégique de l'allocation des ressources (Damos et Wickens, 1980). En particulier, *lorsque deux tâches (A et B) sollicitent un même*



**Figure 3.6** – Environnement de la double-tâches de [Gopher et al. \(1982\)](#). L'emplacement de la barre de performance spécifiait la priorité à accorder à chaque sous-tâche. Par exemple, lorsque la barre était plutôt sur la gauche de l'écran comme ici, la performance désirée pour la saisie de lettres était plus forte, et sa priorité considérée plus importante. La lettre à identifier et saisir était affichée dans le cadre-cible, de la tâche de guidage. Adapté et traduit de [Gopher et al. \(1982, p.148\)](#)

*ensemble de ressources*, et que l'on augmente la difficulté de la tâche A, deux résultats opposés peuvent en découler, selon la politique du participant. Pour répondre à l'augmentation de la demande, le participant peut être amené à augmenter la quantité de ressources allouée à la tâche A, et subir, en conséquence, une baisse de performance à la tâche B (dont la demande n'a pas été modifiée). Mais il se peut aussi qu'il choisisse de ne pas modifier sa politique d'allocation : alors que la demande à la tâche A augmente, il continuera de lui allouer la même quantité de ressources, ce qui l'amènera, théoriquement, à voir sa performance diminuer *pour cette tâche* ([Navon et Gopher, 1979](#)). Ces deux conséquences possibles de l'augmentation de la difficulté d'une des deux tâches, met en évidence l'importance de la prise en compte de la dimension stratégique, lorsque l'on cherche à comprendre la performance individuelle en environnement multitâche.

C'est dans l'idée d'éviter cette confusion, et de distinguer clairement la politique d'allocation des effets de la difficulté, que [Gopher et al. \(1982\)](#) ont

proposé de manipuler conjointement la difficulté et l'importance (*emphasis*) des tâches. Dans leur étude, les participants devaient réaliser deux tâches simultanément : une tâche visuo-manuelle de suivi et une tâche visuo-manuelle de saisie de lettres. Dans une première phase d'entraînement ( $\approx 1h30$ ), les participants s'entraînaient à réaliser les sous-tâches isolément et simultanément. Dans la phase test ( $\approx 1h00$ ), les tâches devaient être réalisées simultanément et étaient systématiquement variées en difficulté et en importance (.3 ou .5 ou .7). Ce dernier paramètre était représenté par le biais d'une barre de performance désirée, dont l'emplacement horizontal spécifiait le niveau à atteindre pour chaque tâche. Les niveaux de performance réels de chaque tâche étaient aussi affichés (Figure 3.6). Les participants devaient être aussi précis et rapides que possible, et s'approcher au mieux de la performance désirée pour chaque tâche.

Les résultats de cette expérimentation montraient une interaction claire entre les niveaux de difficulté et d'importance des tâches. D'une part, la performance à la tâche de saisie de lettres était d'autant meilleure que sa difficulté était faible et son importance élevée. Mais cet effet de l'importance *n'était pas le même à travers les différents niveaux de difficulté*. En l'occurrence, dans la condition la plus facile, une augmentation de l'importance engendrait une amélioration de la performance moindre, comparée aux deux conditions les plus difficiles. Quoique les auteurs interprétèrent leurs résultats comme de nouvelles preuves de la théorie des ressources multiples, retenons surtout, en ce qui nous concerne, que par le biais de ces manipulations, ils ont mis élégamment en évidence la possibilité pour un individu de déployer une politique d'allocation des ressources spécifique, ainsi que la possibilité d'influencer cette politique par le biais d'indicateurs d'importance. Attention toutefois, Gopher et al. (1982) ont manipulé l'importance des tâches en spécifiant le niveau de performance à atteindre pour chacune. Cette façon de spécifier l'importance peut poser problème. En effet, en indiquant directement le niveau de performance à atteindre, on ne laisse pas la possibilité au participant de *convertir* un indice d'importance en une politique d'allocation. Au contraire, la politique à atteindre lui est directement indiquée. Ceci sera discuté plus loin, p.76.

En fait, il ne s'agissait pas de la première tentative de manipuler l'allocation des ressources par l'entremise d'indicateurs d'importances ou de priorités (Gopher et North, 1974; Gopher et Navon, 1980; Johnston et al., 1972; Sperling et Melchner, 1978; Wickens et Gopher, 1977; Woodhead, 1966). Par exemple, en 1966, Woodhead notait un effet asymétrique de la priorité. Dans son étude, les participants devaient réaliser simultanément une tâche de mémorisation difficile, ainsi qu'une tâche facile de recherche de cibles. Alors que la

performance à la tâche de mémorisation était meilleure lorsqu'elle recevait un niveau élevé de priorité, la même manipulation n'avait aucun effet sur la performance à la tâche de recherche. Compte tenu de l'amalgame entre difficulté et type de la tâche (mémorisation/difficile *ou* recherche/facile), la cause de cette asymétrie ne put être déterminée.

### 2.2.2. Le paradigme des priorités variables

Les précédents résultats ont mis en évidence que les stratégies d'allocation des ressources influencent la performance en situation de multitâche. En sus, il est apparu que l'entraînement a un rôle fondamental dans l'application de nouvelles stratégies d'allocation (Gopher et al., 1982). Si bien que le contrôle sur l'allocation des ressources est apparu comme une habileté acquise, sujette à apprentissage (Morgan et D'Mello, 2013). Un ensemble de travaux de recherche ont été menés pour mieux comprendre les effets de la variation des priorités sur la performance en situation multitâche, grâce à un paradigme dit « des priorités variables ». Tous ces travaux ont mis en avant ce fait : les participants entraînés à réaliser une double-tâche, dans des conditions de priorités *variables*, montraient de meilleures performances lorsqu'on leur demandait de réaliser une autre tâche analogue (transfert), comparés à des participants entraînés dans des conditions de priorités statiques (Boot et al., 2010; Brickner et Gopher, 1981; Gopher et al., 1982, 1989; McKendrick et Parasuraman, 2012; Spitz, 1988; Wickens et al., 2011; Yechiam et al., 2001).

Plusieurs mécanismes furent avancés pour expliquer le phénomène (McKendrick et Parasuraman, 2012) :

1. Du point de vue de la résolution de problèmes, il est possible que la variation des priorités assignées amène le participant à *explorer de façon plus systématique l'espace-problème* (voir Figure 3.1, p.55) de la tâche (Yechiam et al., 2001). Dans cette perspective, l'augmentation de la performance proviendrait de ce que les participants, par l'application d'une grande diversité de stratégies d'allocation des ressources, ont une plus forte probabilité de découvrir une stratégie plus optimale (Kramer et al., 1995).
2. Selon une deuxième hypothèse, le paradigme des priorités variables entraînerait les participants à *contrôler leur attention* de façon plus précise, dans une situation complexe. Cet entraînement leur permettrait d'adapter plus rapidement la quantité des ressources allouées, en fonction des divers niveaux de demande des tâches en cours (McKendrick et Parasuraman, 2012). En un mot, le paradigme des priorités variables constituerait, sous cette perspective, un entraînement à la flexibilité

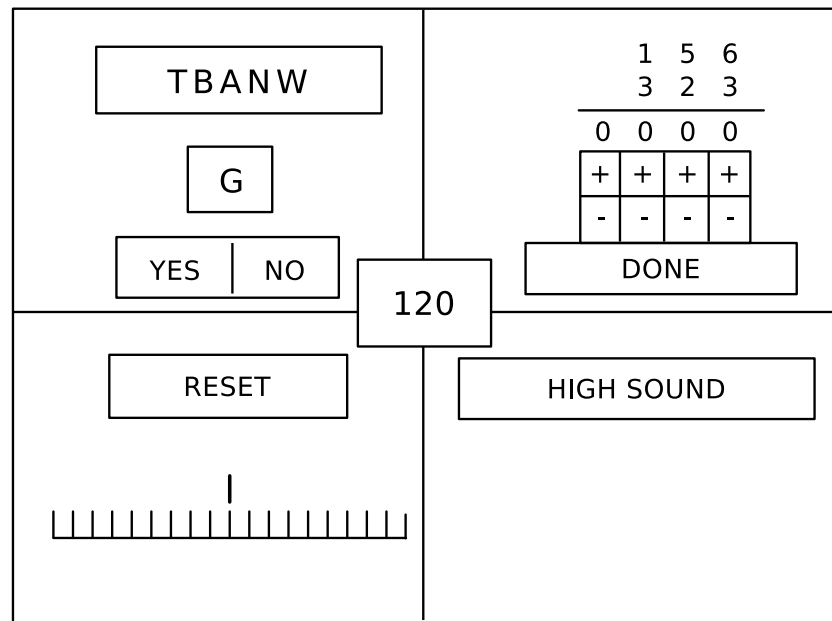
attentionnelle.

3. Enfin, une dernière hypothèse postule que le paradigme, en spécifiant des indices objectifs d'allocation des ressources, inciterait les participants à interagir avec les tâches, indépendamment de leurs propriétés, les empêchant, par exemple, de se focaliser sur les tâches les plus faciles et d'éviter les tâches les plus difficiles (comme les théories de l'évitement de l'effort mental le prévoient; Kool et al., 2010). Les priorités participeraient, en fait, d'un contrôle exogène sur l'allocation des ressources, qui conduirait les individus à s'exercer plus assidûment aux tâches les plus difficiles. Ceci les amènerait à *développer une pratique délibérée de ces tâches* ce qui, comme le suggèrent les théories de l'expertise (Ericsson et al., 1993), soutiendrait l'amélioration de la performance. De ce point de vue, la vertu principale du paradigme proviendrait de ce qu'il permet aux participants de s'exercer à toutes les tâches – y compris aux plus difficiles – et à y améliorer leurs compétences.

Ce débat théorique n'est toujours pas tranché à l'heure actuelle (voir Gopher et al., 2007, pour une revue sur la question). Toutefois, notons que ces hypothèses ne s'excluent pas *a priori*, les unes les autres. Par exemple, il n'est pas impossible que flexibilité attentionnelle et diversité des stratégies attentionnelles aillent de pair. Peut-être la flexibilité attentionnelle repose-t-elle directement sur la connaissance et la disponibilité d'un grand nombre de stratégies d'allocation des ressources. De la même façon, l'hypothèse du développement de l'expertise n'est pas incompatible avec ces deux autres hypothèses. En effet, si le développement de l'expertise s'accompagne – à demande équivalente – d'une libération des ressources (Schneider et Shiffrin, 1977), il est tout à fait possible que cette mise à disposition de ressources nouvelles bénéficie à la flexibilité attentionnelle, et de façon plus générale, au contrôle cognitif. En effet, l'injonction à appliquer une nouvelle allocation des ressources peut constituer une tâche en elle-même (Logan et Gordon, 2001; Moray, 1967) et, étant dépendante du contrôle cognitif, comporter un coût intrinsèque (voir Kool et al., 2013). Ainsi, un rapport peut exister entre la flexibilité attentionnelle d'un individu, le niveau d'expertise atteint pour chaque tâche en présence, mais aussi son répertoire de stratégies attentionnelles connues.

Des manipulations analogues ont été entreprises, dans des situations multitâches (Gutzwiller et al., 2014; Matton et al., 2016; Wang et al., 2007, 2009; Wickens et al., 2016). Là encore, il s'agissait d'évaluer la capacité des participants à ajuster l'allocation de leurs ressources à une matrice de gains/priorités et à s'adapter à toute variation de cette matrice. Par exemple, dans l'étude de Wang et al. (2009), deux groupes de participants devaient





**Figure 3.7** – L’environnement SYNWORK (Elsmore, 1994). Le total des points gagnés est affiché au centre de l’écran. La tâche de mémoire est en haut à gauche, la tâche mathématique en haut à droite, la tâche de surveillance visuelle est en bas à gauche et la tâche de surveillance auditive en bas à droite.

interagir avec l’environnement SYNWORK, qui comporte quatre sous-tâches (Elsmore, 1994, voir Figure 3.7), et qui était additionné d’une matrice de gains. Dans leur première expérimentation, la tâche de mémorisation pouvait présenter, selon le groupe, un niveau de gains plus (15 points) ou moins élevé (5 points) que les autres tâches. Les gains de ces dernières demeuraient stables. Par exemple, la tâche mathématique engendrait systématiquement un gain de 10 points en cas de bonne réponse, et une perte de 5 points en cas d’erreur. L’étude comportait douze sessions de 5 minutes. Pour chaque session, les participants avaient pour objectif de maximiser le nombre global de points obtenus. Toutefois, pour les 4 dernières sessions (9–12; phase de transfert), la matrice de gains subissait une modification pour la moitié des participants de chaque groupe. Lorsque la tâche de mémoire rapportait initialement 5 points, elle rapportait 15 points pour les quatre dernières sessions, et vice-versa. Dans une seconde expérimentation, la même manipulation était réalisée avec la tâche mathématique. Pour tenter d’évaluer la politique d’allocation des ressources déployée par les participants, les auteurs mesuraient le nombre de réponses données à chaque tâche.

Pour les deux expérimentations, les résultats ont montré que le nombre de réponses données à la tâche d’intérêt, avant la phase de transfert, était modulé



par une interaction entre le numéro de session (1–8) et son gain (5 ou 15) : un gain plus élevé engendrait un nombre de réponse plus élevé, mais cet effet était plus prononcé à mesure que le participant passait d'un essai à l'autre. Cette augmentation du nombre de réponses pour la tâche d'intérêt n'était pas associée à une diminution du nombre de réponses pour les autres tâches, dont les gains demeuraient stables. De plus, lors de la phase de transfert, une diminution du gain (15  $\rightsquigarrow$  5) avait plus d'influence sur la politique d'allocation qu'une augmentation du gain (5  $\rightsquigarrow$  15). Enfin, en comparant ces résultats avec ceux d'une précédente expérience (Wang et al., 2007), les auteurs en ont conclu que manipuler les poids de deux sous-tâches dans des sens opposés, avait plus d'influence sur le contrôle attentionnel que de manipuler uniquement le poids d'une sous-tâche. Concrètement, un « transfert de ressources » entre deux tâches était d'autant plus marqué que l'augmentation des gains pour l'une s'accompagnait d'une diminution des gains pour l'autre<sup>2</sup>. Sur l'ensemble de leurs deux études (Wang et al., 2007, 2009), les auteurs ont aussi noté une certaine inertie attentionnelle. Non seulement il faut un certain nombre d'essais pour que le gain relatif d'une tâche montre son influence, mais lorsque ce gain est renversé (p.ex., 15  $\rightsquigarrow$  5), il existe un effet résiduel de la stratégie précédente.

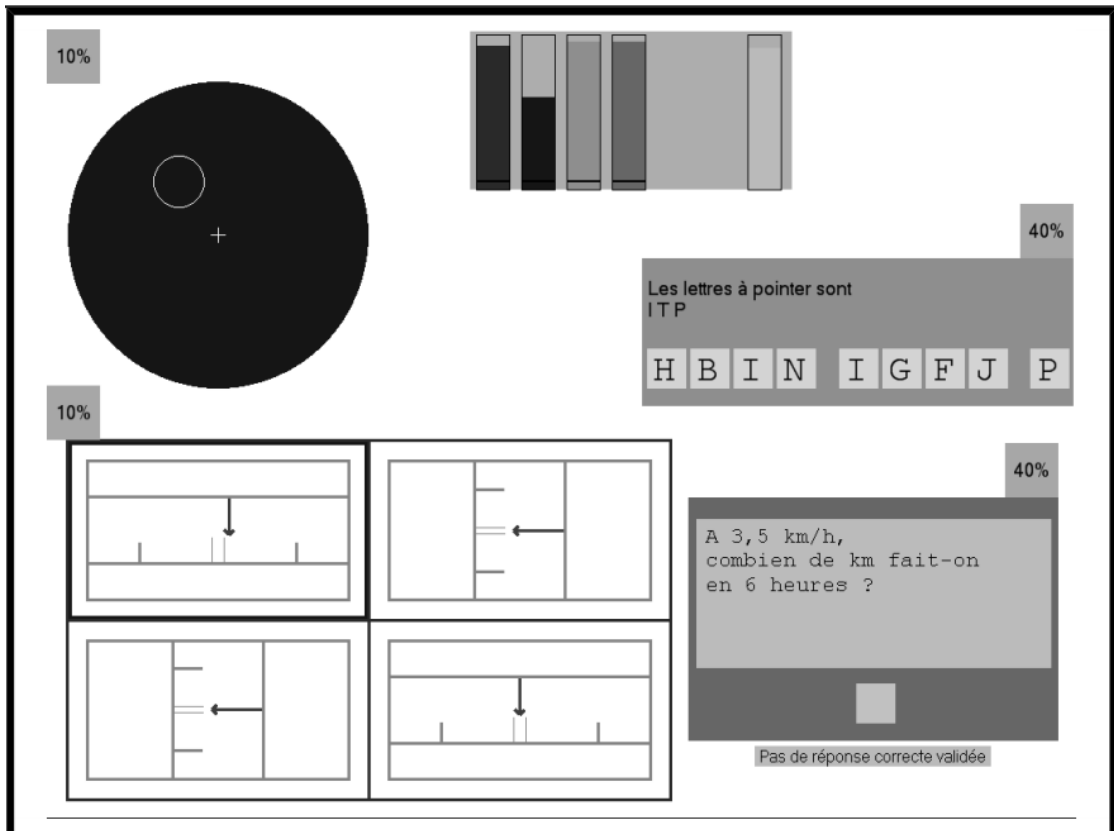
En résumé, au-delà de la difficulté d'analyser conjointement les résultats obtenus à quatre tâches différentes, ce paradigme multitâche adresse le même type de phénomènes que ceux évoqués plus haut (p.66). Ainsi, que ce soit dans des contextes de double-tâche ou de multitâche, il semble possible d'influencer la stratégie attentionnelle déployée par les participants, par le biais d'indicateurs de priorités. Nous avons vu précédemment la pertinence de spécifier une « performance désirée », nous voyons ici qu'il est tout à fait possible d'utiliser de « simples » indicateurs de récompense. Dans les deux cas, il apparaît clairement que l'adaptation des ressources attentionnelles aux diverses priorités des tâches ne va pas sans effort, et comporte tous les traits d'une habileté acquise. Elle nécessite un apprentissage spécifique (Gopher et al., 2007), admet une forme d'inertie (Wang et al., 2007), et est soumise à une certaine variabilité inter-individuelle, comme nous allons le voir maintenant.

### 2.2.3. Approche inter-individuelle de la priorisation

S'il est vrai que la priorisation – entendue comme adaptation dynamique de l'allocation des ressources – a tous les traits d'une habileté, il s'en suit logiquement qu'elle devrait laisser apparaître une variabilité entre les

---

2. Soient deux tâches A et B, rapportant initialement 10 et 15 points respectivement ( $A_{10}, B_{15}$ ), selon Wang et al. (2007), si l'on modifie la matrice de gains, la ré-allocation des ressources devrait être plus marquée pour ( $A_7, B_{17}$ ) que pour ( $A_{10}, B_{20}$ ), alors que l'écart reste constant (10).



**Figure 3.8** – La tâche de gestion des priorités (PMT pour *priority management task*) utilisée par Matton et al. (2016). Elle inclut une tâche de poursuite (en haut à gauche), une tâche de surveillance (en bas à gauche), une tâche de pointage de lettres (en haut à droite) et une tâche arithmétique (en bas à droite). Les performances pour chacune de ces tâches, ainsi que la performance globale, sont affichées sous forme de jauges, en haut de l'écran. Pour chaque tâche, une valeur (p.ex., 40 %) était là pour rappeler l'importance relative de chaque sous-tâche.

personnes. Les études précédentes ont mis en évidence des évolutions des performances avec l'entraînement. Certains auteurs ont comparé les comportements d'allocation des ressources (p.ex., [Matton et al., 2016](#)), dans un environnement multitâche (Figure 3.8), entre des novices et des experts, pour l'environnement en question. Après s'être entraînés à chacune des quatre sous-tâches, les participants devaient les réaliser simultanément, pendant trois sessions de quatre minutes. Durant la première session, les quatre sous-tâches étaient annoncées comme aussi importantes les unes que les autres. Une valeur (p.ex., 25 %) était affichée auprès de chacune pour le rappeler. Durant la seconde session, ces valeurs étaient modifiées, de sorte que deux sous-tâches – celles de pointage de lettres et de calcul arithmétique – étaient plus importantes (40 %) que les deux autres sous-tâches de poursuite et de surveillance (10 %). Enfin, dans la dernière phase, ces valeurs redevenaient équivalentes. Le comportement oculaire des participants était enregistré.

Les résultats obtenus soutenaient l'idée que la façon dont les participants ré-allouent leurs ressources, après un changement dans les priorités de chaque sous-tâche, dépend en partie de l'expérience qu'ils ont de cet environnement. En effet, en réponse à la reconfiguration des priorités, les novices allouaient préférentiellement leurs ressources à l'une des deux sous-tâches les plus importantes, au détriment des sous-tâches les moins importantes – allant, pour certains, jusqu'à abandonner la sous-tâche de surveillance. Ceci entraînait, chez eux, une diminution du niveau général de performance. Au contraire, les experts continuaient d'allouer une partie de leurs ressources à ces sous-tâches moins importantes, et de la sorte, parvenaient à préserver leur performance. Selon les auteurs, cette différence est à mettre en relation avec une différence de stratégies attentionnelles adaptées à la quantité de ressources à investir. Ainsi, les participants novices, impliquant *a priori* plus de ressources dans la réalisation des sous-tâches ([Schneider et Shiffrin, 1977](#)), auraient suivi une politique de rationalité *locale* (comme déjà mis en évidence par [Katidioti et Taatgen, 2014](#)), privilégiant les sous-tâches les plus importantes, quitte à délaisser certaines composantes de l'environnement. Par contraste, les participants experts, investissant moins de ressources, auraient favorisé une politique de rationalité *globale*, en allouant suffisamment de ressources aux tâches les moins importantes, afin de préserver leur niveau général de performance.

Ces résultats sont tout à fait compatibles avec l'idée que la performance en situation multitâche repose pour partie sur une habileté qui peut faire l'objet d'un entraînement ([Gopher et al., 2007](#)), et mettent en évidence des phénomènes de négligence stratégique, déjà observés par ailleurs chez des participants novices ([Wang et al., 2007](#); [Hambrick et al., 2010](#)). Ils mettent aussi

en avant cette idée plus générale : en environnement complexe, la dimension stratégique de la dynamique attentionnelle est fortement influencée par le niveau d'expertise des opérateurs (Koh et al., 2011; Schunn et Reder, 1998).

#### 2.2.4. Priorisation et allocation des ressources dans le cockpit

Outre ces approches fondamentales, les conséquences exécutives de la priorisation sur l'allocation des ressources, admettent leur lot d'observations dans le domaine appliqué, et, pour ce qui nous intéresse plus particulièrement, dans le domaine de l'aviation. Le cockpit n'est pas une interface lisse, où l'information serait distribuée de façon homogène, et la planification des tâches (CTM) y fait la part belle à la priorisation (Funk, 1991), comme nous l'avons vu plus tôt. À ce jour, peu d'études se sont focalisées directement sur les manifestations empiriques de la priorisation dans le cockpit (Raby et Wickens, 1994; Iani et Wickens, 2007).

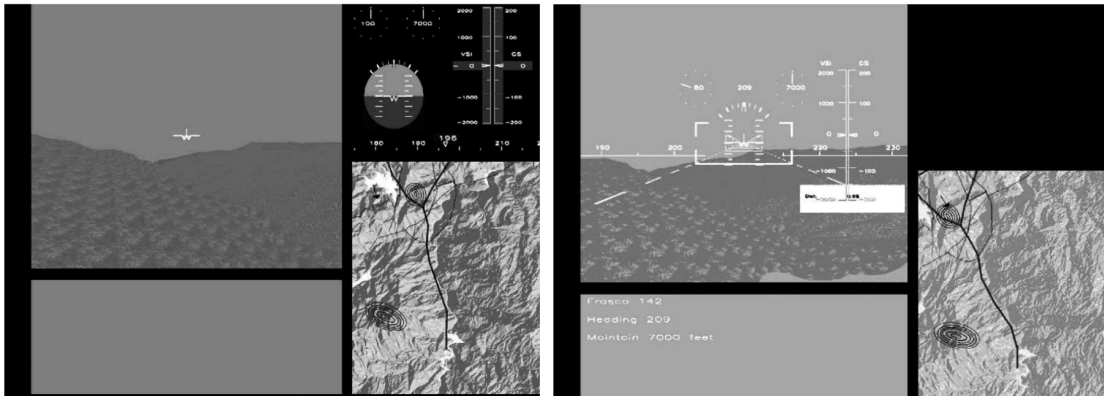
#### Influence de la charge de travail sur la priorisation dans le cockpit

Dans une étude de 1994, Raby et Wickens ont analysé l'influence de la charge de travail sur l'allocation des ressources dans le cockpit. Ils souhaitent mettre en évidence l'influence éventuelle de la priorité des tâches sur cette allocation. Pour ce faire, trente pilotes en formation ont dû réaliser des manœuvres d'approche et d'atterrissage sur simulateur, sous trois niveaux différents de charge de travail. Cette charge était manipulée par le biais d'un facteur de pression temporelle, et par l'ajout de communications obligatoires. D'un autre côté, les pilotes, ainsi que des instructeurs de vol, devaient ordonner trente tâches de vol par ordre de priorité. À partir de ces ordonnancements, trois catégories de tâches furent conçues (faible *ou* moyenne *ou* forte priorité). Le comportement oculaire des participants était enregistré, pour caractériser leurs stratégies visuelles.

Outre la baisse de performance globale corrélée à l'augmentation de la charge de travail, les auteurs ont relevé une interaction entre le niveau de la charge de travail et le niveau de priorité des tâches. Sous un niveau élevé de charge de travail, les participants passaient beaucoup plus de temps sur les tâches à forte priorité, un peu plus sur les tâches à priorité moyenne, et *moins* de temps sur les tâches à faible priorité – ce qui n'était pas le cas sous une charge de travail plus faible. En outre, les auteurs ont montré que cette modulation dans l'allocation des ressources ne s'accompagnait pas d'une modification des traitements discrets reçus par chaque tâche. Ainsi, quel que soit son niveau de priorité, la durée moyenne des visites<sup>3</sup> d'une tâche n'était pas modulée

---

3. Pour une tâche donnée, une *visite* correspond à un évènement oculaire discret, qui dure



**Figure 3.9** – Capture d’écran des deux systèmes de vision synthétique (SVS) utilisés dans l’étude de [Iani et Wickens \(2007\)](#). À gauche la version éclatée basique; à droite la version intégrée (tunnel).

par le niveau de charge de travail global, ce qui suggère déjà une influence non-linéaire des priorités, et le rôle significatif de la charge de travail dans la compréhension du phénomène de priorisation.

### Priorisation et interruption de tâches dans le cockpit

Plus récemment, dans une étude portant sur l’évaluation d’un affichage tête-haute pour le pilotage d’aéronefs, [Iani et Wickens \(2007\)](#) ont voulu analyser l’influence de la priorité et de la saillance d’une tâche interruptive (TI) sur la gestion des ressources attentionnelles. Quarante pilotes ont dû réaliser trois manœuvres d’approche en simulateur en utilisant, selon le groupe, deux systèmes différents de vision synthétique (SVS) : un système basique éclaté, et un système intégré, dit *tunnel*, censé regrouper l’ensemble des informations dans la zone fovéale (Figure 3.9). En plus de cette tâche principale (TP) de pilotage, les participants devaient sélectionner un circuit d’approche en se basant sur des données météorologiques. La saillance (marqueur visuel *ou* auditif) ainsi que l’importance de cette tâche interruptive étaient manipulés. L’importance (faible *ou* forte) de cette tâche dépendait de la gravité des paramètres météo. Les informations données par le contrôle aérien (ATC) allaient dans ce sens. Sous la condition de faible importance, l’ATC disait : « Frasca 142. Rapport météorologique. Orage dans la zone ». En comparaison, pour la condition à forte importance, il disait : « Frasca 142. Rapport météorologique. Orage sur le circuit d’approche. Prévoyez une autre approche par l’Est ».

Les résultats de cette étude mettent en avant un effet facilitateur de tant que le regard du participant porte sur l’aire d’intérêt de la tâche.

l'importance de la TI sur la réorientation des ressources attentionnelles vers elle. Toutefois cette facilitation était modulée par deux facteurs : la saillance de la TI, ainsi que le type de SVS utilisé. Lorsque la TI ne s'accompagnait pas d'un indice auditif supplémentaire en provenance de l'ATC (saillance faible), son importance n'avait aucun effet significatif sur l'allocation des ressources. De plus, au contraire de ce que prévoient les auteurs, l'usage d'un SVS intégré (tunnel) modulait positivement l'influence de l'importance de la TI sur la permutation de tâches. Autrement dit, lorsqu'ils utilisaient la version intégrée du SVS, les participants étaient beaucoup plus sensibles à l'importance de la TI, et s'interrompaient plus fréquemment lorsque celle-ci était plus importante. Pour l'expliquer, les auteurs ont argumenté que le SVS intégré, en regroupant à une même localisation des informations critiques pour la TP, permettait une libération de ressources attentionnelles, alors disponibles pour favoriser le traitement de la TI.

Avec deux approches différentes, ces études montrent comment, dans un environnement tel que le cockpit, des indices de priorités, évalués (Raby et Wickens, 1994) ou manipulés (Iani et Wickens, 2007), peuvent moduler la politique d'allocation des ressources. Ces études mettent aussi en avant le rôle fondamental de la charge de travail dans la priorisation, mais avec des résultats apparemment contradictoires. Alors que, dans l'étude de Raby et Wickens (1994), l'augmentation de la charge va de pair avec une influence plus grande des priorités, dans l'étude de Iani et Wickens (2007), la diminution supposée de la charge prodiguée par l'utilisation du SVS intégré, amène une plus grande sensibilité à l'importance de la tâche interruptive. Sans être en mesure d'en fournir une explication à ce stade, notons toutefois que dans ces deux études les tâches étudiées n'avaient pas la même nature. Ainsi, chez Iani et Wickens (2007), c'est la priorité d'une tâche interruptive qui était étudiée, alors que chez Raby et Wickens (1994), c'est sur un ensemble de 30 tâches, faisant toutes partie de la CTM, que l'influence des priorités était évaluée. Ainsi, s'il s'avère qu'une augmentation de la charge amène une modulation globale de la politique attentionnelle par les priorités, il reste que cette augmentation peut en retour menacer la sensibilité à la priorité d'une tâche interruptive, en raison d'une moindre disponibilité des ressources. Ce qui, au passage, peut avoir des conséquences désastreuses lorsque, par exemple, ces tâches interruptives concernent un problème critique tel qu'une panne ou un risque potentiel de collision. Enfin, ces résultats indiquent qu'il n'existe pas *a priori* de relation linéaire entre priorisation et charge de travail.

D'autres études portant sur la priorisation dans le cockpit peuvent être mentionnées ici (Colvin et al., 2005; Jonsson et Ricks, 1995). Toutefois, comme elles s'emploient principalement à définir les facteurs influençant le processus

de priorisation dans le cockpit, nous les aborderons lorsqu'il s'agira de présenter les différents modèles de la priorisation (section 3, p.76).

### Réflexion méthodologique : la valeur écologique des indices de priorité

Outre la pertinence des indicateurs de priorité pour identifier plus avant la structure des ressources humaines (p.ex., Gopher et al., 1982; Navon et Gopher, 1979), l'utilisation de ces indicateurs comporte aussi une valeur *écologique*. Bien souvent, les études de la performance multitâche en situation écologique ne spécifient pas explicitement de priorités pour les différentes tâches (p.ex., Mattes, 2003; Strayer et Johnston, 2001, dans le domaine de la conduite automobile). Or, en conditions réelles, on peut supposer que les opérateurs attribuent naturellement des priorités. Ils donnent, par exemple, une priorité plus forte à la tâche de conduite, qu'à une tâche de communication (téléphone portable). Ainsi paraît-il crucial, pour le caractère écologique des tâches, de contrôler les priorités qui sont spécifiées, et de s'assurer que celles-ci se rapprochent des priorités attribuées par les individus en situation réelle (Levy et Pashler, 2008).

### Synthèse

À présent, nous pouvons enrichir la définition que nous avons avancée précédemment (section 1, p.56). Nous avons avancé l'idée que la priorisation a une forte valeur adaptative, et que sa fonction principale consiste à permettre à l'organisme de faire face à la *simultanéité* des sollicitations. Les travaux que nous venons de présenter nous apportent un certain nombre d'informations supplémentaires. Tout d'abord et sans surprise, il s'avère qu'au plan exécutif, la prise en compte d'indicateurs de priorités amène les opérateurs à *favoriser l'exécution des tâches les plus importantes*, soit en les exécutant plus tôt, soit en leur allouant une quantité supérieure de ressources. Nous avons vu aussi que la réciproque peut être vraie. Une tâche trop peu importante peut se voir allouer moins de ressources, voire être négligée selon les cas. Tous ces travaux, sans exception, impliquent – comme prémisses – qu'un individu peut, dans une certaine mesure, *contrôler* ses ressources et que c'est de là qu'il tire la possibilité d'accorder son effort à une demande composite et dynamique. Conformément à cette idée, nous avons vu que la priorisation manifeste tous les traits d'une habileté : qu'elle ne va pas sans effort, est améliorée par un entraînement spécifique, et est sensible au facteur inter-individuel.

Enfin, conformément à l'idée que la priorisation a pour fonction première la prise en charge de la *simultanéité*, les études ont démontré qu'elle entretient un lien fort avec le niveau de charge de travail. Toutefois, nous avons pu relever



des observations qui paraissent contradictoires. D'un côté, il semble que les priorités aient une influence plus grande en situation de charge élevée, d'un autre côté, nous avons vu qu'une trop grande charge de travail peut lui porter préjudice. Cette contradiction vient renforcer l'hypothèse que la priorisation repose, au moins en partie, sur le contrôle cognitif, et à ce titre comporte une propriété *réflexive*. Elle est à la fois un processus essentiel de la gestion des ressources mais, lorsqu'elle requiert un contrôle de la part de l'opérateur, consomme à son tour des ressources et peut donc être menacée par une trop faible disponibilité de ces dernières.

Pour résumer, la priorisation apparaît comme un *processus cognitif*, dont la fonction première consiste à répondre à la simultanéité des sollicitations, en favorisant l'exécution des tâches les plus importantes. Il présente toutes les caractéristiques d'une habileté qui repose principalement sur la contrôlabilité des ressources.

### 3. Les modèles de la priorisation

Dans la partie précédente, nous avons passé en revue les manifestations empiriques du processus de priorisation. Mais cette description est incomplète. Décrire la priorisation, c'est rendre compte de ses effets tels qu'ils s'observent, par exemple dans le cadre expérimental, mais c'est aussi rendre compte de la façon dont les opérateurs *évaluent* les priorités. Cette question n'a pas reçu grand intérêt dans les travaux les plus cités de la littérature sur le multitâche. Par exemple, le modèle de la *Threaded cognition* (Salvucci et Taatgen, 2011b) ne lui donne qu'une place secondaire. Les individus y sont d'abord perçus comme des exécutants, dont les velléités stratégiques demeurent minoritaires. De plus, lorsque ces auteurs accordent une place à la priorisation, ils le font en des termes qui ne spécifient pas comment les priorités sont évaluées :

« La priorisation des différentes unités d'exécution peut être réalisée à travers des processus métacognitifs qui surveillent d'autres processus et les dirigent, afin d'augmenter ou diminuer l'intensité de leur traitement, en se basant sur les demandes externes et internes »

Traduit de Salvucci et Taatgen (2011b, p.270)

On retrouve la même ambiguïté chez Meyer et Kieras (1997). Lorsque, dans leur revue de littérature, ces derniers avancent que la priorité des tâches est l'un des déterminants principaux des processus exécutifs (p.14), ils n'indiquent pas pour autant *comment* ces priorités sont évaluées. De la même façon, lorsque Gopher et al. (1982) montrent que les priorités ont une influence importante sur le contrôle volontaire des ressources, ils le font dans l'idée de mieux



comprendre la structure des ressources humaines, et non pas dans l'idée de comprendre la priorisation, en elle-même.

Dans leur expérience (Gopher et al., 1982, voir section 2.2.1, p.63), les priorités étaient manipulées par l'assignation, pour deux sous-tâches, de niveaux de performance désirée. Ces niveaux étaient définis relativement à la performance plafond observée chez chaque participant dans une phase antérieure. Ainsi, par exemple, il pouvait leur être demandé d'atteindre 70 % de leur performance maximale pour une sous-tâche, et 50 % pour l'autre. Cette façon de spécifier des priorités pose problème. En effet la priorisation, en tant que processus, ne s'épuise pas dans la capacité à contrôler ses ressources conformément à une demande dynamique, mais inclut en amont la capacité à calculer, stocker, et utiliser les priorités respectives de tâches en présence, en fonction de leurs divers *attributs* (demande, importance, échéance...). Ainsi, en confondant priorité et demande, les auteurs court-circuitent le processus de priorisation, en assignant au participant le résultat comportemental qu'ils escomptent.

La même méthodologie a été plébiscitée par des auteurs comme Norman et Bobrow (1975) ou Navon et Gopher (1979), qui voyaient dans la modulation de la performance désirée, le seul moyen d'élucider la structure de nos ressources. Comme chez Gopher et al. (1982), les participants devaient attribuer un certain pourcentage de leurs ressources aux tâches disponibles. Il pouvait, par exemple, leur être demandé d'allouer 20 % de leurs ressources à la tâche A, contre 80 % à la tâche B. Si pertinente qu'elle soit pour évaluer la structure des tâches, ainsi que la nature des ressources du côté de l'opérateur, cette méthode n'est pas satisfaisante pour au moins une raison : elle laisse de côté une étape essentielle de la priorisation qu'est le calcul des priorités lui-même. Cela nous mène logiquement à établir, dès à présent une distinction entre les termes « importance » et « priorité ».

**Importance** Attribut objectif d'une tâche traduisant sa relation au but général assigné, indépendamment de sa difficulté. Exemple : si le but d'un opérateur consiste à maximiser un score, alors le nombre de points à gagner pour une tâche donnée sera un indicateur de son importance. Ce point est crucial, puisqu'il n'y a pas, *a priori*, de relation fonctionnelle entre importance et demande : une tâche très difficile peut ne servir à rien, et inversement, une tâche facile et routinière peut revêtir une importance capitale pour la bonne tenue d'un système de travail.

**Priorité** Représentation cognitive, résultant de la priorisation, et expliquant directement les choix exécutifs réalisés par un

opérateur. Cette distinction aura son importance lorsque, par exemple, une tâche de moindre importance pourra se voir néanmoins donner la priorité, en raison de sa demande, ou de son échéance par exemple.

D'autres choix terminologiques sont possibles et celui que nous présentons ici est arbitraire. Wickens et al. (2016) emploient par exemple le terme « priorité » là où nous employons celui d'« importance », et « attractivité » là où nous utilisons « priorité ». Ces choix terminologiques peuvent se discuter, mais il s'agirait d'une discussion secondaire. Ils répondent avant tout à la nécessité d'établir une distinction claire entre les construits *internes* et *externes* de priorité. Car en effet, dans la présente section, il s'agira principalement de définir le processus cognitif qui soutient la construction d'une représentation *interne* des priorités. Comme nous l'avons dit, les individus ne se contentent pas de contrôler leurs ressources pour se conformer à des demandes composites et dynamiques ; il leur faut aussi être en capacité d'évaluer, *par eux-mêmes*, les diverses priorités des tâches disponibles, et ce d'autant plus que l'environnement est dynamique, et que l'importance des tâches peut être amenée à évoluer rapidement. Certains auteurs intéressés par la conscience de situation dans le cockpit (Adams et Pew, 1990), ont par ailleurs avancé la nécessité de mieux comprendre ces processus d'évaluation des priorités, en même temps que les facteurs qui les influencent.

Ce sont ces mêmes questions que nous souhaitons ici reprendre à notre compte. *Comment* un opérateur évalue-t-il les priorités respectives des tâches en présence ? Peut-on décrire la chaîne de traitement de l'information qui mène l'opérateur à construire une représentation mentale des priorités ? Dans ce qui suit, nous nous attacherons à présenter les travaux qui ont traité de cette question.

### 3.1. La priorité attentionnelle des stimuli

Dans le domaine de l'attention sélective, on avance généralement que l'orientation des ressources subit l'effet conjoint d'influences ascendante et descendante : la saillance physique des stimuli, ainsi que les buts occurrence d'un individu, concourent à altérer la *probabilité* de la sélection attentionnelle, ce que les auteurs appellent la « priorité attentionnelle » (Serences et Yantis, 2006). Une série récente de travaux suggère que cette *priorité* est en fait contrôlée par un *historique des récompenses* de sorte que les stimuli les plus associés avec une récompense auront une plus grande probabilité de capturer automatiquement l'attention. . . ce qu'Anderson (2013) a appelé le phénomène de capture attentionnelle dirigée par la valeur (*value-driven attentional capture*).

Pour démontrer ce phénomène, les auteurs emploient généralement un paradigme en deux temps. Dans un premier temps, des récompenses distinctes sont associées à certaines propriétés physiques des stimuli (p.ex., couleur), que les participants doivent identifier le plus rapidement possible. Dans un second temps, la propriété en question (couleur) devient non-pertinente mais demeure présente, et les récompenses sont retirées. Par exemple, on demande alors aux participants d'identifier un mot, qui peut être écrit de différentes couleurs. Les résultats montrent qu'en général, les couleurs fréquemment associées à une forte récompense dans la première phase, entraînent une interférence plus élevée dans la seconde phase, laissant penser que la priorité attentionnelle, altérée dans la première phase continue de biaiser *involontairement* l'orientation des ressources (Anderson et al., 2011; Anderson, 2013; Sali et al., 2014). De ce point de vue, ce ne sont donc pas les propriétés physiques des stimuli, ni leur rapport à un but assigné, qui modulent la priorité attentionnelle, mais plutôt leur *valeur* apprise (ou historique), ce que l'on peut aussi appeler leur *contingence*<sup>4</sup> stimulus-récompense (Rescorla, 1969).

Ainsi, selon ces théories, chaque stimulation du champ visuel comporte une priorité attentionnelle, la force de cette priorité étant proportionnelle à sa *valeur*, c'est-à-dire à la fréquence de son association avec une récompense. Cette approche, si elle a le mérite de montrer la pertinence du concept de priorité, concentre son analyse au niveau des stimuli, et de leur capacité à capturer automatiquement l'attention. Ceci limite la portée explicative de ces théories, dans des domaines d'étude plus complexes, où le niveau d'intérêt porte sur l'exécution de tâches.

### 3.2. La priorité des stratégies computationnelles

Contrairement à la théorie présentée précédemment, qui postule une priorité attentionnelle dirigée par la valeur des *stimuli*, Kurzban et al. (2013) avancent que ce sont les « stratégies computationnelles » qui sont l'objet direct d'une évaluation. Cette dernière expression renvoie à l'application d'une ressource d'exécution à une ou plusieurs tâche(s) donnée(s). Par exemple, étant donné un ensemble de ressources cognitives, et un environnement composé de deux tâches (A et B), l'agent peut décider, dans un temps donné, d'allouer préférentiellement ses ressources à la tâche A ou à la tâche B, ou bien aux deux tâches simultanément. L'auteur avance en outre que ce choix – de

---

4. « Contingence » est un terme qui désigne la probabilité de co-occurrence de deux événements. Dans un jeu de cartes, la contingence forme-couleur est plus forte que la contingence nombre-couleur, puisque chaque forme est *toujours* associée à une couleur singulière, alors que chaque nombre peut être associé à quatre couleurs différentes.

nature stratégique – est fonction des *coûts d'opportunité* engendrée par chaque alternative.

### Le coût d'opportunité

Pour bien comprendre la notion de coût d'opportunité, faisons un petit détour chez les abeilles. L'abeille, organisme butineur par excellence, ne peut se trouver que sur une fleur (ressource) à la fois. En cela, elle fait face, comme tous les organismes, au problème de simultanéité, présenté page 53. Chaque opération de butinage a une *valeur*, puisque la fleur sur laquelle l'abeille se trouve, ainsi que sa propre activité, lui permettent de récolter une certaine quantité de pollen par unité de temps... ce qui détermine son *rendement*. Dans le même temps, l'activité est porteuse d'un *coût d'opportunité* : puisque la ressource en pollen de chaque fleur est en quantité finie, il arrive un moment où le rendement obtenu sur une fleur devient inférieur au rendement que l'abeille pourrait obtenir sur une fleur voisine. Dès lors, butiner une fleur dont le rendement est trop faible comporte un coût, puisque l'application de la même activité à une fleur voisine engendrerait une récolte plus forte : c'est le *coût d'opportunité*. Cette expression, équivalente au « coût de renoncement », a été définie par [Andreani \(1967\)](#), comme « le coût de ce qui est choisi en termes de ce que l'on cède mais aussi en termes de ce que l'on renonce à obtenir ». C'est, en d'autres termes, ce gain qui échappe à l'opérateur, par défaut ou par choix. Dans le domaine des abeilles, il a été montré que ce type de calculs (bénéfice réel *contre* coût d'opportunité) contribuait largement à la décision de quitter une fleur ([Gallistel, 1990](#)).

Dans le contexte qui nous occupe, [Kurzban et al. \(2013\)](#) avancent que chez l'homme, des mécanismes analogues soutiennent l'*évaluation des priorités*. Un peu comme l'abeille qui butine, l'opérateur dispose de mécanismes computationnels indépendants, dont le caractère limité l'oblige à ne les appliquer qu'à un sous-ensemble de tâches. Et comme chez l'abeille, l'exécution d'une tâche peut comporter un coût d'opportunité, puisque le rendement obtenu par l'allocation de ressources à une tâche, peut se trouver être inférieur au rendement potentiel que l'opérateur pourrait obtenir s'il appliquait ces mêmes ressources à une autre tâche. On pourrait dire que le coût d'opportunité correspond à la différences des bénéfices entre l'exécution occurrente et sa meilleure alternative (allouer ses ressources à une autre tâche par exemple).

Quoique cette dernière théorie propose une approche plus générale du problème de la priorisation, elle continue de reposer sur la *valeur* des tâches – que ces dernières soient exécutées ou en attente – sans chercher plus avant à définir ce qui constitue cette valeur. De ce fait, elle laisse la question de

la priorisation ouverte. La priorité d'une tâche ou d'un stimulus dépend à la fois de sa valeur et de la valeur des autres tâches/stimuli. Mais ce qui nous intéresse c'est, en définitive, la façon dont cette valeur est construite. En particulier, comme nous l'avons dit plus tôt, on peut supposer que la valeur d'une tâche ne se réduit pas à son utilité espérée, ou à sa contribution au rapprochement du but, mais inclut aussi d'autres paramètres, tels que sa demande, sa saillance, etc.

Finalement, si les théories classiques de la performance multitâche mettent l'accent sur la relation *demande-ressources*, les théories que nous venons de présenter privilégient la notion de valeur, sans lui donner de corps. Encore une fois, l'objet premier de cette thèse ne consiste pas à montrer comment les opérateurs utilisent des indices de valeurs ou d'importance, mais plutôt à montrer comment ils *les évaluent*. En contexte opérationnel, la priorité d'une tâche ne correspond pas strictement à sa capacité à « récompenser » l'opérateur : il s'agirait plutôt d'un construit *multifactoriel*, rendant compte de l'intégration par l'agent de paramètres multiples de la situation. Les travaux que nous allons présenter maintenant viennent documenter cette dernière idée.

### 3.3. Des attributs des tâches à leur priorité

Au-delà de l'intérêt qu'il peut y avoir à étudier la façon dont les sujets utilisent la valeur des tâches pour diriger leur action, les travaux que nous venons de présenter comportent une limite importante. En effet, tous réduisent la priorité à la valeur, et souvent la valeur à la récompense : comme si nos stratégies étaient dirigées par la seule poursuite d'une utilité espérée, elle-même réduite à un *gain*. À quoi nous opposerions au moins deux arguments. Tout d'abord, en situation écologique, ce genre de gain n'existe pas ou rarement, en dehors du salaire. Les stratégies d'un pilote, par exemple, ne correspondent pas à une matrice de gains appliquée aux tâches, et à laquelle celui-ci se conformerait. De plus, quand bien même il serait possible de réduire chaque tâche à une valeur quantifiable, nous avançons que cela ne suffirait pas à expliquer le comportement de l'opérateur. Ce dernier, en effet, poursuit un ou plusieurs but(s), et ses choix traduisent cela. Une tâche de *faible importance* pourrait se voir attribuée une priorité forte momentanément, en raison de sa *proche échéance*. C'est que la logique d'un système dynamique n'est pas une logique strictement économique. Il ne s'agit pas de maximiser un gain, mais de conduire un système dans son état-but.

Conformément à cette idée, nous pensons que le *rapprochement du but* est ce qui constitue la *valeur* d'une tâche. Ainsi, il ne faut pas voir l'opérateur comme une entité strictement économique, mais comme un agent résolvant un problème attentionnel : celui de décider de l'allocation de ses ressources

étant donnée la complexité de la situation, qui n'est pas encore stabilisée dans son état-but. Afin de rendre compte de cette complexité, il est pertinent de considérer le problème de la priorisation autrement. Il ne s'agit pas de savoir comment un opérateur conforme sa stratégie à une matrice de gains, mais de comprendre comment il réalise l'intégration d'informations multiples (attributs) à propos des tâches. Finalement, cela revient non pas à évacuer tout à fait la notion d'utilité espérée, mais à l'élargir au contraire, en considérant que la priorisation est un problème théorique de décision, où la *priorité* de chaque tâche doit être évaluée à partir d'un ensemble d'informations disponibles, et pas uniquement à partir d'une valeur artificielle. À la différence des approches présentées plus haut, il ne s'agit pas ici de comprendre comment les opérateurs *utilisent les valeurs* de chaque tâche, mais plutôt de comprendre *comment ils les déduisent*. Dans cette perspective, chaque tâche est analogue à un problème particulier d'utilité multi-attributs (MAU pour *multiattribute utility*; [Edwards et Tversky, 1967](#)). De tels modèles doivent permettre de déterminer les variables que l'opérateur considère, les poids respectifs de ces variables, ainsi que la valeur d'utilité (*priorité*) qui en résulte.

Une fois les attributs clairement identifiés, l'agent détermine les poids relatifs qu'il souhaite leur donner. L'achat d'une voiture est un exemple simple de ce type de problèmes. L'acheteur peut donner beaucoup de poids à des paramètres tels que la fiabilité et le coût du véhicule, et moins de poids à sa couleur ou sa consommation énergétique. En conséquence, un ensemble d'attributs se trouvent ordonnés relativement à leur pertinence pour la décision d'achat. De la même façon, dans toute situation complexe, les opérateurs doivent évaluer rapidement la priorité des tâches nouvelles, en fonction de l'état occurrent du système. L'identification des informations que les opérateurs utilisent, ainsi que des poids respectifs qu'ils leur attribuent, constitue donc une étape importante pour la compréhension des phénomènes de priorisation. Nous allons maintenant présenter des travaux qui ont tenté cette identification, dans les domaines du pilotage d'aéronefs et des situations multitâches fondamentales.

### 3.3.1. Les attributs de priorité dans le cockpit

Malgré une évolution importante de l'automatisation dans le cockpit, la planification et la priorisation des tâches demeure l'apanage des pilotes, principalement en situation d'urgence. Par conséquent, il existe de nombreuses procédures et recommandations, qui spécifient comment les pilotes *devraient* prioriser les différents buts et tâches, tout au long du vol. Par exemple, des rapports récents de la fondation pour la sécurité aérienne mettent en avant un ensemble de recommandations pensées pour éviter les problèmes

de priorisation et de coordination, dans les phases les plus difficiles du vol (décollage et atterrissage). Voici un exemple de recommandations :

1. *Minimiser les tâches non-essentiels pendant les phases de montée et de descente (certains opérateurs considèrent les 1000 derniers pieds comme un seuil);*
2. *Surveiller les opérations du pilote automatique pour confirmer la justesse de l'altitude de vol autorisée et pour respecter les restrictions d'altitude ou de temps;*
3. *Planifier les tâches qui empêchent le traitement des communications avec le contrôle, à des moments de basse activité de communications;*
4. *Lorsqu'un pilote ne surveille pas la fréquence de communication avec le contrôle, compte tenu de son activité (p.ex., appels avec la compagnie aérienne) ou de son absence temporaire du cockpit, l'autre pilote doit :*
  - (a) *Confirmer le transfert de rôle pour les communications radio et le contrôle de l'appareil, si possible;*
  - (b) *Vérifier que le volume radio est suffisamment élevé pour recevoir un appel du contrôle;*
  - (c) *Faire plus attention à écouter/confirmer/lire de façon redondante (à cause de l'absence de validation croisée);*
  - (d) *Lorsqu'il est à nouveau disponible, communiquer à l'autre pilote l'ensemble des nouvelles informations pertinentes, ainsi que tout changement dans les autorisations ou instructions en provenance du contrôle.*

Traduit de [Flight Safety Foundation \(2009b\)](#)

Bien sûr, cette recommandation n'a aucun caractère exhaustif ni prédictif, et il existe bien d'autres supports qui soutiennent la priorisation dans le cockpit : comme le manuel des opérations de vol, les *checklists* ou encore l'entraînement au respect des procédures. Toutefois l'exemple dénote l'importance de la priorisation dans le cockpit, et l'attention particulière qui lui est accordée dans les recommandations qui peuvent être délivrées aux pilotes. À ce titre, il faut mentionner la fameuse règle ANCS, pour *Aviate > Navigate > Communicate > manage Systems* ([Jonsson et Ricks, 1995](#)). Cette règle simple spécifie une hiérarchie, selon laquelle toute tâche appartenant à une catégorie (p.ex., piloter) doit avoir la priorité sur les tâches de catégorie inférieure (p.ex., communiquer). Il s'agit d'une règle très bien connue des pilotes. Toutefois, comme le relèvent [Colvin et al. \(2005\)](#) et [Funk \(1991\)](#), nombreuses sont les situations où ce schéma n'est pas respecté par les pilotes, et où les décisions prises violent cette règle.

Dans des études menées en simulateurs de vol, [Funk \(1991\)](#) a identifié au moins trois autres stratégies possibles de priorisation :



<b>Sévérité perçue</b>	Lorsque les pilotes déterminent la priorité de chaque tâche en fonction de ce qu'ils estiment être le problème le plus critique à régler
<b>Procédure</b>	Lorsque les pilotes s'orientent vers les tâches pour lesquelles il existe des procédures bien définies.
<b>Interruptions</b>	Lorsque l'allocation des ressources est principalement altérée par la survenue d'un évènement distrayant/interruptif. Dans ce cas, les pilotes poursuivent généralement la réalisation de la tâche jusqu'à son achèvement, ou jusqu'à une autre interruption.

Ces études ont mis en évidence que ces stratégies menaient à des degrés divers de performance, selon les domaines considérés. Par exemple, les stratégies de priorisation dirigées par la sévérité perçue amenaient une meilleure gestion de la charge de travail personnelle. Alors que pour ce qui concernait la surveillance du système, le respect de la règle ANCS donnait les meilleurs résultats. Les autres stratégies s'avéraient globalement nuisibles.

En outre, il existe au moins une autre typologie des stratégies de priorisation dans le cockpit, que nous présentons ci-après.

### **Statut, procédure et valeur**

Colvin et al. (2005) ont cherché à mettre en évidence, d'une façon systématique, les déterminants principaux de la priorisation dans le cockpit. Pour ce faire, il ont utilisé une méthode d'élicitation cognitive. Les pilotes participaient à deux scénarii de vol en simulateur et des questions leur étaient régulièrement posées. Ces questions incitaient les pilotes à expliciter les raisons de leurs choix exécutifs. Selon le scénario, la méthode pouvait être intrusive – les questions étaient alors posées lors de courtes pauses dans le scénario –, ou rétrospectives – la passation était alors filmée et les questions étaient posées au pilote lors d'un visionnage. De ces entretiens, l'auteur a pu extraire un ensemble de 12 facteurs à partir desquels il a construit une typologie de trois facteurs :

<b>Le statut</b>	Le statut (ou <i>l'état</i> ) des tâches était le facteur le plus souvent (52%) évoqué par les pilotes pour justifier le choix de leur stratégie. Lorsque le statut d'une tâche n'était pas satisfaisant (p.ex., être à 12000 pieds lorsque l'altitude assignée est de 15000 pieds), celle-ci se voyait volontairement allouée des ressources, jusqu'à ce que son statut (re)devienne satisfaisant. De la même façon, lorsqu'une tâche critique avait un statut satisfaisant, les
------------------	---



pilotes pouvaient libérer la ressource correspondante pour l'attribuer à une autre tâche, moins critique.

**La procédure** Outre le statut des tâches, la procédure avait une grande influence (35%) sur l'allocation des ressources. Lorsque, par exemple, une instruction du contrôle enjoignait les pilotes de descendre à une altitude donnée, la tâche recevait immédiatement les ressources appropriées. Pareillement lorsqu'un virage devait être effectué en un point de navigation donné, l'atteinte de ce point déclenchait une procédure de virage, nécessairement *respectée* par les pilotes. Ce point rejoint une idée développée plus tôt (section 1, p.56), selon laquelle la priorisation ne s'incarne pas nécessairement dans des processus contrôlés et manifestes, mais aussi dans des procédures routinières, qui expriment, par elles-mêmes, un certain ordonnancement des opérations de vol.

**La valeur** Enfin, la notion de valeur renvoyait à l'importance des tâches durant le vol. Cette importance était fortement liée aux conséquences de la tâche, c'est à dire à son degré de sévérité en cas d'échec (p.ex., mise en danger des passagers, violations de la réglementation, violations des assignations du contrôle). Ce facteur était moins évoqué (13%) que les deux précédents. Toutefois, comme l'avance l'auteur, cela n'en fait pas un facteur négligeable. En effet, les situations proposées aux pilotes, pendant l'élicitation cognitive, étaient nominales, et l'auteur ne manipulait pas la charge de travail, dont on sait par ailleurs qu'elle peut avoir une influence sur les stratégies de priorisation (voir [Raby et al., 1990](#)). Par ailleurs, cette notion n'est pas sans rappeler celle de sévérité perçue, évoquée plus haut, comme stratégie optimale pour la gestion de la charge de travail. Si donc ce facteur présente un poids relativement faible dans une situation nominale, rien ne permet d'affirmer qu'il conserverait ce même poids en situation d'urgence.

De ces résultats, il ressort une certaine cohérence, mais aussi quelques disparités. Les deux auteurs s'accordent sur l'importance des procédures, qu'il s'agisse de la hiérarchie ANCS, comme de procédures systèmes plus locales. [Colvin et al. \(2005\)](#) avancent, en outre, que le statut des tâches a un rôle prépondérant (52%) dans la détermination de l'allocation des ressources. Ce dernier facteur renvoie simplement à la comparaison, par les opérateurs, entre

l'état occurrent du système et son état-but, ainsi qu'aux actions correctives correspondantes. Par ailleurs, le facteur statut correspond strictement au comportement régulateur élémentaire de tout opérateur : soit une succession de comparaisons (tests) et de corrections (opérations), comme nous l'avons illustré avec la boucle TOTE de Miller et al. (1960) au chapitre 1 (p.14).

La notion de *valeur* des tâches pose en revanche davantage de problèmes. Alors que Funk (1991) met en avant qu'une priorisation dirigée par la *sévérité perçue* permet de gérer efficacement la charge de travail, Colvin et al. (2005) montrent qu'il ne s'agit que d'un déterminant minoritaire de la priorisation (13%). Par conséquent, il paraît plausible que le poids des différents facteurs sur l'allocation des ressources puisse évoluer en fonction des situations et que, par exemple, une situation d'urgence engendre des stratégies de priorisation spécifique. Une part du travail que nous présenterons ci-après (p. 119) devra permettre d'apporter des réponses à cette question. Par ailleurs, ces mêmes questions ont été adressées dans des contextes plus fondamentaux de simulations de situations multitâche.

### 3.3.2. Les attributs de priorité en situation multitâche

Dans un contexte plus fondamental, une série d'études plus récentes a cherché à mettre en évidence les poids respectifs de différents attributs de tâches, sur les stratégies d'allocation des ressources (Gutzwiller et al., 2014; Wickens et al., 2015, 2016). Selon ces auteurs, la *priorisation* est analogue à un processus de décision multiattributs. Dans un environnement multitâche, l'*attractivité* (c.-à-d., priorité dans notre terminologie) d'une tâche donnée dépendrait directement de quatre de ses attributs (saillance, importance, intérêt, difficulté), ainsi que de ces mêmes attributs, pour les tâches concurrentes. Chacun de ces attributs comporterait un *poids* ainsi qu'une *polarité* propres, lesquels moduleraient l'*attractivité* des sous-tâches correspondantes.

La définition de ces différents paramètres était basée sur des revues de littérature spécifiques à chaque attribut considéré. Par exemple, étant donné un principe d'évitement de l'effort cognitif (p.ex., Kool et al., 2010), les auteurs avancent qu'une tâche plus facile verra son attractivité renforcée avec un poids de 0.63. Ce qui signifie que, *toutes choses étant égales par ailleurs*, une tâche plus facile aura 63% de chance d'être sélectionnée. L'ensemble des prédictions en termes de poids et de polarité pour chaque attribut a été formalisée dans le modèle STOM (pour *Strategic Task Overload Management*, Tableau 3.2). En résumé, la difficulté y transparaît comme un facteur globalement répulsif (polarité -); l'importance, l'intérêt, et la saillance, comme des facteurs attractifs (polarité +).

**Tableau 3.2** – Polarités et poids de chaque attribut, dans le modèle STOM (Wickens et al., 2016). Le poids de certains paramètres n'est pas encore précisément défini (N.D).

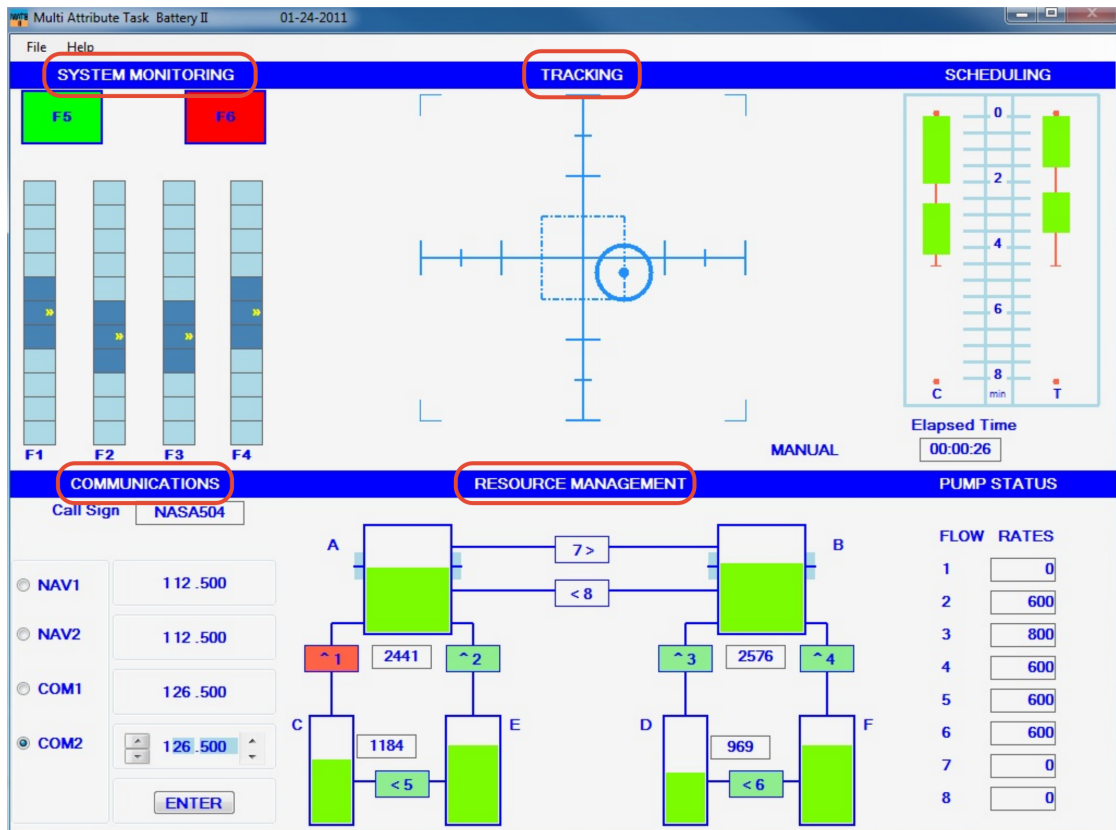
Paramètre	Polarité	Poids	Description
Difficulté	–	.63	Charge mentale imposée par la tâche
Importance	+	N.D	Valeur de la tâche au regard du but
Intérêt	+	N.D	Valeur de la tâche au regard de l'opérateur
Saillance	+	N.D	Capacité d'une tâche à capturer l'attention de l'opérateur

Bien que l'approche correspond à la vision que nous nous faisons du phénomène de priorisation, il s'agit là d'un travail tout à fait récent, et le modèle que les auteurs ont commencé à élaborer présente des imperfections. Tout d'abord, comme on peut le voir dans le Tableau 3.2, la plupart des attributs n'y sont définis que par leur polarité. De plus, malgré les bonnes performances de ce modèle dans des situations contrôlés, certains résultats contradictoires ont émergé.

La première contradiction a trait à l'attribut de difficulté. Des résultats ont montré que la polarité de cet attribut pouvait se trouver inversée, selon qu'il concernait une tâche concurrente (OT) ou une tâche concurrente (CT). Plus précisément, la difficulté présentait une polarité négative pour une CT, et une polarité positive pour une OT. Autrement dit, les tâches plus difficiles sont globalement évitées, mais les opérateurs y passent plus de temps une fois qu'ils s'y sont engagés.

Le deuxième problème concerne l'attribut d'importance. Selon les conditions expérimentales, celui-ci ne montrait pas le même poids, voire n'avait plus de poids du tout. Dans l'une de leurs expérimentations (Gutzwiller et al., 2014, expérimentation 1), les participants devaient réguler un environnement multitâche – le MATBII (pour *multi-attribute test battery*; Santiago-Espada et al., 2011, Figure 3.10, p.88). Deux groupes de participants recevaient deux consignes différentes de priorisation. Le premier groupe devait prioriser une tâche en particulier (la tâche de poursuite visuo-manuelle) et le second devait réaliser toutes les tâches (4) du mieux que possible. La difficulté de la tâche de poursuite était manipulée de façon répétée, par la modulation de son taux de rafraîchissement. Les auteurs ont montré que la tâche recevait 12% de visites en moins lorsqu'elle était difficile, et que l'importance (facteur inter-groupe) n'avait aucun effet. De plus, en ce qui concerne deux des autres tâches (communication et gestion des ressources), les participants choisissaient deux fois plus souvent la tâche la plus facile/peu importante (communication), plutôt que la tâche difficile/importante (gestion des ressources).

Notons bien que seule l'importance relative de la tâche de poursuite était réellement manipulée dans cette expérimentation, les caractères



**Figure 3.10** – Environnement multitâche MATBII. Se comprenant de quatre tâches (de gauche à droite, de haut en bas) : une tâche de surveillance, une tâche de poursuite, une tâche de communication et une tâche de gestion des ressources. En haut à droite, un affichage donne des indications sur la charge de travail future estimée (Santiago-Espada et al., 2011, pour le détail des tâches)

important/peu important et facile/difficile des *autres* tâches étaient évalués subjectivement par le participant, après la passation. Ceci pose problème puisqu'en l'absence de consignes plus précises sur l'importance de ces autres tâches, on peut se demander comment des participants pouvaient être en mesure de les *évaluer* par eux-mêmes, sauf à les associer avec d'autres de leurs attributs, plus aisément identifiables, comme leur demande. Ainsi, dans ce contexte, les participants ont pu juger de l'importance d'une tâche en fonction de sa difficulté. De plus, comme le mentionnent les auteurs, la tâche facile et peu importante (communication), était aussi la tâche la plus saillante, puisque les requêtes provenant de cette tâche étaient sonores.

Enfin, lorsque les auteurs considéraient le temps passé<sup>5</sup> sur les tâches, ils observaient une interaction marginalement significative entre les conditions de priorité (uniquement la tâche de poursuite *ou* toutes) et de demande de la tâche de poursuite (facile/difficile). Concrètement, la différence de temps passé sur la tâche de poursuite, entre les conditions facile et difficile, était significative lorsque la poursuite était plus importante, ce qui n'était pas le cas lorsque toutes les tâches avaient la même importance objective.

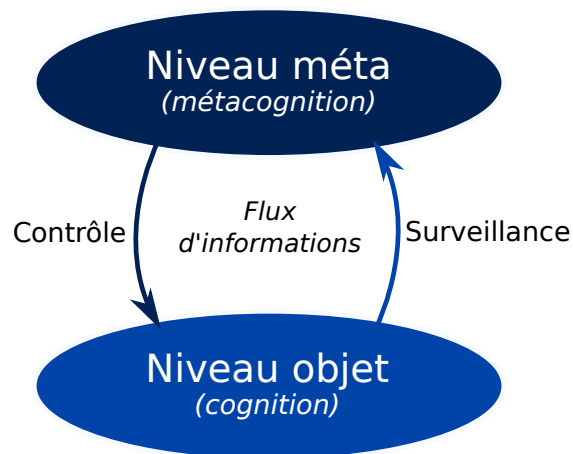
Comme le soulignent les auteurs, ces études ne sont pas suffisamment systématiques et ne permettent pas d'évaluer correctement de potentielles interactions entre plusieurs attributs. Par exemple, quelle tâche serait « choisie » entre une tâche facile/peu importante (+/-) et une tâche difficile/importante (-/+)? La valeur accordée à un attribut est-elle modulée par l'état des autres attributs? Dans leur dernier article, les auteurs posaient clairement la question de savoir quelle serait la forme de ce compromis stratégique entre des attributs aux polarités contraires (Wickens et al., 2016, p.325). Au regard des disparités que nous venons d'évoquer, du rôle ambiguë de l'attribut d'importance, au sein même de cette étude, comme à travers la littérature, il apparaît clairement un besoin de situations expérimentales plus contrôlées, afin de mettre à jour les éventuelles interactions entre des attributs de tâche, et donner une image plus précise de la priorisation humaine dans des situations complexes. Cette question sera au centre de notre problématique (chapitre 5, p.119).

### 3.4. Un mécanisme métacognitif ?

Enfin, un dernier point qu'il nous semble important d'aborder dans ce chapitre concerne la dimension métacognitive de la priorisation. En psychologie, on parle de métacognition pour évoquer toute connaissance ou

---

5. Le temps passé sur une tâche correspond au temps cumulé de fixations oculaires qu'elle a reçues.



**Figure 3.11** – Modèle élémentaire de la métacognition, par Nelson (1990). Le niveau méta entretient deux types de relations avec le niveau d'objet selon la direction du flux informationnel. La *surveillance* correspond à la vérification, par le niveau méta du niveau de performance atteint par le niveau d'objet pour un but donné (p.ex., réaliser deux tâches simultanément du mieux que possible). Le *contrôle* correspond à une modification des stratégies cognitives employées au niveau d'objet, sur la base des informations acquises par la surveillance.

processus dont l'objet porte sur la cognition elle-même. L'exemple le plus classique de phénomènes métacognitifs nous est donné par Flavell (1979). Dans son article, il évoque des groupes d'élèves de maternelle et de primaire, auxquels on demande de retenir un certain nombre de choses jusqu'à ce qu'ils soient *certain*s de pouvoir les rappeler parfaitement. Les enfants de primaire étudiaient pendant un moment, annonçaient qu'ils étaient prêts, et ils l'étaient généralement, c'est-à-dire qu'ils réalisaient un rappel parfait. Les enfants de maternelle étudiaient aussi, disaient qu'ils étaient prêts, mais ils ne l'étaient pas réellement. Autrement dit la connaissance qu'ils avaient de leur propre connaissance n'était pas aussi bonne que chez les enfants de primaire. Leurs habiletés métacognitives n'étaient pas autant développées.

Sans entrer dans trop de détails, mentionnons un modèle simple de métacognition, fourni par Nelson (1990, Figure 3.11). Celui-ci comporte deux niveaux, un niveau méta et un niveau d'objet, reliés par des processus de *surveillance* et de *contrôle*. Le niveau d'objet correspond aux processus et états cognitifs en eux-mêmes, tels qu'ils soutiennent le traitement de l'information.

Si le rôle de la métacognition est fort bien documenté dans les domaines de l'apprentissage et de la mémoire (Ackerman, 2014; Koriat et al., 2014), il reste beaucoup de travail à réaliser dans le domaine de la performance multitâche (Finley et al., 2014). En ce qui nous concerne, il nous paraît particulièrement important, dans le cadre de cette thèse, de parvenir à déterminer plus avant la

nature du processus de priorisation, au regard de ces aspects métacognitifs : la priorisation est-elle un processus de niveau métacognitif, ou un processus de niveau d'objet ?

Quoique dans leur théorie de la *Threaded Cognition*, Salvucci et Taatgen (2011a) n'accordent qu'un rôle mineur à la priorisation, ils sont ceux qui la rangent le plus clairement au rang des mécanismes métacognitifs. Pour eux, il s'agit simplement d'un processus chargé de surveiller la performance et de gérer – éventuellement – l'exécution des autres processus, en modulant par exemple leur intensité. C'est elle qui, par exemple, en soutenant l'évaluation des priorités, permettrait la sélection des stratégies attentionnelles les mieux appropriées, au niveau d'objet. Toutefois, nombre de travaux que nous avons présentés au fil de cette revue donnent une autre image de la priorisation. Chez Gopher et al. (1982) par exemple, la priorisation est une habileté : la capacité à déployer une allocation des ressources efficace et conforme à la structure objective de l'environnement. La priorisation y transparaît comme un processus *objet*, sur lequel des régulations sont possibles puisque, nous l'avons vu, celles-ci montraient tous les traits d'une habileté : *objet* possible d'apprentissages. Autre exemple : chez Loft et al. (2007), la priorisation entretient des liens forts avec le niveau métacognitif, sans pour autant se confondre avec lui (Figure 3.2, p.56). Autrement dit, dans cette perspective, la priorisation est une composante centrale de la stratégie des opérateurs, mais demeure un processus d'objet, sur lequel une surveillance et un contrôle sont possibles.

Il faut se garder ici de trancher entre ces deux points de vue, mais garder à l'esprit cette difficulté, car il s'agit d'un élément décisif pour circonscrire la nature de la priorisation.

## 4. Conclusion

La priorisation n'est pas un concept consensuel. La revue que nous venons de présenter laisse apparaître de fortes disparités. Disparité terminologique d'abord. On a vu que tous les travaux présentés n'usaient pas nécessairement du concept de priorisation pour désigner l'évaluation des priorités, et n'usaient pas non plus des mêmes conventions pour désigner les différents attributs des tâches. La priorité est, pour les uns, l'une des dimensions objectives d'une tâche (Gopher et al., 1982; Wickens et al., 2015), et chez les autres, un construit cognitif biaisant l'allocation des ressources attentionnelles (p.ex., Anderson, 2013). Ensuite, nous avons observé une disparité des niveaux d'analyse : les auteurs s'intéressant alternativement à la priorité des stimuli (Serences et Yantis, 2006), des tâches (Wickens et al., 2015), des opérations mentales (ou



*computations* ; Kurzban et al., 2013), ou des buts (Duncan, 1990). Enfin, disparité théorique, puisque nous avons distingué deux approches différentes de l'étude de la priorisation : une approche économique, intéressée par le rapport entre stratégie attentionnelle et *valeur* (p.ex., Anderson, 2013) ; et une approche plus cognitive, cherchant à élucider les mécanismes d'évaluation de la valeur d'une tâche en environnement complexe, et ses facteurs d'influence (Adams et Pew, 1990; Colvin et al., 2005; Gutzwiller et al., 2014).

Malgré ces disparités, il n'est pas impossible d'établir une cohérence entre tous ses travaux. La priorisation y transparait comme un mécanisme d'évaluation de la *valeur* (des stimuli, tâches etc.), qui occupe un rôle central dans la planification des tâches et l'allocation des ressources. Toutefois, seules les approches multifactorielles fournissent des éléments quant aux informations objectives – que nous avons nommées « attributs » – qui dirigent cette construction de la valeur. Dans ce cadre, le rôle joué par l'attribut d'*importance* s'est montré problématique. En effet, à travers les études, l'influence de ce dernier n'apparaissait pas systématiquement, et semblait être soumise à son tour à l'influence d'autres facteurs, tels que la difficulté.

Désormais il nous paraît possible, malgré ces questions, d'enrichir notre définition de la priorisation. Déjà nous l'avons définie (p.75) comme un *processus cognitif reposant principalement sur la capacité d'un agent à contrôler ses propres ressources, et dont la fonction première consiste à répondre à la simultanéité des sollicitations en favorisant l'exécution des tâches prioritaires*<sup>6</sup>. Nous pouvons dès lors ajouter que ce processus repose sur l'évaluation des priorités respectives des tâches en présence, par le traitement d'un ensemble d'attributs (difficulté, importance, saillance...), indiquant leur valeur au regard du but assigné. Cette définition situe son analyse au niveau des tâches. Ce choix est arbitraire et intéressé. Les attributs des opérations mentales et des buts sont moins facilement manipulables et observables que les attributs des tâches. Quant aux stimuli, leur étude présente un intérêt moindre pour notre travail, compte tenu du caractère complexe des situations que nous souhaitons comprendre. Néanmoins, si nous nous focalisons ici sur les tâches, celles-ci n'ont pas d'exclusivité, et il ne faudra pas perdre de vue que les mécanismes que nous souhaitons identifier ici pourraient concerner d'autres niveaux de réalité que celui des tâches (p.ex., Anderson, 2013; Loft et al., 2007; Kurzban et al., 2013).

Dans le prochain chapitre, nous effectuerons un bref détour, pour établir la possibilité d'enrichir l'étude de la priorisation par l'emploi des techniques

---

6. Que la priorisation serve à favoriser l'exécution des tâches prioritaires, cela peut passer pour une tautologie. Et cela en est une, tant que justement nous ne déterminons pas ce que recouvre le caractère « prioritaire » d'une tâche, pour l'opérateur, ce qui est l'objet de cette thèse.



d'oculométrie. Nous élaborerons ensuite (chapitre 5, p.119) la problématique de ce travail, en nous basant sur la revue de littérature.

## Bibliographie du chapitre

- Ackerman, R. (2014). The diminishing criterion model for metacognitive regulation of time investment. *Journal of Experimental Psychology : General*, 143(3) :1349.
- Adams, M. J. et Pew, R. W. (1990). Situational awareness in the commercial aircraft cockpit : A cognitive perspective. In *Digital Avionics Systems Conference, 1990. Proceedings., IEEE/AIAA/NASA 9th*, pages 519–524.
- Anderson, B. A. (2013). A value-driven mechanism of attentional selection. *Journal of Vision*, 13(3) :7.
- Anderson, B. A., Laurent, P. A., et Yantis, S. (2011). Value-driven attentional capture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(25) :10367–10371.
- Andreani, E. (1967). Le coût d'opportunité. *Revue économique*, 18(5) :840–858.
- Barabasi, A.-L. (2005). The origin of bursts and heavy tails in human dynamics. *Nature*, 435(7039) :207–211.
- Boot, W. R., Basak, C., Erickson, K. I., Neider, M., Simons, D. J., Fabiani, M., Gratton, G., Voss, M. W., Prakash, R., et Lee, H. (2010). Transfer of skill engendered by complex task training under conditions of variable priority. *Acta psychologica*, 135(3) :349–357.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., et Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological review*, 108(3) :624.
- Brickner, M. et Gopher, D. (1981). Improving time-sharing performance by enhancing voluntary control on processing resources. Technical report, DTIC.
- Chou, C.-C., Madhavan, D., et Funk, K. (1996). Studies of cockpit task management errors. *The International Journal of Aviation Psychology*, 6(4) :307–320.
- Cobham, A. (1954). Priority assignment in waiting line problems. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(1) :70–76.
- Colvin, K., Funk, K., et Braune, R. (2005). Task prioritization factors : Two part-task simulator studies. *The International Journal of Aviation Psychology*, 15(4) :321–338.
- Damos, D. L. et Wickens, C. D. (1980). The identification and transfer of timesharing skills. *Acta Psychologica*, 46(1) :15–39.
- Duncan, J. (1990). Goal weighting and the choice of behaviour in a complex world. *Ergonomics*, 33(10-11) :1265–1279.
- Edwards, W. et Tversky, A. (1967). *Decision making : selected readings*, volume 8. Penguin Books.

- Elsmore, T. F. (1994). Synwork1 : A pc-based tool for assessment of performance in a simulated work environment. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 26 :421–426.
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., et Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological review*, 100(3) :363.
- Finley, J. R., Benjamin, A. S., et McCarley, J. S. (2014). Metacognition of multitasking : How well do we predict the costs of divided attention? *Journal of experimental psychology : applied*, 20(2) :158.
- Flavell, J. H. (1979). Metacognition and cognitive monitoring : A new area of cognitive–developmental inquiry. *American psychologist*, 34(10) :906.
- Flight Safety Foundation (2009). Fsf alar briefing note 3.2 : Altitude deviations. Technical report, Flight Safety Foundation.
- Freed, M. (2000). Reactive prioritization. Non-publié.
- Funk, K. (1991). Cockpit task management : Preliminary definitions, normative theory, error taxonomy, and design recommendations.
- Gallistel, C. R. (1990). *The organization of learning*. The MIT Press.
- Gopher, D., Brickner, M., et Navon, D. (1982). Different difficulty manipulations interact differently with task emphasis : evidence for multiple resources. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 8(1) :146.
- Gopher, D., Kramer, A., Wiegmann, D., et Kirlik, A. (2007). *Attention : From theory to practice*, chapter Emphasis change as a training protocol for high-demand tasks, pages 209–224. Oxford University Press New York, NY.
- Gopher, D. et Navon, D. (1980). How is performance limited : Testing the notion of central capacity. *Acta Psychologica*, 46(3) :161–180.
- Gopher, D. et North, R. A. (1974). The measurement of attention capacity through concurrent task performance with individual difficulty levels and shifting priorities. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 18 of 4, pages 480–485.
- Gopher, D., Weil, M., et Siegel, D. (1989). Practice under changing priorities : An approach to the training of complex skills. *Acta Psychologica*, 71(1) :147–177.
- Gutzwiller, R. S., Wickens, C. D., et Clegg, B. A. (2014). Workload overload modeling an experiment with matb-ii to inform a computational model of task management. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 58 of 1, pages 849–853.
- Hambrick, D. Z., Oswald, F. L., Darowski, E. S., Rench, T. A., et Brou, R. (2010). Predictors of multitasking performance in a synthetic work paradigm. *Applied cognitive psychology*, 24 :1149–1167.

- Iani, C. et Wickens, C. D. (2007). Factors affecting task management in aviation. *Human Factors*, 49(1) :16–24.
- Johnston, W. A., Griffith, D., et Wagstaff, R. R. (1972). Speed, accuracy, and ease of recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11(4) :512–520.
- Jonsson, J. E. et Ricks, W. R. (1995). Cognitive models of pilot categorization and prioritization of flight-deck information. Technical report, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, United States.
- Katidioti, I. et Taatgen, N. A. (2014). Choice in multitasking : How delays in the primary task turn a rational into an irrational multitasker. *Human Factors*, 56(4) :728–736.
- Kleinrock, L. (1976). *Queueing systems, volume 2 : Computer applications*, volume 66. wiley New York.
- Koh, R. Y., Park, T., Wickens, C. D., Ong, L. T., et Chia, S. N. (2011). Differences in attentional strategies by novice and experienced operating theatre scrub nurses. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 17(3) :233.
- Kool, W., McGuire, J. T., Rosen, Z. B., et Botvinick, M. M. (2010). Decision making and the avoidance of cognitive demand. *Journal of Experimental Psychology : General*, 139(4) :665.
- Kool, W., McGuire, J. T., Wang, G. J., et Botvinick, M. M. (2013). Neural and behavioral evidence for an intrinsic cost of self-control. *PloS one*, 8(8) :–72626.
- Koriat, A., Ackerman, R., Adiv, S., Lockl, K., et Schneider, W. (2014). The effects of goal-driven and data-driven regulation on metacognitive monitoring during learning : A developmental perspective. *Journal of Experimental Psychology : General*, 143(1) :386.
- Kramer, A. F., Larish, J. F., et Strayer, D. L. (1995). Training for attentional control in dual task settings : A comparison of young and old adults. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 1(1) :50.
- Kurzban, R., Duckworth, A., Kable, J. W., et Myers, J. (2013). An opportunity cost model of subjective effort and task performance. *The Behavioral and Brain Sciences*, 36(6) :661–679.
- L10111973 (1973). Aircraft accident report, eastern air lines inc., l-1011, n310ea. Technical Report NTSB-AAR-73-14, National Transportation Safety Board, Bureau of Aviation Safety.
- Levy, J. et Pashler, H. (2008). Task prioritisation in multitasking during driving : Opportunity to abort a concurrent task does not insulate braking responses from dual-task slowing. *Applied Cognitive Psychology*, 22(4) :507–525.
- Loft, S., Sanderson, P., Neal, A., et Mooij, M. (2007). Modeling and predicting mental workload in en route air traffic control : Critical review and broader implications. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(3) :376–399.

- Logan, G. D. et Gordon, R. D. (2001). Executive control of visual attention in dual-task situations. *Psychological review*, 108(2) :393.
- Mattes, S. (2003). The lane-change-task as a tool for driver distraction evaluation. *Quality of Work and Products in Enterprises of the Future*, 57.
- Matton, N., Paubel, P., Cegarra, J., et Raufaste, E. (2016). Differences in multitask resource reallocation after change in task values. *Human Factors*.
- McKendrick, R. et Parasuraman, R. (2012). Effect of different types of variable and adaptive training on skill acquisition in dual verbal-spatial working memory tasks. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 56, page 1426.
- Meyer, D. E. et Kieras, D. E. (1997). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance : Part 1. basic mechanisms. *Psychological Review*, 104(4) :3–65.
- Miller, E. K. et Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual review of neuroscience*, 24(1) :167–202.
- Miller, G. A., Galanter, E., et Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. Adams Bannister Cox.
- Moray, N. (1967). Where is capacity limited ? : A survey and a model. *Acta psychologica*, 27 :84–92.
- Morgan, B. et D’Mello, S. (2013). The effect of positive vs. negative emotion on multitasking. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 57(1) :848–852.
- Navon, D. et Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3) :214.
- Nelson, T. O. (1990). Metamemory : A theoretical framework and new findings. *Psychology of Learning and Motivation*, 26 :125–173.
- Norman, D. A. et Bobrow, D. J. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7 :44–64.
- Penttinen, A. (1999). Chapter 8–queuing systems. *Lecture Notes : S-38.145-Introduction to Teletraffic Theory*.
- Raby, M. et Wickens, C. D. (1994). Strategic workload management and decision biases in aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 4(3) :211–240.
- Raby, M., Wickens, C. D., et Marsh, R. (1990). Investigation of factors comprising a model of pilot decision making : Part 1. cognitive biases in workload management strategy. Technical report, ARL-90-7/SCEEE-90-1, Aviation Research Laboratory, Institute of Aviation, University of Illinois at Urbana-Champaign.

- Rescorla, R. A. (1969). Conditioned inhibition of fear resulting from negative cs-us contingencies. *Journal of comparative and physiological psychology*, 67(4) :504.
- Sali, A. W., Anderson, B. A., et Yantis, S. (2014). The role of reward prediction in the control of attention. *Journal of experimental psychology : human perception and performance*, 40(4) :1654.
- Salvucci, D. et Taatgen, N. (2011a). *Metacognition and Task Priorities*, chapter 9. Reflections and Future Directions. Oxford University Press.
- Salvucci, D. et Taatgen, N. (2011b). *The Multitasking Mind*. Oxford University Press.
- Santiago-Espada, Y., Myer, R. R., Latorella, K. A., et Comstock Jr, J. R. (2011). *The Multi-Attribute Task Battery II (MATB-II) Software for Human Performance and Workload Research : A User's Guide*.
- Schneider, W. et Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing : I. detection, search, and attention. *Psychological review*, 84(1) :1.
- Schunn, C. D. et Reder, L. M. (1998). *The Psychology of Learning and Motivation*, volume 38, chapter Strategy Adaptivity and Individual Differences, pages 115–154. New York : Academic Press.
- Serences, J. T. et Yantis, S. (2006). Spatially selective representations of voluntary and stimulus-driven attentional priority in human occipital, parietal, and frontal cortex. *Cerebral cortex*, 17(2) :284–293.
- Smith, E. E. et Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283(5408) :1657–1661.
- Sperling, G. et Melchner, M. J. (1978). The attention operating characteristic : Examples from visual search. *Science*, 202(4365) :315–318.
- Spitz, G. (1988). Flexibility in resource allocation and the performance of time-sharing tasks. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 32 of 19, pages 1466–1470.
- Strayer, D. L. et Johnston, W. A. (2001). Driven to distraction : Dual-task studies of simulated driving and conversing on a cellular telephone. *Psychological science*, 12(6) :462–466.
- Wang, D. Y. D., Proctor, R., et Pick, D. (2009). Allocation of effort as a function of payoffs for individual tasks in a multitasking environment. *Behavior Research Methods*, 41(3) :705–716.
- Wang, D. Y. D., Proctor, R. W., et Pick, D. F. (2007). Acquisition and transfer of attention allocation strategies in a multiple-task work environment. *Human Factors*, 49(6) :995–1004.
- Wickens, C., Hutchins, S., Carolan, T., et Cumming, J. (2011). Investigating the impact of training on transfer : A meta-analytic approach. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 55 of 1, pages 2138–2142.

- Wickens, C. D. et Gopher, D. (1977). Control theory measures of tracking as indices of attention allocation strategies. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 19(4) :349–365.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., et Santamaria, A. (2015). Discrete task switching in overload : A meta-analyses and a model. *International Journal of Human-Computer Studies*, 79 :79–84.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., Vieane, A., Clegg, B. A., Sebok, A., et Janes, J. (2016). Time sharing between robotics and process control validating a model of attention switching. *Human Factors*, 58(2) :322–343.
- Woodhead, M. M. (1966). An effect of noise on the distribution of attention. *Journal of Applied Psychology*, 50(4) :296.
- Yechiam, E., Erev, I., et Gopher, D. (2001). On the potential value and limitations of emphasis change and other exploration-enhancing training methods. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 7(4) :277–285.

CHAPITRE 4

# *L'oculométrie pour l'étude de la priorisation*

<b>1 L'essor des mesures neurophysiologiques</b> .....	99
<b>2 Le regard et l'attention</b> .....	101
<b>3 Les mesures oculométriques</b> .....	103
3.1 Les quatre mouvements de l'œil .....	103
3.2 Les saccades et les fixations .....	103
3.3 Analyses sémantiques des mouvements oculaires .....	105
3.4 Analyses non-sémantiques des mouvements oculaires .....	106
<b>4 Des usages de l'oculométrie dans le cockpit</b> .....	106
4.1 Études du comportement oculaire nominal .....	107
4.2 L'allocation des ressources dans le cockpit automatisé .....	108
4.3 Étude des situations de pilotage dégradé .....	109
<b>5 Conclusion</b> .....	111

## **1. L'essor des mesures neurophysiologiques**

Suivant l'ensemble des travaux que nous venons de présenter, il apparaît que l'étude de la priorisation repose principalement sur la mise en évidence de phénomènes d'*allocation préférentielle des ressources*, aux diverses tâches d'un environnement donné. Traditionnellement, ceci est rendu possible par le recours à des mesures de performance, suivant une hypothèse forte selon laquelle la quantité de ressources allouée influence la performance, dès lors que cette dernière n'est pas limitée par la nature de la tâche (Navon et Gopher, 1979). De fait, les théories relatives à la structure des ressources, que nous avons présentées au chapitre 2 (p.23), ont été principalement élaborées grâce à l'étude systématique de la performance humaine. Une autre approche,

complémentaire à celle-ci, consiste à questionner directement les individus à propos de leur ressenti de la charge de travail (généralement par le biais du NASA-TLX; [Hart et Staveland, 1988](#)). Là encore, ces méthodes s'appuient sur une hypothèse forte, selon laquelle le niveau de charge ressentie est d'autant plus élevé qu'une quantité importante de ressources est investie dans la tâche, ou que la demande imposée sur la mémoire de travail est forte ([Yeh et Wickens, 1988](#)). Enfin, dans le cadre de l'étude de la priorisation humaine, nous avons relevé au moins deux études, où les investigateurs questionnaient les participants quant aux *niveaux de priorité* respectifs qu'ils attribuaient aux diverses tâches en présence ([Raby et Wickens, 1994](#); [Gutzwiller et al., 2014](#)). Par exemple, dans l'étude de [Raby et Wickens \(1994\)](#), tous les pilotes devaient classer un ensemble de trente sous-tâches de pilotage, en fonction de leur degré d'importance. Ces évaluations ont permis aux chercheurs de mettre en évidence un *effet de l'importance perçue sur l'allocation des ressources visuelles*, en situation de forte charge de travail.

Toutefois les avancées techniques réalisées dans le domaine de la mesure neurophysiologique ont, depuis une cinquantaine d'année, rendu possible l'étude de l'allocation des ressources, par le biais de métriques, autres que comportementales ou subjectives. De fait, il est devenu de plus en plus facile de relever des informations quant aux activités motrice, cérébrale, cardiaque, électrodermale ou oculaire des individus en situation. Ces innovations ont largement profité aux recherches en Ergonomie et Facteurs Humains, au point de susciter le développement d'une nouvelle discipline : la Neuroergonomie ([Parasuraman, 2003](#); [Parasuraman et Rizzo, 2008](#)), discipline principalement concernée par l'étude du cerveau et du comportement humain en situation de travail (« *the brain at work* »). Ce faisant, certains des concepts traditionnels de l'Ergonomie ont été revisités. Par exemple, il est devenu possible de compléter l'évaluation *comportementale* et/ou *subjective* de la charge mentale par une évaluation *neurophysiologique* ([Just et al., 2003](#), voir aussi [Benedetto et al., 2011](#); [Causse et al., 2016](#); [Cegarra et al., 2017](#); [Dehais et al., 2008](#); [Durantin et al., 2014](#); [Gagnon et al., 2012](#); [Gateau et al., 2015](#), pour des exemples récents). De même, des progrès importants ont été réalisés dans la compréhension des phénomènes d'allocation des ressources en situation de travail, par le relevé et l'analyse des mouvements oculaires ([Duchowski, 2002](#); [Kramer et McCarley, 2003](#)). Ce sont ces dernières avancées que nous souhaiterions maintenant présenter. En effet, même si, dans la plupart des circonstances, les chercheurs ont établi un lien fort entre les phénomènes oculaires et les phénomènes attentionnels ([Deubel et Schneider, 1996](#); [Findlay, 2009](#); [Henderson, 2003](#)), certains travaux nous encouragent à ne pas postuler une stricte correspondance entre les deux, en nous faisant d'ailleurs remarquer



que l'étude de l'allocation des ressources s'est pendant très longtemps largement affranchie de toute considération pour les mouvements oculaires (Kramer et McCarley, 2003, p.27). Le présent chapitre devra donc permettre d'éclaircir la relation entre les phénomènes d'allocation des ressources, et les comportements oculaires, ainsi que la possibilité d'étudier l'un par le biais de l'autre. Dans un premier temps, nous présenterons un ensemble de considérations fondamentales, quant aux rapports entretenus entre les phénomènes attentionnels couverts et ouverts (section 2). Dans un deuxième temps, nous nous attacherons à dresser une liste non-exhaustive des usages de l'oculométrie dans le domaine de l'aéronautique – principalement du pilotage – ainsi que des avancées théoriques que ces usages ont favorisées (section 4). Enfin, nous refermerons ce chapitre par un bref descriptif de l'ensemble des métriques qui sont généralement employées pour caractériser les phénomènes oculaires (section 3).

## 2. Le regard et l'attention

L'attention se confond-elle strictement avec les mouvements du regard? Quelle est la nature de la relation qui unit ces deux phénomènes?

Dans le sens commun, l'attention est souvent ramenée au fait d'écouter, de regarder ou bien encore de penser à quelque-chose *en particulier*. Autrement dit, dans son acception vernaculaire, l'attention renvoie principalement à l'orientation d'un système sensoriel vers le traitement sélectif d'une partie de l'information disponible. Cette conception naïve de l'attention transparait d'ailleurs dans la définition qu'en donne Le Robert : « Action de fixer son esprit sur quelque-chose; concentration de l'activité mentale sur un objet déterminé ». En dépit de ce lien potentiel entre attention et système sensoriel, l'attention visuelle a le plus souvent été étudiée sans recours aucun à la mesure du comportement oculaire (Kramer et McCarley, 2003). D'ailleurs, la littérature scientifique a souvent distingué les deux phénomènes, en ramenant les mouvements oculaires à des phénomènes d'« attention *ouverte* », et en appelant « attention *couverte* » l'ensemble des phénomènes attentionnels ne se traduisant pas par des mouvements oculaires (Hoffman, 1998).

Il a par exemple été démontré que les individus pouvaient porter leur attention en divers points de l'espace, en l'absence de mouvements oculaires manifestes (Posner, 1980; Eriksen et Yeh, 1985). Posner (1980) est le premier à avoir montré qu'un stimulus est détecté plus rapidement lorsqu'il apparaît en un point attendu de l'espace, même si ce point n'est pas l'objet d'une fixation préalable. Toutefois, malgré ces preuves de leur dissociation, d'autres études ont, dans le même temps, suggéré un recouvrement de ces deux

formes d'attention. Klein (1980) est le premier à avoir proposé que l'attention couverte impliquerait strictement les mêmes mécanismes que l'attention ouverte, à l'exception de l'acte moteur final – et ne serait rien d'autre qu'un *mouvement oculaire non-exécuté*. Cette hypothèse de la *préparation oculomotrice* a été soutenue par une vaste série de travaux (Hoffman et Subramaniam, 1995; Peterson et al., 2004; Rafal et al., 1989; Sheliga et al., 1997; Shepherd et al., 1986) qui, tous, ont établi un lien fort entre les deux types d'attention. Au plan empirique, ces travaux ont montré que (1) lorsqu'un individu porte son attention en un point donné de l'espace, ses mouvements saccadiques vers ce point s'en trouvent facilités (c.-à-d., la durée de la saccade est plus courte), et qu'en retour, (2) lorsqu'un individu se prépare à réaliser une saccade vers un point donné de l'espace, tout traitement d'un stimulus en ce point précis se trouve facilité. Ces considérations ont été renforcées par des observations neuroanatomiques qui ont montré que les régions cérébrales spécifiquement impliquées dans les déplacements ouverts et couverts de l'attention se recouvrent largement (Perry et Zeki, 2000; Nobre et al., 2000). Ces régions correspondaient principalement à un large réseau fronto-pariétal, ainsi qu'à certaines zones sous-corticales, au niveau du putamen et du cervelet. Seule une aire du cortex préfrontal dorsopariétal montrait une activation sélective, lors des phénomènes d'attention couverte, et aucune activation lors de mouvements attentionnels ouverts<sup>1</sup>. Finalement, pour reprendre les termes employés par Shepherd et al. (1986), « alors qu'il est possible de déplacer son attention sans réaliser de mouvement oculaire, il n'est pas possible de réaliser un mouvement oculaire, sans en même temps réaliser un déplacement de l'attention [couverte] dans la direction correspondante ».

Du fait de ce couplage fonctionnel important, il n'est pas étonnant que, depuis une trentaine d'année, les études de la performance humaine en situation complexe aient recourues de façon de plus en plus systématique à des mesures du comportement oculométrique. Mais avant de les décrire plus précisément (section 4, p.106), nous présenterons l'ensemble des mesures oculométriques les plus souvent utilisées en Ergonomie et Facteurs Humains.

---

1. Attention, compte tenu des niveaux actuels de résolution spatiale des outils employés, il reste possible que des zones spécifiques des régions évoquées jouent un rôle sélectif dans la génération des phénomènes ouverts et couverts (Kramer et McCarley, 2003)

## 3. Les mesures oculométriques

### 3.1. Les quatre mouvements de l'œil

Il existe quatre types basiques de mouvements visuels. Il y a les saccades, les mouvements de poursuite, les mouvements de vergence, et les mouvements vestibulo-oculaires (Purves et al., 2001). Les *saccades* sont des mouvements balistiques<sup>2</sup> rapides de l'œil, qui soutiennent le déplacement du regard, d'un point à l'autre du champ visuel. Elles s'accompagnent d'un phénomène de suppression – dit « suppression saccadique », qui empêche tout traitement de l'information visuelle, pendant leur déroulement (Matin, 1974). Les *mouvements de poursuite* correspondent à un alignement continu de la fovéa avec une cible en mouvement continu. Contrairement aux saccades, le traitement de l'information n'est pas supprimé pendant une poursuite (Masson et Stone, 2002). Les *mouvements de vergence* correspondent à un alignement synchrone et adaptatif des deux yeux, qui soutient la focalisation du regard en diverses profondeurs du champ visuel : lorsque le point de focalisation est très proche, les deux yeux *convergent* (p.ex., sur le tableau de bord), et lorsque ce point s'éloigne, les deux yeux *divergent* (p.ex., vers un avion dans le ciel). Enfin, les *mouvements vestibulo-oculaires* correspondent à une compensation automatique des mouvements de tête, qui doit permettre la constance d'un point de fixation dans le champ visuel.

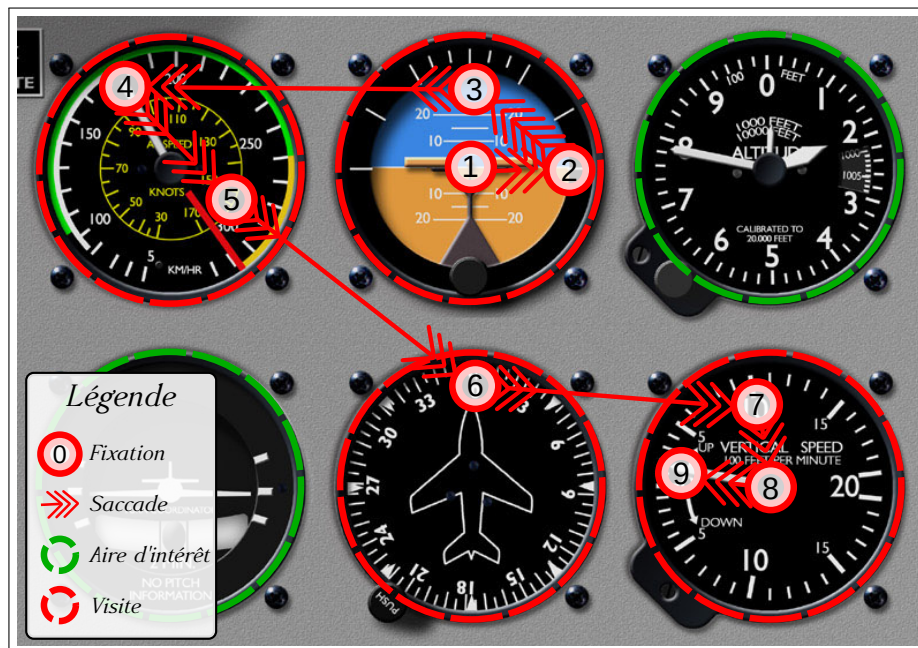
Les études en Ergonomie et Facteurs Humains ont fait un usage intensif de la première de ces mesures : les saccades, ainsi que du phénomène se présentant comme leur négatif : les fixations. De ce fait, nous n'approfondirons pas ici les trois autres types de mouvements oculaires.

### 3.2. Les saccades et les fixations

Les saccades sont de première importance pour l'analyse du traitement de l'information en situation complexe. Alors que le traitement de l'information est supprimé pendant le déroulement d'une saccade, celle-ci, en terminant sa course laisse place à une *fixation* du regard sur un point précis du champ visuel, engendrant la projection d'une image relativement stable sur la rétine. Alors seulement une information visuelle peut être extraite de la zone fixée. Pendant des tâches visuelles, telles que la lecture, la perception d'une scène ou encore la recherche visuelle, la durée d'une fixation est généralement comprise

---

2. Comme pour le tir d'un projectile, une saccade est dite balistique dans le sens où sa trajectoire est entièrement déterminée par ses paramètres initiaux. Comme il n'est pas possible d'arrêter ni modifier la trajectoire d'un boulet de canon une fois celui-ci projeté, il n'est pas possible d'arrêter ni modifier une saccade.



**Figure 4.1** – Illustration d’une séquence de saccades et de fixations, sur le tableau de bord d’un D400. Une visite correspond à une ou plusieurs fixations, au sein d’une aire d’intérêt particulière.

entre 40 et 800 millisecondes, pour une durée moyenne allant de 200 à 400 millisecondes, selon la nature de la tâche (Rayner, 1998). Contrairement à ce que peuvent nous laisser penser nos sens, le regard n’est jamais totalement immobile, et un mouvement constant est nécessaire. Une image, projetée sur la rétine, et qui tendrait à s’immobiliser, tendrait aussi à disparaître (Pritchard, 1961). Aussi n’est il pas rare qu’un observateur réalise plusieurs cycles de fixations-saccades, au sein d’une même aire d’intérêt, avant de réaliser une saccade plus ample, vers une autre zone du champ visuel.

En général, on distingue la fixation de la *visite*. Alors que la fixation correspond à un évènement oculaire discret, borné par deux saccades, une visite correspond à un groupe de fixations, concernant une aire d’intérêt particulière du champ visuel. Par exemple, dans le cockpit, une séquence de fixations, au sein de l’indicateur d’attitude, sera considérée comme une visite (Figure 4.1).

Chacun de ces phénomènes oculaires peut se voir caractériser de plusieurs façons. Comme nous l’avons dit, les *fixations* comportent une *durée* (40 – 800 ms), mais aussi une *localisation*, que l’on peut définir comme un couple (x,y) de coordonnées dans un plan orthonormé (p.ex., un tableau de bord ou un écran d’ordinateur). Les *saccades* comportent, quant à elles, une *durée*

(20 – 200 ms) et une *amplitude* – exprimée généralement en degrés d'angle. L'amplitude d'une saccade correspond à la distance séparant son point de départ et son point d'arrivée, et correspond en fait à la distance angulaire réalisée par l'œil pendant son déroulement. La combinaison de l'amplitude et de la durée d'une saccade, permet de caractériser sa *vélocité* (vitesse), qui s'exprime alors en degrés d'angle par seconde ( $\text{deg.s}^{-1}$ ). Comme pour les fixations, les saccades peuvent aussi être caractérisées dans l'espace, selon leur point  $(x, y)$  de départ, et leur point  $(x, y)$  d'arrivée.

L'analyse de ces métriques élémentaires est généralement conjointe à une ségrégation de l'espace visuel en un ensemble de zones – ou aires d'intérêts (AOI). Ce découpage permet la réalisation d'une analyse *sémantique* des mouvements oculaires, c'est-à-dire une analyse qui ne se réduit pas à l'étude de leurs propriétés physiques, mais tient aussi compte de leur relation avec l'environnement visuel (Figure 4.1). Dans la mesure où le chercheur est intéressé par l'étude de la relation entre le comportement oculaire et l'environnement de la tâche, il va de soi que cette analyse sémantique est la plus couramment employée. Ci-dessous, nous dressons une liste non-exhaustive des analyses sémantiques les plus souvent menées.

### 3.3. Analyses sémantiques des mouvements oculaires

Lorsque des AOI sont déterminées, l'approche la plus commune consiste à calculer le *temps cumulé de fixation* pour chaque AOI. Il est aussi possible de ramener ces durées au temps total de fixation, pour en dériver la *proportion de temps passé* par AOI. Le temps cumulé de fixation correspond à la somme des durées de toute les fixations individuelles réalisées dans une AOI donnée. En conséquence, ce temps dépend largement du nombre de fixations reçues, ainsi que de leur durée moyenne.

Alors que le temps cumulé de fixation peut permettre de donner une représentation générale de l'allocation des ressources, la durée des fixations et/ou des visites donne, en général, une idée de l'efficacité d'extraction de l'information, pour une AOI donnée (Fitts et al., 1950). Pour les fixations comme pour les visites, il s'agit simplement de la moyenne arithmétique des durées de l'ensemble des fixations/visites reçues par l'AOI. Il est aussi possible de déterminer le nombre total de fixations qu'une AOI reçoit et, éventuellement, de ramener ce nombre au temps de réalisation, pour obtenir une mesure de la *fréquence* avec laquelle l'AOI est fixée/visitée. Cette mesure a souvent été interprétée comme reflétant l'importance de l'AOI pour l'opérateur (Fitts et al., 1950).

Enfin, sur un plan sémantique, les saccades sont souvent employées pour évaluer la force d'association entre deux aires d'intérêt. Pour ce faire, il suffit

de dénombrer les saccades qui établissent un mouvement de translation entre deux AOI (p.ex., A et B), c'est-à-dire les saccades dont le point de départ se situe en A et le point d'arrivée en B – et de ramener ce nombre au total de saccades effectuées dans le champ visuel. Ce type d'analyse peut être unidirectionnel ( $A \rightarrow B$  ou  $B \rightarrow A$ ), ou bidirectionnel ( $A \leftrightarrow B$ ). On pourra par exemple constater que l'association A – B est plus forte que l'association B – C etc.

### 3.4. Analyses non-sémantiques des mouvements oculaires

Outre l'analyse des mouvements oculaires associés aux diverses AOI de l'environnement, il est aussi possible de réaliser des analyses indépendantes de toute considération sémantique. C'est par exemple le cas lorsque l'on calcule un indice d'entropie visuelle (voir note 4 de bas de page, p.110). En dehors des *visites*, qui ne peuvent exister sans référence à des AOI, toutes les mesures que nous avons décrites pourront donc être reprises, et analysées de façon générale, sans considération aucune pour les AOI. Par exemple, la fréquence *générale* des saccades pourra servir d'indicateur de la charge mentale, comme chez Vine et al. (2015). De même, de nombreuses études ont montré le lien entre l'évolution du diamètre pupillaire et d'autres mesures tels que la charge mentale (Baccino et al., 2007; Beatty, 1982; Causse et al., 2016; Dehais et al., 2008; Just et al., 2003), ou encore le stress (Pedrotti et al., 2014). Par ailleurs, d'autres auteurs ont argumenté en faveur d'un contrôle plus poussé des conditions expérimentales dans lesquelles ont lieu ces études, du fait de la sensibilité du diamètre pupillaire à bien d'autres facteurs, tels que la luminosité (Peysakhovich, 2016).

Dans la partie suivante, nous présenterons plusieurs avancées théoriques qui ont été soutenues par l'analyse des comportements oculaires en situation de pilotage – en nous concentrant sur les études ayant plus particulièrement porté sur les phénomènes d'allocation des ressources visuelles.

## 4. Des usages de l'oculométrie dans le cockpit

Fitts et ses collaborateurs sont les premiers à avoir fait une utilisation extensive des mouvements oculaires, pour l'étude de la performance humaine en environnements complexes et dynamiques (Jones et al., 1949; Fitts et al., 1950). Leurs travaux visaient alors à montrer comment un certain type de mouvement oculaire – les saccades<sup>3</sup> – pouvait rendre compte des stratégies de traitement de l'information, déployées par les pilotes lors de manœuvres de

---

3. Les saccades sont des mouvements oculaires rapides et balistiques, qui ont approximativement lieu trois fois par seconde



vols diverses et variées. Les chercheurs enregistraient les motifs saccadiques entre les différents instruments du cockpit, ainsi que la durée moyenne des fixations advenant entre deux saccades. La richesse des informations prélevées a permis des inférences à propos des aspects cognitifs et perceptifs de ces situations. Par exemple, Fitts et al. ont avancé que (1) la fréquence des fixations pour un instrument donné, traduisait son importance aux yeux des pilotes ; (2) la durée moyenne des fixations reflétait la difficulté relative d'extraction de l'information et (3) le comportement saccadique était représentatif de la qualité de l'agencement du cockpit. Ces études princeps ont motivé une utilisation toujours plus sophistiquée des mouvements oculaires, dans le domaine du pilotage (Hameluck, 1990; Tole et al., 1982), comme dans d'autres domaines complexes, tels que la radiologie (Carmody et al., 1980), la conduite automobile (Mourant et Rockwell, 1972; Recarte et Nunes, 2000), la lecture (McConkie et Rayner, 1976; Rayner et al., 1978), ou le sport de haut niveau (Abernethy, 1988). Plus spécifiquement, dans le domaine du pilotage, les chercheurs ont depuis lors employé l'oculométrie à diverses fins, parmi lesquelles l'étude plus approfondie des comportements d'allocation des ressources. La description de ces études, ci-dessous, se base principalement sur des travaux de revue, réalisés par Kramer et McCarley (2003) et Ziv (2016).

#### 4.1. Études du comportement oculaire nominal

Les données oculométriques ont été d'un grand support dans la définition du comportement oculaire *nominal* des pilotes dans le cockpit. Celui-ci peut se voir décomposer en de multiples aires d'intérêts (AOI). Par exemple, on peut différencier le monde extérieur des divers instruments que contient le tableau de bord. Les études montrent qu'en général, les pilotes passent plus de temps ( $\approx 60 - 70\%$ ) à fixer les instruments de bord que le monde extérieur au cockpit ( $\approx 30 - 40\%$  Colvin et al., 2005; Helleberg et Wickens, 2003; Wickens et al., 2003). Les comportements de balayage varient grandement en fonction de divers paramètres comme la phase de vol (décollage, croisière, approche), la réalisation d'une manœuvre spécifique, ou encore la densité du trafic. En général, l'instrument qui est le plus regardé est l'indicateur d'attitude (ou « horizon artificiel »), qui fournit des informations relatives à deux des trois axes de rotation de l'appareil (c.-à-d., le roulis et le tangage). Ce comportement est d'autant plus marqué que des changements d'attitude de l'appareil sont requis. En fait, il existe une relation fonctionnelle entre l'allocation des ressources visuelles et les demandes de la situation. Par exemple, les indicateurs d'altitude et de vitesse verticale sont d'autant plus considérés qu'un changement d'altitude est nécessaire.

De même, dans les *glass cockpits* modernes, Sarter et al. (2007) ont montré

que les pilotes fixaient surtout l'écran de vol principal (PFD, 31 %) et le GPS (25 %). Au sein du PFD, les indications principalement considérées étaient le cap, l'altitude, la vitesse verticale et la vitesse. Là encore, des différences ont été mises en évidence, en fonction des phases de vol. Alors qu'en phase de croisière, les pilotes allouaient seulement 3 % de leurs ressources visuelles au monde extérieur, ils lui allouaient 12 % de leurs ressources pendant l'approche finale. De même, les indicateurs du comportement vertical de l'appareil (c.-à-d., l'altitude et la vitesse verticale) étaient largement plus considérés dans les phases de montée ( $\approx 35\%$ ) ou de descente ( $\approx 25\%$ ), par comparaison aux phases de vol stationnaire ( $< 20\%$ ).

Ce type de résultats, associé à des mesures de performance, peut favoriser la définition de stratégies oculaires optimales. Par exemple, [Talleur et Wickens \(2003\)](#) ont montré que, afin de surveiller le trafic extérieur, la meilleure stratégie consistait à « sectoriser » le champ visuel, c'est-à-dire à le balayer de façon horizontale, en réalisant des pauses de 1 à 2 secondes. Ces stratégies de balayage amenaient les pilotes à regarder dehors plus longtemps, et s'accompagnaient de meilleures performances de vol.

Les mouvements oculaires ont aussi permis de caractériser les différences entre pilotes experts et novices, notamment les différences dans leurs stratégies de balayage visuel du cockpit ([Bellenkes et al., 1997](#); [Kramer et al., 1994](#); [Ottati et al., 1999](#)). [Bellenkes et al. \(1997\)](#) ont par exemple examiné les différences de comportements de balayage visuel et de flexibilité attentionnelle, entre des pilotes experts et novices. Pour ce faire, ils ont mesuré la performance et les comportements oculaires de pilotes experts et novices, lors de diverses phases de vol, impliquant des demandes spécifiques. Les résultats de leur étude ont montré que les experts réalisaient de meilleures performances, à tous les niveaux. Grâce aux métriques oculaires recueillies, les auteurs ont pu avancer que ces meilleurs niveaux de performance, observés chez les experts, étaient dus à une plus grande efficacité dans l'acquisition de l'information, de sorte que ces derniers pouvaient plus aisément allouer une partie de leurs ressources à plus de tâches différentes, y compris les tâches les moins importantes (voir [Matton et al., 2016](#), pour un résultat similaire en environnement multitâche contrôlé).

## 4.2. L'allocation des ressources dans le cockpit automatisé

La technique de l'oculométrie a aussi largement été utilisée pour caractériser les comportements spécifiques des opérateurs, vis-à-vis des automatismes. En particulier, quelques études ont pu montrer que les difficultés rencontrées fréquemment par les pilotes pour maintenir une bonne conscience du mode de navigation (*mode awareness*), pouvaient être mises



en relation avec un phénomène de *complaisance* (Parasuraman et al., 1993), se traduisant par une tendance générale, chez les pilotes, à allouer moins de ressources visuelles aux dispositifs automatiques, par comparaison aux instruments de contrôle sur l'appareil (Dehais et al., 2015, 2017a; Diez et al., 2001; Huettig et al., 1999; Reynal et al., 2016; Sarter et al., 2007).

Par exemple, Huettig et al. (1999) ont relevé que le FMA (c.-à-d., l'annonciateur de mode de vol) recevait une moyenne de 4,7 % des ressources visuelles totales et que, durant la phase d'atterrissage, cette moyenne tombait à 1,9 %, menant les participants à manquer des changements potentiels de mode. Dans une autre étude, Diez et al. (2001) ont montré, chez cinq pilotes de l'aviation commerciale, des difficultés à rapporter, de façon impromptue, des annonces de mode de vol concernant le tangage et l'auto-manette. Pour palier à ces difficultés, certains auteurs ont, par ailleurs, proposé que le FMA soit déplacé dans la champ visuel du pilote, afin d'en faciliter la détection et la prise en compte (Li et al., 2016).

Dans étude récente, Dehais et al. (2015) ont étudié les réactions visuelles d'un échantillon de pilotes à la surprise d'un automatisme (*automation surprise*) – définie comme un conflit entre le comportement du pilote automatique et la trajectoire de vol prévue. Ces évènements amenaient les pilotes à des comportements visuels de recherche excessifs et inefficaces, interférant avec les autres traitement de l'information. En effet, cette réaction visuelle n'amenait pas une résolution rapide du conflit et, alors qu'une majorité de pilotes réussissaient à détecter le caractère anormal du comportement du pilote automatique, moins de la moitié ont réellement compris ce qu'il arrivait, et comment corriger la situation pour éviter une collision en vol.

### 4.3. Étude des situations de pilotage dégradé

Enfin, les données oculométriques ont aussi largement contribué à enrichir notre connaissance du comportement des pilotes en situation dégradée. Pour rappel, est dite « dégradée » toute situation d'un système, dont au moins une des ressources de fonctionnement est temporairement ou définitivement indisponible. Par exemple, trois études au moins ont évalué la performance des pilotes lors d'une panne-moteur simulée (Dehais et al., 2008; Morrow et al., 2008; Vine et al., 2015). Dans l'étude de Dehais et al. (2008), un échantillon de pilotes expérimentés (instructeurs de vol) allouait plus de ressources visuelles au traitement des instruments de bord en condition normale qu'en condition dégradée (panne-moteur). Loin d'être anormal, ce résultat traduisait, en fait, une réallocation des ressources des pilotes vers l'environnement extérieur, afin de décider du circuit optimal pour l'atterrissage d'urgence.

Dans une autre étude (Vine et al., 2015), des pilotes de l'aviation

commerciale subissaient une panne-moteur simulée, juste après le décollage – l'un des événements les plus stressants auquel un pilote peut faire face, en raison de l'altitude et de la vitesse de l'appareil, particulièrement faibles lors de cette phase. Les chercheurs ont montré qu'une faible performance, en réaction à un tel événement, était associée avec un contrôle attentionnel inefficace, qui se traduisait par un balayage visuel plus rapide (fréquence des saccades) et plus erratique (augmentation de l'entropie<sup>4</sup>.)

Un autre scénario, impliquant une panne de l'altimètre ainsi qu'une mauvaise visibilité, a été proposé à un échantillon de pilotes privés, qui n'avaient pas une grande expérience du vol aux instruments (Russi-Vigoya et Patterson, 2015). Les pilotes passaient le plus clair de leur temps à balayer l'environnement extérieur ainsi que le GPS. Dès lors que la panne de l'altimètre, la mauvaise visibilité, ou la combinaison des deux, étaient déclenchés, les pilotes procédaient à un balayage régulier de l'altimètre (en panne), de l'indicateur d'attitude, ainsi que du GPS et de l'environnement extérieur. Toutefois, comme attendu dans ce type de situations, ils ne parvenaient pas à surveiller l'indicateur de vitesse verticale plus fréquemment qu'en situation nominale.

Dans un dernier exemple, des pilotes de ligne, regroupés par deux (commandant de bord et co-pilote), avaient pour instruction de déceler une panne en moins de cinq minutes, pendant un vol international simulé (van de Merwe et al., 2012). Les pilotes ne savaient rien de la panne qu'ils devaient corriger. Durant les cinq minutes de panne, les temps cumulés de fixation vers l'ECAM<sup>5</sup> augmentaient drastiquement, alors qu'ils diminuaient pour le GPS et le PFD. Comme dans un exemple précédent, les équipages qui réagissaient le mieux à ce mode dégradé, étaient ceux chez qui le comportement visuel était le moins erratique (entropie), et le plus dirigé vers le traitement de l'information donnée par l'ECAM. Ces résultats ont amené les chercheurs à suggérer qu'en situation dégradée, le maintien d'un balayage visuel structuré, au lieu d'erratique, favorisait le décellement et la correction des événements indésirables.

---

4. L'entropie visuelle est généralement évaluée grâce à la mesure de l'indice du voisin le plus proche, *Nearest neighbor index* en anglais. Cette mesure correspond au rapport entre la moyenne des distances minimales observées entre les points (de fixation dans le cas de données oculaires), et cette distance moyenne attendue si la distribution des points était totalement aléatoire (Clark et Evans, 1954).

5. L'ECAM (pour *Electronic Centralised Aircraft Monitor*), est un système qui surveille et informe les pilotes à propos du fonctionnement de l'appareil. Dans certains cas, cet appareil peut produire des messages détaillés à propos des pannes détectées et, dans certains cas, fournir une procédure à appliquer pour corriger la panne.

## L'évaluation de la charge mentale

En outre, les données oculométriques ont aussi pu être employées comme des marqueurs du niveau de charge mentale des pilotes. Par exemple, il a été démontré que le diamètre pupillaire tendait à augmenter avec la charge de travail (Beatty, 1982; voir Dehais et al., 2008; Causse et al., 2016, pour des exemples récents). De la même façon, des études ont montré que la fréquence et la durée moyenne des clignements, étaient inversement corrélés à la charge mentale (Brookings et al., 1996; Hankins et Wilson, 1998). Enfin, certains auteurs ont mis en évidence une relation entre le niveau de charge mentale et le caractère aléatoire (c.-à-d., l'entropie) du balayage visuel, tant dans le domaine du contrôle aérien (Hilburn et al., 1997) que du pilotage (Di Nocera et al., 2007). Par exemple, Di Nocera et al. (2007) ont montré que, lors d'un vol simulé sur ordinateur, l'entropie visuelle montrait une valeur plus élevée, lors des phases de décollage et d'atterrissage, généralement associées à des niveaux plus élevés de charge de travail.

L'ensemble des travaux que nous venons de décrire dénote bien la plus-value amenée par l'utilisation de techniques d'oculométrie, dans l'étude de la performance humaine en situation complexe. D'une part, ces études montrent que de telles techniques peuvent permettre de mieux comprendre les facteurs affectant l'allocation des ressources dans un environnement tel que le cockpit. D'autre part, de telles études ont permis d'explicitier l'importance des stratégies d'allocation des ressources (visuelles) dans la détermination de la performance, tant en situations nominale que dégradée.

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré comment, dans la mesure où il existe un lien fonctionnel important entre les phénomènes attentionnels et oculaires, les recherches en Ergonomie et Facteurs Humains ont introduit, de façon de plus en plus systématique, les mesures oculométriques à leurs études de la performance humaine en situation complexe. En outre, nous avons montré comment cet outillage a pu permettre d'enrichir nos connaissances à propos des phénomènes d'allocation des ressources dans des environnements complexes tel que le cockpit. Enfin, nous avons terminé par une présentation succincte des métriques les plus couramment utilisées dans ce domaine, pour l'analyse des comportements oculaires. Ces développements nous permettent d'affirmer que l'oculométrie se présente comme une technique à privilégier dans l'étude de la priorisation, dès lors que l'on ramène cette dernière à des

phénomènes d'allocation *spécifique* des ressources.

## Bibliographie du chapitre

- Abernethy, B. (1988). Visual search in sport and ergonomics : Its relationship to selective attention and performer expertise. *Human Performance*, 1(4) :205–235.
- Baccino, T., Dumercy, L., et Kicka, M. (2007). Cognitive load during information seeking : an investigation with pupil dilation analysis. In *Computational Modeling in Information Seeking : Psychological and Computing Approaches*.
- Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological bulletin*, 91(2) :276.
- Bellenkes, A. H., Wickens, C. D., et Kramer, A. F. (1997). Visual scanning and pilot expertise : the role of attentional flexibility and mental model development. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*.
- Benedetto, S., Pedrotti, M., Minin, L., Baccino, T., Re, A., et Montanari, R. (2011). Driver workload and eye blink duration. *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour*, 14(3) :199–208.
- Brookings, J. B., Wilson, G. F., et Swain, C. R. (1996). Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Biological psychology*, 42(3) :361–377.
- Carmody, D. P., Nodine, C. F., et Kundel, H. L. (1980). An analysis of perceptual and cognitive factors in radiographic interpretation. *Perception*, 9(3) :339–344.
- Causse, M., Peysakhovich, V., et Fabre, E. F. (2016). High working memory load impairs language processing during a simulated piloting task : an erp and pupillometry study. *Frontiers in human neuroscience*, 10.
- Cegarra, J., Baracat, B., Calmettes, C., Matton, N., et Capa, R. L. (2017). A neuroergonomics perspective on mental workload predictions in jens rasmussen's srk framework. *Le travail humain*, 80(1) :7–22.
- Clark, P. J. et Evans, F. C. (1954). Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology*, 35(4) :445–453.
- Colvin, K., Funk, K., et Braune, R. (2005). Task prioritization factors : Two part-task simulator studies. *The International Journal of Aviation Psychology*, 15(4) :321–338.
- Dehais, F., Behrend, J., Peysakhovich, S., Causse, M., et Wickens, C. (2017). Pilot flying and pilot monitoring's state awareness during a go-around execution in aviation : A behavioral and eye-tracking study. *International Journal of Aerospace Psychology*. In press.

- Dehais, F., Causse, M., et Pastor, J. (2008). Embedded eye tracker in a real aircraft : new perspectives on pilot/aircraft interaction monitoring. In *Proceedings from The 3rd International Conference on Research in Air Transportation*. Fairfax, USA : Federal Aviation Administration.
- Dehais, F., Peysakhovich, V., Scannella, S., Fongue, J., et Gateau, T. (2015). Automation surprise in aviation : Real-time solutions. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 2525–2534.
- Deubel, H. et Schneider, W. X. (1996). Saccade target selection and object recognition : Evidence for a common attentional mechanism. *Vision research*, 36(12) :1827–1837.
- Di Nocera, F., Camilli, M., et Terenzi, M. (2007). A random glance at the flight deck : Pilots' scanning strategies and the real-time assessment of mental workload. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(3) :271–285.
- Diez, M., Boehm-Davis, D. A., Holt, R. W., Pinney, M. E., Hansberger, J. T., et Schoppek, W. (2001). Tracking pilot interactions with flight management systems through eye movements. In *Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology*, pages 1–6. The Ohio State University Columbus.
- Duchowski, A. T. (2002). A breadth-first survey of eye-tracking applications. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 34(4) :455–470.
- Durantin, G., Gagnon, J. F., Tremblay, S., et Dehais, F. (2014). Using near infrared spectroscopy and heart rate variability to detect mental overload. *Behavioural brain research*, 259 :16–23.
- Eriksen, C. W. et Yeh, Y.-y. (1985). Allocation of attention in the visual field. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 11(5) :583.
- Findlay, J. M. (2009). Saccadic eye movement programming : Sensory and attentional factors. *Psychological Research*, 73(2) :127–135.
- Fitts, P. M., Jones, R. E., et Milton, J. L. (1950). Eye movements of aircraft pilots during instrument-landing approaches. *Aeronautical Engineering Review*, 3 :56.
- Gagnon, J.-F., Durantin, G., Vachon, F., Causse, M., Tremblay, S., et Dehais, F. (2012). Anticipating human error before it happens : Towards a psychophysiological model for online prediction of mental workload. In *HFES Proceedings*, Toulouse. Human Factors Ergonomics Society, Dick de Waard and Karel Brookhuis and Frédéric Dehais and Clemens Weikert and Stefan Röttger and Dietrich Manzey and Sonja Biede and Florence Reuzeau and Patrice Terrier.
- Gateau, T., Durantin, G., Lancelot, F., Scannella, S., et Dehais, F. (2015). Real-time state estimation in a flight simulator using fnirs. *PloS one*, 10(3) :-0121279.
- Gutzwiller, R. S., Wickens, C. D., et Clegg, B. A. (2014). Workload overload modeling an experiment with matb-ii to inform a computational model of task management. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 58 of 1, pages 849–853.

- Hameluck, D. E. (1990). Mental models, mental workload, and instrument scanning in flight. In *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, volume 34, pages 76–80.
- Hankins, T. C. et Wilson, G. F. (1998). A comparison of heart rate, eye activity, eeg and subjective measures of pilot mental workload during flight. *Aviation, space, and environmental medicine*, 69(4) :360–367.
- Hart, S. G. et Staveland, L. E. (1988). Development of nasa-tlx (task load index) : Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology*, 52 :139–183.
- Helleberg, J. R. et Wickens, C. D. (2003). Effects of data-link modality and display redundancy on pilot performance : An attentional perspective. *The International Journal of Aviation Psychology*, 13(3) :189–210.
- Henderson, J. M. (2003). Human gaze control during real-world scene perception. *Trends in cognitive sciences*, 7(11) :498–504.
- Hilburn, B., Jorna, P. G., Byrne, E. A., et Parasuraman, R. (1997). The effect of adaptive air traffic control (atc) decision aiding on controller mental workload. *Human-automation interaction : Research and practice*, pages 84–91.
- Hoffman, J. E. (1998). Visual attention and eye movements. *Attention*, 31 :119–153.
- Hoffman, J. E. et Subramaniam, B. (1995). The role of visual attention in saccadic eye movements. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 57(6) :787–795.
- Huettig, G., Anders, G., et Tautz, A. (1999). Mode awareness in a modern glass cockpit. In *Proceedings of the 10th International Symposium on Aviation Psychology*, volume 1, pages 130–135.
- Jones, R. E., Milton, J. L., et Fitts, P. M. (1949). Eye fixations of aircraft pilots, i. a review of prior eye-movement studies and a description of a technique for recording the frequency, duration and sequences of eye-fixations during instrument flight. *Wright Patterson AFB, OH, USAF Tech. Rep*, 5837.
- Just, M. A., Carpenter, P. A., et Miyake, A. (2003). Neuroindices of cognitive workload : Neuroimaging, pupillometric and event-related potential studies of brain work. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4(1-2) :56–88.
- Klein, R. (1980). *Attention and Performance VIII*, chapter Does oculomotor readiness mediate cognitive control of attention?, pages 259–276. Nickerson, R. S., Erlbaum, hillsdale, n.j. edition.
- Kramer, A., Tham, M., Konrad, C., Wickens, C., et Lintern, G. (1994). Instrument scan and pilot expertise. In *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, volume 38 of 1, pages 36–40.
- Kramer, A. F. et McCarley, J. S. (2003). Oculomotor behaviour as a reflection of attention and memory processes : Neural mechanisms and applications to human factors. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4(1-2) :21–55.

- Li, W.-C., White, J., Braithwaite, G., Greaves, M., et Lin, J.-H. (2016). The evaluation of pilot's situational awareness during mode changes on flight mode annunciators. In *International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*, pages 409–418.
- Masson, G. S. et Stone, L. S. (2002). From following edges to pursuing objects. *Journal of neurophysiology*, 88(5) :2869–2873.
- Matin, E. (1974). Saccadic suppression : a review and an analysis. *Psychological bulletin*, 81(12) :899.
- Matton, N., Paubel, P., Cegarra, J., et Raufaste, E. (2016). Differences in multitask resource reallocation after change in task values. *Human Factors*.
- McConkie, G. W. et Rayner, K. (1976). Asymmetry of the perceptual span in reading. *Bulletin of the psychonomic society*, 8(5) :365–368.
- Morrow, D. G., Miller, L. M. S., Ridolfo, H. E., Magnor, C., Fischer, U. M., Kokayeff, N. K., et Stine-Morrow, E. A. (2008). Expertise and age differences in pilot decision making. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 16(1) :33–55.
- Mourant, R. R. et Rockwell, T. H. (1972). Strategies of visual search by novice and experienced drivers. *Human factors*, 14(4) :325–335.
- Navon, D. et Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3) :214.
- Nobre, A. C., Gitelman, D. R., Dias, E. C., et Mesulam, M. M. (2000). Covert visual spatial orienting and saccades : overlapping neural systems. *Neuroimage*, 11(3) :210–216.
- Ottati, W. L., Hickox, J. C., et Richter, J. (1999). Eye scan patterns of experienced and novice pilots during visual flight rules (vfr) navigation. In Sage, S. P., editor, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 43 of 1, pages 66–70, Los Angeles, CA.
- Parasuraman, R. (2003). Neuroergonomics : Research and practice. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4(1-2) :5–20.
- Parasuraman, R., Molloy, R., et Singh, I. L. (1993). Performance consequences of automation-induced 'complacency'. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(1) :1–23.
- Parasuraman, R. et Rizzo, M. (2008). *Neuroergonomics : The brain at work*. Oxford University Press.
- Pedrotti, M., Mirzaei, M. A., Tedesco, A., Chardonnet, J.-R., Mérienne, F., Benedetto, S., et Baccino, T. (2014). Automatic stress classification with pupil diameter analysis. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 30(3) :220–236.

- Perry, R. J. et Zeki, S. (2000). The neurology of saccades and covert shifts in spatial attention : an event-related fmri study. *Brain*, 123(11) :2273–2288.
- Peterson, M. S., Kramer, A. F., et Irwin, D. E. (2004). Covert shifts of attention precede involuntary eye movements. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 66(3) :398–405.
- Peysakhovich, V. (2016). *Study of pupil diameter and eye movements to enhance flight safety*. PhD thesis, Université Toulouse 3 Paul Sabatier.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly journal of experimental psychology*, 32(1) :3–25.
- Pritchard, R. M. (1961). *Stabilized images on the retina*, volume 511. WH Freeman Company.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Katz, L. C., LaMantia, A.-S., McNamara, J. O., et Williams, S. M. (2001). *Neuroscience*. Sunderland, MA : Sinauer Associates.
- Raby, M. et Wickens, C. D. (1994). Strategic workload management and decision biases in aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 4(3) :211–240.
- Rafal, R. D., Calabresi, P. A., Brennan, C. W., et Sciolto, T. K. (1989). Saccade preparation inhibits reorienting to recently attended locations. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 15(4) :673.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing : 20 years of research. *Psychological bulletin*, 124(3) :372.
- Rayner, K., McConkie, G. W., et Ehrlich, S. (1978). Eye movements and integrating information across fixations. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 4(4) :529.
- Recarte, M. A. et Nunes, L. M. (2000). Effects of verbal and spatial-imagery tasks on eye fixations while driving. *Journal of experimental psychology : Applied*, 6(1) :31.
- Reynal, M., Colineaux, Y., Vernay, A., et Dehais, F. (2016). Pilot flying vs. pilot monitoring during the approach phase : an eye-tracking study. In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace*, page 7.
- Russi-Vigoya, M. N. et Patterson, P. (2015). Analysis of pilot eye behavior during glass cockpit simulations. *Procedia Manufacturing*, 3 :5028–5035.
- Sarter, N. B., Mumaw, R. J., et Wickens, C. D. (2007). Pilots' monitoring strategies and performance on automated flight decks : An empirical study combining behavioral and eye-tracking data. *Human factors*, 49(3) :347–357.
- Sheliga, B. M., Craighero, L., Riggio, L., et Rizzolatti, G. (1997). Effects of spatial attention on directional manual and ocular responses. *Experimental brain research*, 114(2) :339–351.



- Shepherd, M., Findlay, J. M., et Hockey, R. J. (1986). The relationship between eye movements and spatial attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 38(3) :475–491.
- Talleur, D. A. et Wickens, C. D. (2003). The effect of pilot visual scanning strategies on traffic detection accuracy and aircraft control. In *12th International Symposium on Aviation Psychology, 2003 University of Illinois, Urbana-Champaign*.
- Tole, J. R., Stephens, A. T., Harris, R. L., et Ephrath, A. R. (1982). Visual scanning behavior and mental workload in aircraft pilots. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*.
- van de Merwe, K., van Dijk, H., et Zon, R. (2012). Eye movements as an indicator of situation awareness in a flight simulator experiment. *The International Journal of Aviation Psychology*, 22(1) :78–95.
- Vine, S. J., Uiga, L., Lavric, A., Moore, L. J., Tsaneva-Atanasova, K., et Wilson, M. R. (2015). Individual reactions to stress predict performance during a critical aviation incident. *Anxiety, Stress, & Coping*, 28(4) :467–477.
- Wickens, C. D., Goh, J., Helleberg, J., Horrey, W. J., et Talleur, D. A. (2003). Attentional models of multitask pilot performance using advanced display technology. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 45(3) :360–380.
- Yeh, Y.-Y. et Wickens, C. D. (1988). Dissociation of performance and subjective measures of workload. *Human Factors*, 30(1) :111–120.
- Ziv, G. (2016). Gaze behavior and visual attention : A review of eye tracking studies in aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 26(3-4) :75–104.



## CHAPITRE 5

# *Problématique générale*

## *Les corrélats cognitifs de la priorisation humaine*

La revue de littérature nous a permis de faire le point sur certaines questions à propos de la priorisation. Nous avons vu que notre intérêt ne doit pas porter sur la fonction adaptative de la priorisation, ni sur ses manifestations empiriques, mais plutôt sur ses corrélats cognitifs. Il n'existe à ce jour aucune description robuste de la *chaîne de traitement* qui supporte l'évaluation, par un opérateur, des priorités respectives des tâches en présence. Les différentes théories générales de la performance multitâches que nous avons passées en revue n'accordent que peu de place à la priorisation (Liu, 1996; Meyer et Kieras, 1997; Salvucci et Taatgen, 2011b). De plus, comme le rappellent Wickens et al. (2015), ces théories sont principalement consacrées à une description *microscopique* des comportements multitâches et des processus mentaux *élémentaires* qui y sont impliqués, ce qui est incompatible avec une compréhension des processus stratégiques tels que la priorisation, qui se manifestent sur des échelles de temps plus grandes.

Les différentes théories de la priorisation que nous avons présentées ne permettent pas non plus de comprendre réellement ce phénomène. Certains modèles étaient trop normatifs (Freed, 2000; Funk, 1991); d'autres « utilisaient » les priorités pour sonder la structure des ressources humaines, sans s'attacher à décrire le processus d'évaluation des priorités (Gopher et al., 1982; Navon et Gopher, 1979); d'autres enfin expliquaient la priorité par la *valeur* : ce qui est une façon de *déplacer* le problème, puisqu'une fois de plus, ce qui *constitue* la valeur d'une tâche n'était pas réellement investigué au profit d'un isomorphisme valeur-récompense (Anderson, 2013; Chelazzi et al., 2014; Janssen et Brumby, 2015). C'est le même type de réduction, de la priorité à un

paramètre unique, qui est à l'œuvre dans la théorie de la *Threaded cognition* de Salvucci et Taatgen (2011b, pp. 48–49). En effet, selon cette théorie, en cas de conflit pour les ressources, c'est la tâche *la plus urgente* qui se voit donner la primauté, ce qui constitue de fait un isomorphisme valeur-urgence.

Au contraire, en situation opérationnelle, la priorité d'une tâche n'est pas un paramètre unidimensionnel mais dépend d'un ensemble d'attributs que l'opérateur doit évaluer au mieux (Gutzwiller et al., 2014; Wickens et al., 2015, 2016). Dans le cockpit par exemple, la priorité de chaque tâche n'est pas un paramètre observable traité par l'opérateur, mais plutôt un paramètre cognitif dont il reste à comprendre la logique de construction. Comme nous l'avons montré, cette logique ne fait pas l'objet d'un consensus, ce qui nous amène à poser la question générale à laquelle nous tenterons d'apporter des éléments de réponse dans cette thèse : *quels sont les corrélats cognitifs de l'évaluation des priorités dans des environnements complexes ?* Cette question générale pose un certain nombre de problèmes, ou sous-questions, que nous allons tenter de clarifier. Si nous les présentons séparément, il faut garder à l'esprit que tous ces problèmes, ainsi que les questionnements associés, sont liés entre-eux.

### **Pourquoi l'importance des tâches n'influence-t-elle pas systématiquement les comportements de priorisation ?**

L'une des observations les plus intrigantes de notre revue de littérature concerne le poids variable de l'importance des tâches dans la détermination des comportements de priorisation. En effet, dans les études les plus récentes que nous avons passées en revue (p.ex., Salvucci et Bogunovich, 2010; Wickens et al., 2016), les auteurs avancent que l'importance des tâches est un paramètre négligeable, qui n'influence pas significativement le comportement attentionnel des opérateurs, au contraire de la difficulté, avancée comme l'attribut ayant le plus de poids. Pourtant, nombreuses sont les études fondamentales et appliquées qui ont démontré le rôle crucial de l'importance des tâches dans les comportements de planification des tâches ou d'allocation des ressources (p.ex., Funk, 1991; Raby et Wickens, 1994). Ainsi, plutôt que d'exclure complètement ce paramètre de l'analyse, il semble plus pertinent de parvenir à *identifier les facteurs qui médiatisent son implication*. Si l'importance des tâches n'influence pas systématiquement les comportements de priorisation, il est central d'identifier les facteurs qui permettent de l'expliquer.

Certains éléments de la littérature nous offrent des pistes de réflexion, et suggèrent notamment un rôle pour la charge de travail. Tout d'abord au plan normatif, certains auteurs confèrent à la priorisation la fonction de *gérer la surcharge* (Freed, 2000; Kurzban et al., 2013), c'est-à-dire de résoudre un conflit généré par une demande excessive. De plus au plan empirique, certaines

études ont mis en évidence un poids plus élevé de l'importance des tâches dans des situations de charge de travail élevée (p.ex., [Raby et Wickens, 1994](#)). Ces éléments suggèrent un rôle pour la charge de travail, et nous amènent à poser cette autre question : *quelle est l'influence de la charge de travail sur la priorisation ? Et cette influence pourrait-elle expliquer les résultats contradictoires de la littérature, à propos du rôle variable conféré à l'importance des tâches dans la détermination des stratégies exécutives ?*

### **Comment les opérateurs résolvent-ils des conflits de polarité ?**

Parmi les modèles que nous avons présentés, le modèle STOM de [Wickens et al. \(2016\)](#) a spécialement retenu notre attention. En effet, à notre connaissance, il s'agit du seul modèle qui prenne le parti de rapporter l'attractivité générale d'une tâche (ce que nous appelons « priorité ») à l'ensemble de ses attributs. Ce point de vue est capital pour notre raisonnement puisqu'il conditionne la possibilité de faire l'étude *cognitive* de la priorisation. En postulant que la priorité attentionnelle est déterminée par le traitement d'un ensemble d'informations, il devient dès lors possible et nécessaire de manipuler ces informations le plus finement possible pour comprendre les traitements cognitifs en jeu. Deux notions ont été développées pour caractériser ces attributs : les notions de *poids* et de *polarité*. La question du poids (de l'attribut d'importance) a été évoquée au paragraphe précédent. Mais la polarité des attributs comporte elle aussi son lot de problèmes à résoudre. Pour rappel, la polarité d'un attribut renvoie à sa tendance à faire *diminuer* ou *augmenter* la priorité de la tâche.

À ce sujet, deux questions liées entre-elles doivent être résolues. Tout d'abord, *la polarité d'un attribut est-elle constante ?* Par exemple, une difficulté élevée fait-elle *toujours* diminuer la priorité d'une tâche ? Certains des travaux que nous avons présentés suggèrent que non. Ainsi, une tâche très difficile se voit attribuer une plus faible priorité lorsqu'elle est « en attente », mais cette même difficulté semble faire augmenter la priorité lorsque la tâche est en cours d'exécution (p.ex., [Wickens et al., 2015](#)). De plus, *comment les opérateurs résolvent-ils des conflits de polarité ?* Par exemple, si une tâche A est très importante (+) mais très difficile (–), et qu'une tâche B est peu importante (–), mais facile (+), quelle tâche se verra donner la priorité ? De façon plus fondamentale, *quelle est la politique de résolution des conflits de polarité ?* Un attribut se voit-il donner la prépondérance ? Ou bien la stratégie choisie reflète-t-elle la réalisation d'un compromis tenant compte de *l'ensemble* des attributs disponibles ?

La question de la résolution des conflits est en lien avec une question plus générale à propos de la priorisation. En effet, identifier la politique

de résolution d'un conflit, c'est aussi identifier la logique du traitement cognitif sous-jacent. Par exemple, si le conflit est résolu par compromis, cela indiquerait une tendance générale de la priorisation à tenir compte de l'ensemble des informations disponibles, et à ramener la priorité d'une tâche à une combinaison linéaire de ses attributs. Au contraire, si le conflit amène l'opérateur à donner la prépondérance à l'un des attributs impliqués, cela indiquerait plutôt une tendance à *sélectionner* un ou plusieurs attributs pour diriger la priorisation. Évidemment, entre ces deux situations extrêmes (traitements exhaustif *ou* sélectif), d'autres situations intermédiaires sont possibles. Quoiqu'il en soit, derrière cette question des conflits de polarité, on entrevoit clairement une autre question, encore plus générale : *selon quelle politique (exhaustive ou sélective) les attributs de priorité sont-ils traités et intégrés ?*.

Pour tenter de répondre à ces questions, nous avons élaboré une série d'expérimentations fondamentales, que nous présentons ci-après.

### **Première contribution : priorisation et charge de travail**

La première expérimentation (p.127) devait permettre d'évaluer de façon systématique, l'influence de la charge de travail sur les comportements de priorisation. Pour ce faire, nous avons élaboré une situation de double-tâches, dans laquelle les deux sous-tâches étaient identiques (tâches de *N-Back*) et caractérisées par deux attributs (difficulté et importance). L'importance des sous-tâches était manipulée par le biais d'une récompense (points à gagner/perdre). Les valeurs des attributs étaient systématiquement variées, de sorte que les participants rencontraient toutes les combinaisons de difficulté et d'importance possibles. Dans toutes ces conditions, les participants devaient réaliser le score le plus élevé possible. Pour caractériser leur comportement de priorisation, nous relevions des métriques de performance et de comportement oculaire.

### **Deuxième contribution : les heuristiques de priorisation**

La première expérimentation comportait un certain nombre de limites : le niveau de charge de travail y était confondu avec la manipulation de l'un des deux attributs, et le nombre limité de ces attributs (2) ne permettait pas d'analyser plus profondément les politiques d'évaluation des priorités. Pour répondre à ces limites, nous avons conçu une deuxième expérimentation (p.155) durant laquelle les participants étaient de nouveau confrontés à une situation de double-tâches. Les deux sous-tâches étaient identiques et consistaient à surveiller un groupe de traits et détecter tout mouvement de rotation de l'un d'entre-eux. Cette fois-ci, chaque sous-tâche était caractérisée

par *trois* attributs (difficulté, importance et tolérance à l'erreur), ce qui nous permettait d'évaluer plus de combinaisons d'attributs, de façon systématique. Pour dissocier la charge de travail globale des trois attributs, la vitesse de rotation des traits était définie de façon adaptative pour chaque participant, afin de nous assurer que le niveau de charge soit élevé. Comme précédemment, les participants devaient réaliser le score le plus élevé possible, et des métriques de performance et de comportement oculaire étaient relevées.

### **Troisième contribution : influence de la priorisation sur la performance en situation d'incertitude**

Dans nos deux premières contributions, nous avons pris le parti d'étudier des situations où les deux sous-tâches étaient strictement identiques et ce, afin de bien isoler et identifier la contribution des attributs des tâches, au-delà même de la nature de ces dernières. Toutefois dans les situations opérationnelles, les environnements comportent des tâches de nature différente, dont l'importance dépend du but assigné, et non simplement d'un indicateur objectif d'importance, comme une récompense. Pour se rapprocher de ces situations, nous avons donc élaboré une troisième expérimentation (p. 182), dans laquelle les participants devaient réaliser simultanément une sous-tâche de surveillance d'un écran de vol principal, présentant les paramètres primaires de vol (p.ex., altitude, vitesse), et une sous-tâche de diagnostic de panne sous incertitude. Trois groupes de participants étaient constitués, qui recevaient des consignes de priorités différentes. Là encore, des métriques de performance et de comportement oculaire étaient relevées. Dans ce paradigme, l'importance des tâches était donc manipulée par le biais de la consigne, et non par le biais d'attributs. De plus, les participants n'avaient pas connaissance de l'existence des deux autres groupes, et des autres consignes de priorité possibles.

## **Bibliographie du chapitre**

- Anderson, B. A. (2013). A value-driven mechanism of attentional selection. *Journal of Vision*, 13(3) :7.
- Chelazzi, L., Eštočinová, J., Calletti, R., Gerfo, E. L., Sani, I., Della Libera, C., et Santandrea, E. (2014). Altering spatial priority maps via reward-based learning. *The Journal of Neuroscience*, 34(25) :8594–8604.
- Freed, M. (2000). Reactive prioritization. Non-publié.
- Funk, K. (1991). Cockpit task management : Preliminary definitions, normative theory, error taxonomy, and design recommendations.

- Gopher, D., Brickner, M., et Navon, D. (1982). Different difficulty manipulations interact differently with task emphasis : evidence for multiple resources. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 8(1) :146.
- Gutzwiller, R. S., Wickens, C. D., et Clegg, B. A. (2014). Workload overload modeling an experiment with math-ii to inform a computational model of task management. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 58 of 1, pages 849–853.
- Janssen, C. P. et Brumby, D. P. (2015). Strategic adaptation to task characteristics, incentives, and individual differences in dual-tasking. *PLoS ONE*, 10(7) :–0130009.
- Kurzban, R., Duckworth, A., Kable, J. W., et Myers, J. (2013). An opportunity cost model of subjective effort and task performance. *The Behavioral and Brain Sciences*, 36(6) :661–679.
- Liu, Y. (1996). Queueing network modeling of elementary mental processes. *Psychological Review*, 103(1) :116–136.
- Meyer, D. E. et Kieras, D. E. (1997). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance : Part 1. basic mechanisms. *Psychological Review*, 104(4) :3–65.
- Navon, D. et Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3) :214.
- Raby, M. et Wickens, C. D. (1994). Strategic workload management and decision biases in aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 4(3) :211–240.
- Salvucci, D. et Bogunovich, P. (2010). Multitasking and monotasking : the effects of mental workload on deferred task interruptions. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pages 85–88.
- Salvucci, D. et Taatgen, N. (2011). *The Multitasking Mind*. Oxford University Press.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., et Santamaria, A. (2015). Discrete task switching in overload : A meta-analysis and a model. *International Journal of Human-Computer Studies*, 79 :79–84.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., Vieane, A., Clegg, B. A., Sebok, A., et Janes, J. (2016). Time sharing between robotics and process control validating a model of attention switching. *Human Factors*, 58(2) :322–343.



# CONTRIBUTIONS



## CHAPITRE 6

# *Première contribution*

## *Priorisation et charge de travail*

<b>1 Introduction</b> .....	127
<b>2 Méthode</b> .....	129
2.1 Participants .....	129
2.2 Matériel .....	129
2.3 Procédure .....	131
2.4 Mesures et plan expérimental .....	135
2.5 Commentaire préalable sur les analyses corrélationnelles .....	136
<b>3 Résultats</b> .....	138
3.1 Analyse de la performance .....	138
3.2 Analyse de l'allocation des ressources visuelles .....	139
3.3 Analyses corrélationnelles .....	142
<b>4 Discussion</b> .....	147
4.1 Priorisation et heuristiques de décision .....	148
4.2 Les deux rationalités de la priorisation .....	150
4.3 Limites .....	150

### **1. Introduction**

Comme nous l'avons avancé dans la partie précédente, la littérature présente des observations contradictoires en ce qui concerne l'influence directe de l'importance des tâches, dans la détermination des stratégies de priorisation. Alors que certains auteurs avancent qu'en situation multitâches, l'importance des tâches constitue un paramètre négligeable par comparaison à leur demande (p.ex., [Salvucci et Bogunovich, 2010](#); [Wickens et al., 2016](#)), d'autres auteurs ont pourtant montré son influence fondamentale sur la gestion

des tâches et l'allocation des ressources (p.ex., Barabasi, 2005; Gopher et al., 1982; Loft et al., 2007; Raby et Wickens, 1994). L'objectif premier de la présente étude consistait à résoudre cette contradiction, en cherchant à identifier le ou les facteurs qui pourraient permettre de l'expliquer. Pour le dire simplement, nous souhaitions comprendre pourquoi, dans la littérature, l'importance des tâches n'influence *pas systématiquement* les stratégies exécutives. Dans cette perspective, certains des résultats que nous avons présentés suggèrent un rôle pour la charge de travail. Par exemple, dans l'étude de Raby et Wickens (1994), les opérateurs montraient une plus grande sensibilité à l'importance respective des diverses sous-tâches du cockpit, lorsqu'ils étaient mis en situation de forte charge de travail. C'est cette hypothèse générale, d'une modulation par la charge de travail, de l'influence directe de l'importance des tâches sur l'allocation des ressources, que nous souhaitions investiguer ici.

De plus, parmi les études que nous avons présentées, nombreuses étaient celles où la complexité des paradigmes employés ne permettait pas d'identifier précisément de potentielles interactions entre divers attributs des tâches. Par exemple, dans l'étude de Gutzwiller et al. (2014), la situation expérimentale comportait quatre sous-tâches, qui étaient toutes de nature distincte (MATB-II). Par conséquent, la difficulté des sous-tâches n'était pas un attribut manipulé, mais était consubstantielle à leur nature. En d'autres termes, il s'agissait d'une variable indépendante *invoquée* (et non *provoquée*). De plus, seule l'importance de l'une des sous-tâches (poursuite) était réellement manipulée, l'importance des autres sous-tâches étant évaluée par les participants *après* la passation (voir section 3.3.2, p.86, pour plus de détails). Ces limites rendaient impossible l'étude approfondie de l'interaction des attributs de tâches, et appelaient l'élaboration de paradigmes plus contrôlés, comme le suggéraient aussi Wickens et al. (2015).

Ainsi, pour répondre à ces limites, et évaluer le rôle de la charge de travail dans le processus de priorisation, nous avons élaboré une situation double-tâches sur ordinateur, où les participants devaient réaliser deux sous-tâches de *N-Back* simultanément. Chaque sous-tâche était caractérisée par deux attributs distincts (difficulté et importance), qui admettaient deux valeurs possibles chacun. Ces attributs étaient *systématiquement manipulés*, de sorte que chaque participant rencontrait toutes les combinaisons possibles de difficulté et d'importance pour les deux sous-tâches.

De façon générale, nous faisons l'hypothèse que l'allocation des ressources serait expliquée par une interaction entre les deux attributs des sous-tâches, et que l'influence de l'attribut d'importance sur l'allocation des ressources serait modulé par le niveau général de demande. Plus spécifiquement, nous pensions que dans les conditions de charge de travail faible, la performance

aux sous-tâches (H1a) ainsi que l'allocation des ressources (H1b), seraient influencées par le niveau de difficulté des deux sous-tâches, et ne subiraient aucune influence des attributs d'importance. Au contraire, nous pensions que dans des conditions de charge de travail élevée, la performance (H2a) ainsi que l'allocation des ressources (H2b) seraient influencées par l'importance respective des sous-tâches, et ne seraient aucunement influencés par leur attribut de difficulté. Pour caractériser les comportements de priorisation des participants, nous relevions des indices de performance comportementale (détection) et de comportement oculaire.

## 2. Méthode

La méthode présentée ci-dessous a été validée par le Comité d'Éthique sur les Recherches Non-Interventionnelles (CERNI) : CERNI-Université fédérale de Toulouse-2016-010.

### 2.1. Participants

Pour cette étude, vingt participants ont été recrutés (âge moyen :  $23.5 \pm 3.9$ , 15 hommes, 5 femmes). Tous étaient volontaires et ingénieurs en formation de l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-Supaéro). Avant l'expérimentation, tous les participants ont lu et rempli un formulaire de consentement. Leur participation n'était pas rétribuée.

### 2.2. Matériel

L'expérimentation avait lieu dans une salle calme et isolée, dont la luminosité était comprise entre 10 et 15 lux. Toutes les tâches étaient exécutées sur un ordinateur Dell, pourvu d'un moniteur de 22 pouces, avec une résolution de  $1680 \times 1250$  pixels. Les participants s'asseyaient à environ 70 cm de l'écran. Toutes les données oculométriques étaient enregistrées grâce à un dispositif fixe d'oculométrie SMI RED 500 (SensoriMotric Instruments ©; Figure 6.1). Les réponses des participants étaient enregistrées grâce à un boîtier de réponse Cedrus RB-530 (Figure 6.1, p.130). Les temps de réaction, et l'affichage des stimuli étaient pris en charge par Python 2.7, et la librairie PsychoPy 1.83 (Peirce, 2009). Le code complet de la tâche est disponible en annexes de ce document, page 306.

L'expérimentation se déroulait en deux temps. Les participants réalisaient d'abord un entraînement à une version simple (monotâche) du *N-Back*, avant d'en réaliser une version double-tâches (Encadré 6.1), lors de la phase test.



**Figure 6.1** – À gauche : boîtier de réponses RB-530 (Cedrus); à droite : dispositif d'acquisition de données oculométriques RED500 (SensoMotoric Instruments)

### Versión monotâche

Pour la version monotâche, les réponses étaient données grâce au bouton central du boîtier de réponse. Le fond d'écran était de couleur gris clair (code hexadécimal : #E6E6E6). Les chiffres étaient présentés dans un carré à fond blanc, de 5° de côté, situé au centre de l'écran. La consigne à appliquer (« N-Back ») était affichée en continue, en haut à gauche de l'écran (Figure 6.2). Toute erreur était signalée au participant par un rond rouge, affiché au centre du carré, à la place des chiffres.

### Versión double-tâches

Pour la version double-tâches, les deux séquences de chiffres étaient respectivement présentées dans deux carrés blancs de 5° (angle visuel) de côté, situés respectivement à gauche et à droite du centre de l'écran, et distants l'un l'autre de 12.2° (6.1° du centre). Chaque sous-tâche était caractérisée par deux attributs. La **difficulté** était représentée par un nombre, correspondant au niveau de difficulté de la tâche de *N-Back* (0-Back, 1-Back ou 2-Back). Ce chiffre était situé 1.5° en dessous du carré de chaque sous-tâche. L'**importance** de la sous-tâche était représentée par la quantité de ronds dorés (1 ou 3), située 0.8° au dessus du carré de chaque sous-tâche (Figure 6.3). Dans cette version double-tâche, un *feedback* apparaissait systématiquement au centre de l'écran, entre deux essais. Ce dernier indiquait la somme de points gagnés ou perdus. Il était de couleur rouge lorsque les points étaient perdus (p.ex., -3) et vert lorsque des points étaient gagnés (p.ex., +3). Lorsque le résultat était nul, un signe égal de couleur noire apparaissait (=). Les boutons gauche et droit du boîtier de réponse étaient respectivement utilisés pour signaler une cible dans

**Encadré 6.1 – La tâche de N-Back**

Créée en 1958 par [Kirchner](#), la tâche de *N-Back* est une tâche complexe de mémoire de travail, pendant laquelle on présente une séquence de stimuli (p.ex., chiffres) aux participants. Pour chaque stimulus, ces derniers doivent indiquer s'il est identique (cible) ou non (distracteur) au stimulus apparu N rangs auparavant (« N-Back »). Par exemple, si la règle est *1-Back*, chaque stimulus doit être comparé au stimulus précédent (1 rang avant). Plus la valeur de N est élevée, plus la tâche est difficile, puisque requérant le maintien en mémoire d'un nombre plus élevé de stimuli.

Prenons l'exemple d'une séquence de lettres, à laquelle on appliquerait trois règles différentes. Une lettre en rouge est une cible.

Règle	Séquence
1-Back	T L H C H O C Q L C K L H C Q T R R K C H R
2-Back	T L H C H O C Q L C K L H C Q T R R K C H R
3-Back	T L H C H O C Q L C K L H C Q T R R K C H R

Bien sûr, la tâche peut s'appliquer à tout type de stimuli (lettres, chiffres...) et de modalités sensorielles (visuelle, auditive, tactile...). Il peut arriver qu'on propose au participant une condition *0-Back* pour laquelle la tâche consiste simplement à détecter un stimulus défini arbitrairement (p.ex., la lettre L). Enfin, il existe des versions double-tâche du *N-Back*, pendant lesquelles les participants doivent traiter simultanément deux séries de stimuli, souvent dans des modalités sensorielles différentes ([Jaeggi et al., 2003](#)), contrairement à ce que nous proposons ici.

la sous-tâche de gauche ou de droite. Ici encore, toute erreur était signalée par l'apparition d'un petit rond rouge entre deux essais, au centre du carré de la sous-tâche concernée (Figure 6.4).

**2.3. Procédure**

Les participants s'asseyaient en face de l'ordinateur (≈ 70 cm). Avant chaque phase, les participants étaient autorisés à interroger l'expérimentateur s'ils souhaitaient obtenir des informations supplémentaires. Chaque bloc était auto-initié par le participant, qui devait pour ce faire appuyer sur la touche du bas du boîtier de réponse.



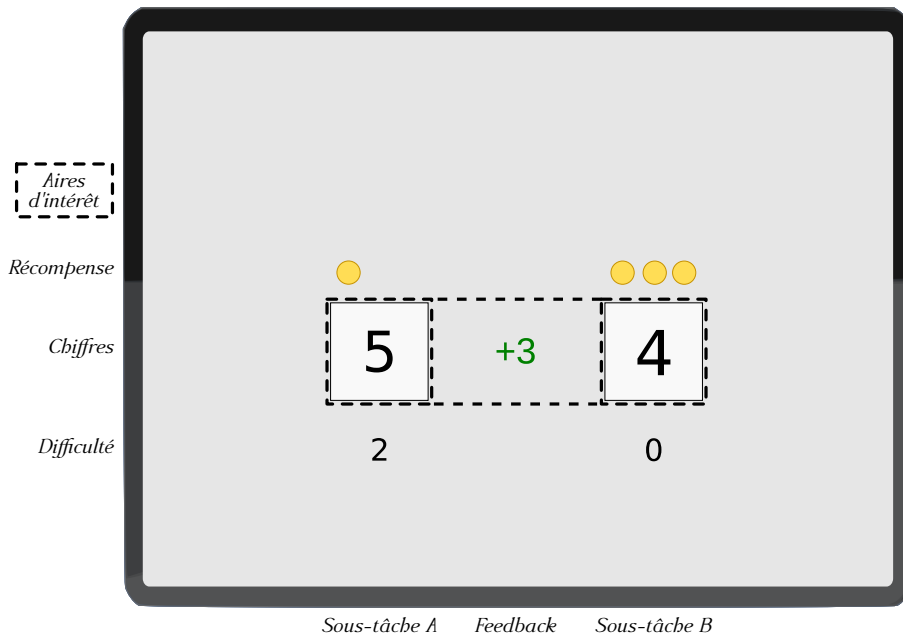
**Figure 6.2** – Environnement de la tâche de *N-Back*. La tâche ne comportait pas d'attribut d'importance dans cette version. Seule la difficulté (0 vs 1 vs 2) était manipulée.

### Version monotâche

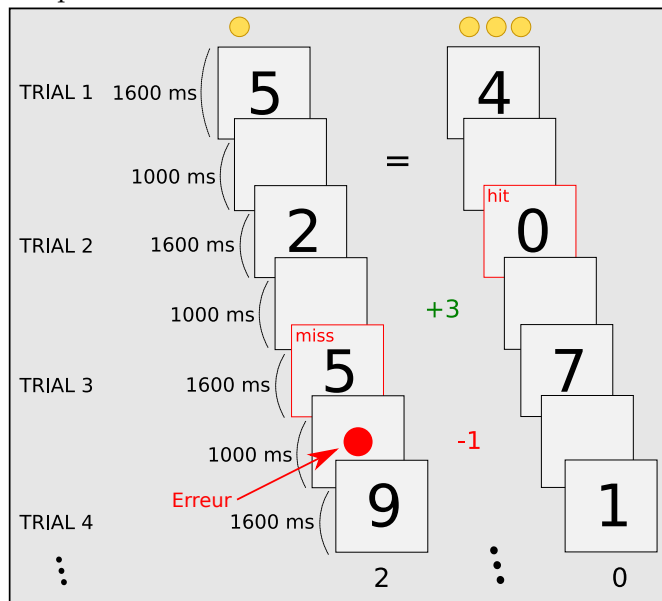
Les participants étaient informés qu'ils allaient voir des suites de chiffres et que, pour chaque chiffre, ils devraient le comparer avec le chiffre apparu *N* rang(s) auparavant. Si ces deux chiffres étaient identiques, ils devaient appuyer sur le bouton central du boîtier de réponse. On ne demandait pas aux participants de répondre le plus rapidement possible. Néanmoins ils étaient informés que leur réponse devait être donnée avant la disparition du chiffre ( $\leq 800$  ms). Pour le niveau de difficulté *0-Back*, les participants devaient détecter et signaler toute occurrence du chiffre 0. La présente phase débutait toujours avec une difficulté de *0-Back*, et les participants étaient informés que le niveau de difficulté allait augmenter tant qu'ils parvenaient à détecter 50 % ou plus de chiffres-cibles, et que la tâche s'arrêterait dans le cas inverse. Tous les participants ont atteint le niveau *2-Back*, avec au moins 50 % de cibles détectées pour ce dernier.

Chaque niveau de difficulté comprenait deux blocs successifs de 30 essais. Chaque bloc comportait 30 % de chiffres-cibles, distribués aléatoirement dans la séquence. Chaque essai débutait avec la présentation d'un chiffre pendant 800 ms, pendant lesquelles les participants pouvaient répondre. S'en suivait un intervalle inter-stimuli de 1000 ms. Un *feedback* d'erreur était éventuellement présenté pendant cette période. Enfin, le chiffre suivant apparaissait pendant 800 ms et ainsi de suite.





**Figure 6.3** – Environnement de la double-tâche de *N-Back*. Chaque sous-tâche est caractérisée par un attribut de difficulté et un attribut d'importance. Dans cet exemple, la sous-tâche A est difficile (*2-Back*) et de faible importance (1 point), alors que la sous-tâche B est plus facile (*0-Back*) et d'une plus grande importance (3 points). Pour chaque sous-tâche, une aire d'intérêt est définie : elle est indiquée en pointillés. Toutes les informations en dehors de l'écran, ainsi que les pointillés, sont présentés à titre illustratif.



**Figure 6.4** – Séquençage de la double-tâche de *N-Back*. Dans cet exemple, les participant devaient appliquer une règle de *2-Back* pour la sous-tâche A, et une règle de *0-Back* pour la sous-tâche B. Pour rappel, le *0-Back* consistait à signaler toute occurrence du chiffre 0.

### Version double-tâches

Les participants étaient ensuite informés qu'ils allaient devoir réaliser deux tâches de *N-Back* simultanément; qu'ils allaient donc voir deux séquences indépendantes de chiffres, qu'ils allaient devoir traiter simultanément. On informait ensuite les participants que chaque sous-tâche aurait des niveaux de difficulté (0, 1 ou 2-Back) et d'importance (1 ou 3 point(s)) indépendants. De plus, pour chaque cible correctement détectée, ils étaient informés qu'ils gagneraient le nombre de points rattaché à la sous-tâche correspondante et qu'inversement, toute erreur leur ferait perdre des points – le score initial étant de zéro. On indiquait ensuite aux participants qu'il existait deux manières de faire une erreur : manquer une cible (omission), ou signaler comme cible un chiffre distracteur (fausse alarme).

Les participants devaient réaliser le score *global* le plus élevé possible, étant entendu que le score global correspondait à la somme des scores des deux sous-tâches. Notons ici que les participants n'étaient pas orientés vers une quelconque stratégie exécutive. Ils étaient tout à fait libres de leur stratégie. Par exemple, ils pouvaient, s'ils le désiraient, abandonner l'une des deux sous-tâches.

Chaque bloc comportait 15 essais, soit deux séquences simultanées de 15 chiffres. À l'intérieur d'un bloc donné, chaque sous-tâche incluait 4 chiffres-cibles ( $\approx 30\%$ ). Chaque essai débutait par la présentation simultanée de deux chiffres, pendant 1600 ms, période durant laquelle les participants pouvaient donner leur(s) réponse(s). Les chiffres disparaissaient, pendant 1000 ms (intervalle inter-stimuli), durée pendant laquelle le *feedback*, ainsi que d'éventuelles erreurs étaient signalés. Enfin, les deux chiffres suivants apparaissaient pendant 1600 ms et ainsi de suite (Figure 6.4). Chaque bloc était précédé d'un écran de pause où le score réalisé précédemment était affiché. Notons que les attributs de difficulté et d'importance du bloc à venir étaient visibles pendant cette pause, de sorte que les participants pouvaient traiter cette information avant de débiter.

Avant la phase de test, les participants réalisaient 8 blocs d'entraînement d'associations difficulté-importance distinctes. Cet entraînement durait une dizaine de minutes. La calibration de l'eye-tracker avait lieu ensuite. La phase test comprenait 36 blocs, résultant du produit de toutes les combinaisons difficulté-importance possibles entre les deux sous-tâches ( $3 \times 2 \times 3 \times 2 = 36$ ). La phase test débutait toujours par deux sous-tâches de 0-Back de faible importance (1 point). Les 35 blocs suivants étaient présentés dans un ordre totalement aléatoire d'un participant à l'autre. Seule la succession de deux blocs symétriques était empêchée. Chaque bloc durait 50 secondes, de sorte que la phase dans sa totalité durait un peu plus de 30 minutes.

## 2.4. Mesures et plan expérimental

Pour chaque condition, la performance et l'allocation des ressources visuelles étaient évaluées. La performance était analysée par le biais des taux de détection, et l'allocation des ressources visuelles à travers les mesures du temps cumulé de fixation et du nombre de permutations.

**Performance** Durant la phase test, les taux de détection étaient relevés et systématiquement comparés avec la condition monotâche équivalente. Ce taux correspondait au nombre de cibles détectées, ramené au nombre total de cibles. Ce qui, dans les termes de la théorie de la détection du signal, revenait à diviser le nombre de détections (H), par la somme du nombre de détections (H) et des cibles omises (M). Par exemple pour la sous-tâche A :

$$T_A = \frac{H_A}{H_A + M_A}$$

Afin de distinguer les effets de nos manipulations, des effets dus à la concurrence elle-même (les « coûts de concurrence », voir [Navon et Gopher, 1979](#)), nous calculions systématiquement le coût des taux de détection, qui correspondaient en fait à la différence entre le taux de détection obtenu dans la condition double-tâche, et ce même taux obtenu pour une condition de difficulté équivalente, au moment de l'entraînement (monotâche). Autrement dit, le niveau de performance obtenu en condition monotâche, était considéré comme le niveau de base de la performance, auquel nous comparions le niveau atteint pendant la phase test. Un taux de détection *global* était aussi calculé. Celui-ci correspondait à la proportion totale de cibles détectées, pour l'ensemble des deux sous-tâches.

**Allocation des ressources visuelles** Les données oculaires étaient analysées selon trois aires d'intérêt (AOIs) : une pour chaque sous-tâche, et une *entre* les deux sous-tâches (Figure 6.3). Le temps cumulé de fixation (dénommé « temps de fixation » ci-après) correspondait à la somme des durées de l'ensemble des fixations pour une AOI donnée. Le nombre de permutations de tâches correspondait au nombre de fois où les participants passaient d'une sous-tâche à l'autre au cours d'un essai, c'est-à-dire au nombre de fois où deux fixations successives ne concernaient pas la même sous-tâche ( $A \rightsquigarrow B$  ou  $B \rightsquigarrow A$ ). Une fixation était définie comme un évènement oculaire, au cours duquel l'œil ne présentait pas une dispersion de plus de  $2^\circ$ , pendant une durée d'au minimum 80 ms. Le temps de fixation était exprimé en pourcentage du temps de fixation total pour les trois AOIs.

**Tableau 6.1** – Aires d'intérêt. L'origine du repère était située en haut, à gauche de l'écran, dont la résolution était de  $1680 \times 1050$  pixels

AOI	$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_2$
gauche	413	637	413	637
droite	1043	1267	413	637
centrale	637	1043	413	637

Les données étaient analysées à travers deux plans d'analyse distincts. Les données qui concernaient le niveau des sous-tâches, comme le taux de détection ou le temps de fixation, étaient soumises à une analyse de variance (ANOVA) à 3 facteurs intra-sujets qu'étaient la difficulté de la sous-tâche d'intérêt (0-Back *ou* 1-Back *ou* 2-Back), la difficulté de la sous-tâche concurrente (0-Back *ou* 1-Back *ou* 2-Back) et l'importance relative de la sous-tâche d'intérêt (inférieure *ou* égale *vs* supérieure).

D'un autre côté, les données qui décrivaient le comportement global, comme le taux de détection global, le temps de fixation pour l'AOI centrale ou encore le nombre de permutations de tâches, étaient soumises à une ANOVA à deux facteurs intra-individuels qu'étaient l'association de difficultés (0 – 0 *ou* 0 – 1 *ou* 0 – 2 *ou* 1 – 1 *ou* 1 – 2 *ou* 2 – 2) et la relation d'importances ( $A > B$  *ou*  $A = B$  *ou*  $A < B$ ). Pour ce dernier plan, les données de conditions symétriques étaient fusionnées, puisque deux conditions symétriques correspondaient, de ce point de vue, à une seule et même condition, contrebalancée sur le plan spatial (gauche  $\Leftrightarrow$  droite).

L'analyse des données était conduite avec le logiciel statistique R (version 3.2.1.)<sup>1</sup>. Le seuil de significativité était fixé à  $p = 0.05$  et l'état carré généralisé ( $\hat{\eta}_G^2$ ) était reporté. Toutes les valeurs de  $p$  étaient corrigées pour leur non-sphéricité avec la méthode de Greenhouse-Geisser. Le cas échéant, les analyses étaient complétées par des tests post-hoc reposant sur la méthode des comparaisons multiples appairées, corrigées avec la méthode de Bonferroni.

## 2.5. Commentaire préalable sur les analyses corrélationnelles

Les méthodes classiques de corrélation, comme la traditionnelle méthode de Pearson, impliquent toutes que les observations réalisées soient indépendantes les unes des autres (Cohen et al., 1983). En général, cette assumption ne pose aucun problème, pourvu que chaque couple de mesures (p.ex. la taille et le poids) corresponde à un seul participant. Toutefois, cette condition n'est pas

1. <https://cran.r-project.org/>

respectée dans des plans expérimentaux à mesures répétées, tel que celui que nous venons de présenter. La solution classique à ce problème consiste généralement à calculer la moyenne des différentes valeurs obtenues afin d'obtenir une et une seule valeur par participant et par mesure.

Toutefois, cette agrégation des données peut poser problème, dès lors que ces dernières présentent une forte variabilité, à mettre au compte d'une manipulation expérimentale – ce qui n'est pas rare dans un plan expérimental à mesures répétées. Ainsi – et suivant le conseil de [Bakdash et Marusich \(2017\)](#) – nous avons employé deux types d'analyses corrélationnelles, selon le type de questions auquel nous souhaitions répondre.

**Corrélation inter-individuelle** Lorsque la question portait sur l'évaluation de l'intensité de la relation, entretenue par deux variables *à travers les sujets* (inter-sujet), nous utilisons la méthode traditionnelle de corrélation de Pearson. Ici, nous avons utilisé cette méthode pour évaluer l'intensité du lien entre la tendance moyenne de priorisation, indexée par la différence absolue moyenne des temps de fixation entre les deux sous-tâches, et les niveaux moyens de performance et de score obtenus.

**Corrélation intra-individuelle** En revanche, lorsque nous souhaitions évaluer l'intensité de la relation, entretenue par deux variables, *à l'intérieur des sujets* (intra-sujet), nous ne pouvions plus utiliser une telle méthode. Par exemple, lorsque nous souhaitions évaluer la relation entre les niveaux de performance ou de score atteints pour une sous-tâche donnée, et la quantité de ressources allouée (c.-à-d., le temps de fixation), il n'était pas possible de ramener ces variables à une valeur unique, dans la mesure où il s'agissait de deux variables dépendantes, mesurées à plusieurs reprises, dans des conditions fondamentalement différentes. Dans ce type de situations, il ne s'agissait donc pas d'identifier la relation générale de deux variables au sein d'une population, mais plutôt d'évaluer leur covariance, au gré de manipulations intra-sujets (p.ex., manipulation des attributs). Pour ce faire, nous avons utilisé la librairie `rmcorr`<sup>2</sup> du logiciel statistique R, librairie spécialement dédiée à l'analyse des corrélations pour des mesures répétées (voir [Bakdash et Marusich, 2017](#), pour une description complète de la méthode d'analyse), et inspirée d'une méthode introduite par [Bland et Altman en 1995](#), dans le domaine des biostatistiques.

---

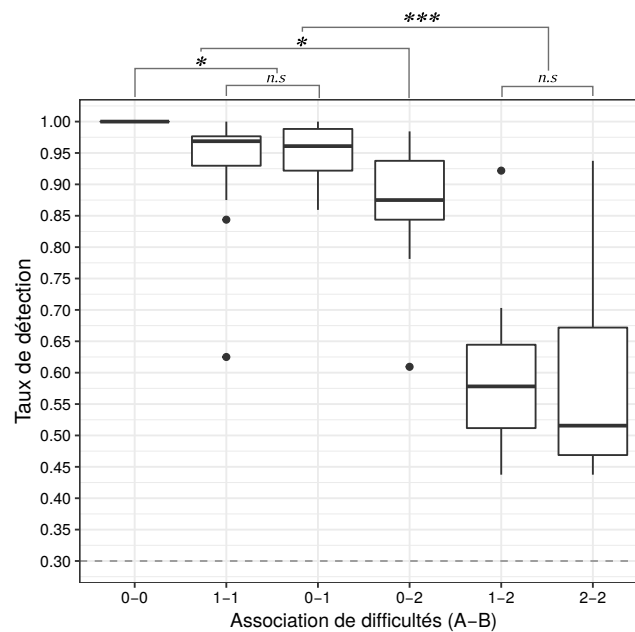
2. <https://cran.r-project.org/web/packages/rmcorr/>

### 3. Résultats

#### 3.1. Analyse de la performance

##### Effet des attributs sur le taux de détection global

L'ANOVA a révélé que la proportion globale de cibles détectées dépendait principalement de l'association de difficulté [ $F(5, 95) = 86.62, p < .001, \hat{\eta}_G^2 = .65$ ]. Les post-hoc ont permis de mettre en évidence deux groupes de difficultés : les conditions 1 – 2 et 2 – 2 étaient équivalentes ( $p = 1.0$ ) et engendraient un taux de détection inférieur ( $M = .59 \pm .04$ ) aux quatre autres associations de difficultés ( $M = .94 \pm .02; p < .001$ ). Il y avait quelques légères différences au sein même de ces quatre dernières conditions (Figure 6.5). En revanche, il n'y avait aucun effet principal de l'association d'importances [ $F(3, 57) = 1.40, p = .27$ ], ni d'interaction difficulté  $\times$  importance [ $F(15, 285) = 1.06, p = .38$ ]. Ces résultats soulignent que les niveaux de difficultés 1 – 2 et 2 – 2 induisaient un niveau de charge de travail plus élevé que les autres niveaux de difficultés.



**Figure 6.5** – Taux de détection globaux, par association de difficultés. La bande grasse dans les boîtes représente la valeur médiane. Les extrémités des boîtes représentent un intervalle de confiance de 95 %. Les moustaches représentent l'étendue. Les points sont des valeurs extrêmes (*outliers*). (*n.s.* : non significatif, \* < .05, \*\*\* < .001)

### Effet des attributs sur les coûts des taux de détection

Au niveau des sous-tâches, l'amplitude des coûts de détection (Figure 6.6) était influencée par une interaction de second ordre impliquant la difficulté propre, la difficulté concurrente, ainsi que l'importance relative [ $F(8,152) = 9.58, p < .001, \hat{\eta}_G^2 = .08$ ]. En clair, l'influence de l'importance relative sur la performance dépendait de l'association de difficultés. Sous une charge de travail plus faible (0 – 0, 1 – 1, 0 – 1, 0 – 2), l'importance relative n'avait aucun effet sur les coûts de détection ( $p \geq .84$ ). Par contre, lorsque le niveau de charge était plus élevé (1 – 2 and 2 – 2), les coûts étaient effectivement modulés par le niveau d'importance, ce qui confirme d'ores et déjà notre hypothèse H2a. Les tests post-hoc ont permis de préciser que les différences (inférieure > égale) et (égale > supérieure) étaient significatives ( $p < .001$ ). Par exemple, en concurrence avec un *1-Back*, les coûts pour une sous-tâche de *2-Back*, étaient plus forts si cette dernière était, respectivement, moins importante ( $M = .50 \pm .28$ ), également importante ( $M = .26 \pm .32$ ), ou plus importante ( $M = -.03 \pm .27$ ). Notons qu'il y avait une exception à cette règle, puisque les coûts d'un *1-Back* plus ou également important qu'un *2-Back* concurrent ne différaient pas significativement ( $p = .34$ ).

## 3.2. Analyse de l'allocation des ressources visuelles

### Effet des attributs sur la proportion de temps de fixation

Comme pour les coûts des taux de détection, la proportion de temps de fixation (Figure 6.7) dépendait d'une interaction de second ordre entre la difficulté concurrente, la difficulté concurrente ainsi que l'importance relative [ $F(8,152) = 9.08, p < .001, \hat{\eta}_G^2 = .06$ ]. Dans les associations de difficulté associées à une faible charge de travail (0 – 0, 1 – 1, 0 – 1, 0 – 2), l'importance relative n'avait pas d'effet sur l'allocation des ressources ( $p = 1.0$  pour 12 comparaisons), laquelle dépendait principalement de l'association de difficultés. En particulier, une quantité supérieure de ressources était allouée aux sous-tâches de *1-Back* ( $M = .82 \pm .16$ ) et *2-Back* ( $M = .77 \pm .18$ ), lorsque ces dernières étaient en concurrence avec une sous-tâche de *0-Back*, plutôt qu'un autre niveau de difficulté ( $p < .001$ , pour 4 comparaisons). Ce qui confirme notre hypothèse H1b. À l'inverse, sous des niveaux de charge plus élevée (1 – 2 et 2 – 2), plus la sous-tâche était importante, plus elle se voyait allouer une quantité élevée de ressources visuelles (supérieure > égale > inférieure;  $p < .01$ ; voir Figure 6.8), quel que soit son niveau de difficulté. Par exemple, lorsqu'elle était en concurrence avec une sous-tâche de *2-Back*, une sous-tâche de *1-Back* plus importante élicitait une proportion plus grande de temps de fixation ( $M = .68 \pm .27$ ), que si elle était également ( $M = .44 \pm .28$ ) ou moins





importante ( $M = .13 \pm .14$ ). Ces résultats confirment l'hypothèse H2b.

Il faut aussi souligner que certaines sous-tâches se voyaient allouer une proportion très faible de ressources, quoiqu'elles résultaient en de bons niveaux de performance. C'était le cas pour les conditions de difficulté 0 – 0 et 1 – 1. Ceci suggère que, dans ces conditions, les participants ont pu manifester des motifs visuels spécifiques, que nous détaillons donc ci-après, à travers les mesures du nombre de permutations et du temps de fixation pour l'AOI centrale.

### Temps de fixation pour l'AOI centrale

La proportion de ressources visuelles qui était allouée à l'AOI centrale (Figure 6.8) dépendait principalement de l'association de difficultés [ $F(5, 95) = 29.75, p < .001, \hat{\eta}_G^2 = .41$ ]. Les conditions 0 – 0 ( $M = .60 \pm .53$ ) et 1 – 1 ( $M = .53 \pm .31$ ) engendraient des temps de fixation équivalents ( $p = .15$ ) et significativement plus élevés que pour les autres conditions de difficultés ( $p < .001$ ). De plus, l'association de difficultés 2 – 2 amenait plus de temps de fixation au centre ( $M = .28 \pm .33$ ) que les associations 0 – 1 ( $M = .10 \pm .09; p < .001$ ) ou 0.2 ( $M = .11 \pm .11; p < .001$ ) ou 1 – 2 ( $M = .19 \pm .21; p = .07$ ). Bien qu'il soit difficile d'identifier précisément les facteurs contributifs de cette focalisation au centre, notons qu'elle semblait concerner plutôt les situations où les deux sous-tâches partageaient une même règle de réponse, et, au sein de ces conditions-là, plus fortement encore les situations de faible charge de travail (0 – 0 et 1 – 1).

Nous avons aussi relevé un effet principal de l'importance relative [ $F(3, 57) = 5.15, p < .01, \hat{\eta}_G^2 = .01$ ], toutefois, il ne correspondait à aucune différence significative des niveaux d'importance, pris deux à deux ( $p \geq .47$ ). Enfin, il n'y avait pas d'interaction difficulté  $\times$  importance [ $F(10, 190) = 1.12, p = .35$ ].

### Nombre de permutations de tâches

Le nombre de permutations de tâches (Tableau 6.2) s'expliquait principalement par l'association de difficultés [ $F(5, 95) = 5.11, p < .001, \hat{\eta}_G^2 = .06$ ]. En effet, les conditions 0 – 0 ( $M = 7.80 \pm 7.91$ ) et 2 – 2 ( $M = 7.71 \pm 10.62$ ) engendraient moins de permutations que les conditions 0 – 2 ( $M = 15.30 \pm 13.59; p < .006$ ), 1 – 2 ( $M = 13.74 \pm 12.60$ ) et 1 – 1 ( $M = 13.53 \pm 12.40$ ), bien que ce soit que par une différence marginale pour ces deux dernières ( $p < .07$  pour 4 comparaisons). Les autres comparaisons n'apportaient aucune différence significative ( $p \geq .53$ ).

Il y avait aussi un effet principal du niveau d'importance [ $F(2, 38) =$

**Tableau 6.2** – Nombre de permutations de tâches par minute, en fonction des associations de difficultés et d’importances. L’écart-type est indiqué entre parenthèses.

		Association de difficultés (A-B)					
		0-0	1-1	0-1	0-2	1-2	2-2
Importance	A > B	8.0 (± 7.6)	15.4 (± 13.7)	14.1 (± 13.4)	18.0 (± 15.2)	12.3 (± 13.8)	8.4 (± 11.2)
	A = B	7.5 (± 7.6)	13.3 (± 12.8)	11.5 (± 10.9)	14.6 (± 12.4)	15.5 (± 11.9)	8.0 (± 9.3)
	A < B	7.9 (± 8.9)	11.8 (± 10.8)	9.5 (± 10.1)	13.2 (± 13.2)	13.4 (± 12.4)	6.8 (± 11.7)

5.91,  $p < .01$ ,  $\hat{\eta}_G^2 = .01$ ], mais qui ne correspondait à aucune différence significative des niveaux d’importance, comparés deux-à-deux ( $p \geq .42$ ). Enfin, il n’y avait pas d’interaction entre l’association de difficultés et l’association d’importances [ $F(10, 190) = 1.68$ ,  $p = .09$ ].

### 3.3. Analyses corrélationnelles

Pour rappel, il y avait deux types d’analyses corrélationnelles. La première analyse inter-individuelle, devait permettre de faire ressortir une relation éventuelle entre la tendance moyenne des participants à se prioriser, et le niveaux généraux de performance ou de score atteints. La seconde analyse intra-individuelle, devait permettre de mettre en évidence, à l’intérieur de chaque participant, la relation entre la quantité de ressources allouée une sous-tâche donnée, et la performance ou le score réalisé localement. Cette distinction entre score et taux de détection devait permettre, outre l’analyse pure de la performance, de faire ressortir le caractère *rationnel* (c.-à-d., en lien avec le but) des comportements observés.

#### 3.3.1. Corrélations inter-sujet, entre le comportement global de priorisation et les niveaux de taux de détection et de score

**Taux de détection** Nous n’avons pas relevé de relation significative entre la tendance moyenne des participants à se prioriser, c.-à-d. à manifester une différence dans les quantités de ressources visuelles allouées respectivement aux deux sous-tâches, et la performance globale qu’ils atteignaient. En effet, une corrélation de Pearson a montré qu’il n’existait pas de corrélation significative, à travers les participants, entre la moyenne des différences absolues des temps de fixation (entre les deux sous-tâches), et le taux de détection moyen obtenu, [ $r = -0.01$ ,  $df = 18$   $p = .96$ ]. De ce point de vue, les participants qui se priorisaient le plus n’étaient – *globalement* – pas plus *performants* que les autres, dans la mesure où leur comportement attentionnel

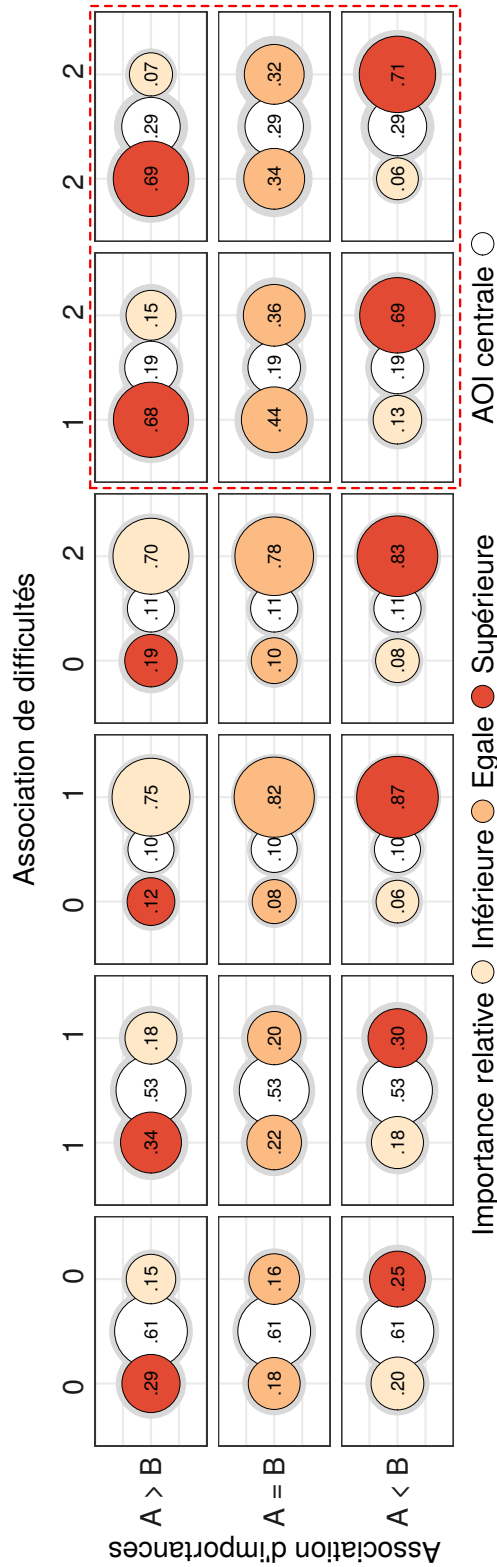
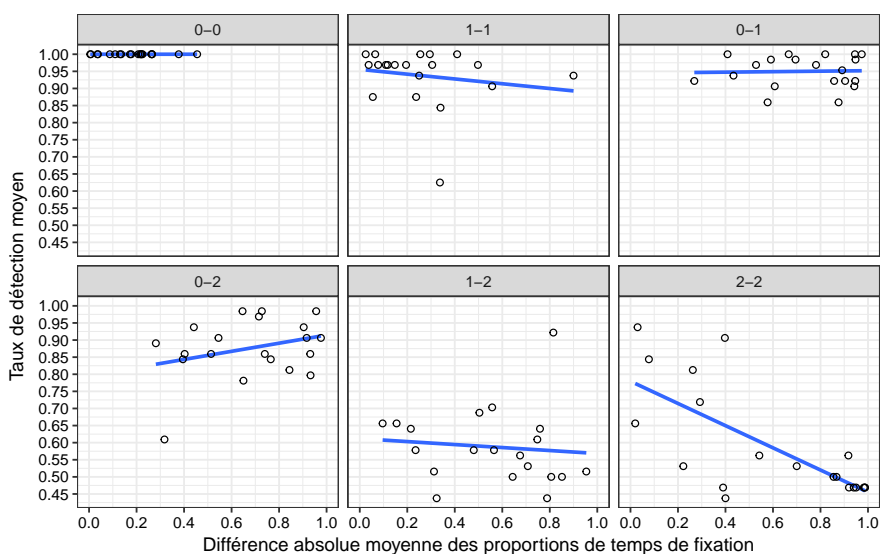


Figure 6.8 – Proportion des temps de fixations pour les trois AOIs. Chaque colonne représente une association de difficultés, et chaque ligne une association d'importances. La taille de chaque cercle est proportionnelle à la quantité de ressources visuelles allouées. L'aire gris clair représente l'écart-type. Comme on peut le voir, l'importance relative des tâches avait un effet significatif sur l'allocation des ressources visuelles, *seulement dans les conditions de difficultés 1 – 2 et 2 – 2* (cadre en pointillés rouges).



**Figure 6.9** – Corrélations de Pearson, entre les différences absolues moyennes des temps de fixation, et les taux moyens de détection obtenus, pour chaque combinaison de difficulté. Seule la combinaison 2 – 2 élicite une corrélation négative significative [ $r = -.71$ ,  $df = 18$   $p < .001$ ].

ne leur permettait pas d'atteindre des niveaux plus élevés de performance globale.

Toutefois, dès lors que l'on renouvelait ces analyses pour chaque combinaison de difficultés, il apparaissait que sous la combinaison 2 – 2 de difficultés, il y existait une forte corrélation négative entre différence absolue des temps de fixation et taux moyen de détection [ $r = -.71$ ,  $df = 18$   $p < .001$ ] (Figure 6.9). Cette corrélation indiquait que, sous cette condition de difficulté, les participants qui continuaient de répartir leurs ressources *entre les deux sous-tâches* étaient ceux qui obtenaient les taux de détection globaux les plus élevés.

Les autres combinaisons de difficulté n'élicitaient jamais un  $r$  absolu plus élevé que .30, et un niveau de significativité plus petit que  $p = .19$  (Tableau 6.3).

**Score** Il n'existait pas non plus de corrélation significative entre la tendance des participants à se prioriser et le score moyen qu'ils obtenaient, à travers l'ensemble des blocs de la phase test [ $r = .08$ ,  $df = 18$   $p = .72$ ]. De ce point de vue, il était possible d'affirmer que *globalement*, les participants qui se priorisaient le plus n'étaient ni plus, ni moins rationnels que les autres. Et, concernant la tendance à établir une différence plus ou moins forte entre les deux sous-tâches, il n'y avait pas un comportement qui permettait, en moyenne, une atteinte plus rationnelle du but assigné. De même, lorsque nous considérons chaque combinaison de difficultés indépendamment, il n'y avait

**Tableau 6.3** – Corrélations inter-individuelles ( $df = 18$ ) entre la tendance moyenne des participants à se prioriser et le taux de détection ou le score moyens obtenus, en fonction de la difficulté.

		Combinaison de difficultés					
		0-0	1-1	0-1	0-2	1-2	2-2
<b>Taux de détection</b>	r	0.00	-0.17	-0.03	0.31	-0.10	-0.71
	p	1.00	.47	.89	.19	.67	<.001
<b>Score</b>	r	-0.12	-0.09	-0.03	0.36	0.19	-0.36
	p	.61	.70	.89	.12	.43	.12

pas une condition pour laquelle cette même corrélation s'avérait significative (Tableau 6.3).

### 3.3.2. Influence locale des temps de fixation, sur les niveaux de taux de détection et de score atteints (corrélations intra-individuelles)

**Taux de détection** Lorsque l'on s'intéressait à la corrélation intra-sujet entre le taux de détection et la quantité de ressources allouée (temps cumulé de fixation), nous observions une corrélation positive significative, de faible intensité [ $r = .16$ ,  $df = 1415$   $p < .001$ ], signifiant que, globalement, plus une sous-tâche se voyait allouée de ressources visuelles, plus elle élicitait un taux de détection élevé.

Ce phénomène était d'autant plus saillant que la sous-tâche en question était de difficulté élevée. Ainsi, toute chose étant égale par ailleurs, la performance à un 0-Back ne reposait pas sur la quantité de ressources allouée [ $r = .06$ ,  $df = 459$   $p = .17$ ]. Au contraire, la performance aux sous-tâches de 1-Back était faiblement corrélée au temps de fixation localement élicité [ $r = .26$ ,  $df = 459$   $p < .001$ ], et cette corrélation était modérée-forte, lorsque l'on considérait les sous-tâches de 2-Back [ $r = .67$ ,  $df = 455$   $p < .001$ ].

**Score** L'influence du temps de fixation sur le sous-score obtenu à une sous-tâche, était faible mais significative [ $r = .10$ ,  $df = 1415$   $p < .001$ ]. Ce résultat intra-individuel indiquait que, pour chaque participant, le score obtenu à une sous-tâche était sensiblement plus élevée dès lors que celui-ci lui attribuait plus de ressources visuelles. Comme pour le taux de détection, cette corrélation était d'autant plus forte que la sous-tâche était difficile (Tableau 6.4).

Ainsi, dans le contexte de cette double-tâche, la relation entretenue entre priorisation et performance dépendait du niveau *global* ou *local* de l'analyse. Au niveau global, les comportements de priorisation ne s'accompagnaient

**Tableau 6.4** – Corrélations intra-sujets, entre le temps de fixation et les niveaux atteints, pour le taux de détection et le score, en fonction de la difficulté de la sous-tâche.

		Difficulté de la sous-tâche		
		0-Back	1-Back	2-Back
<b>Taux de détection</b>	r	0.06	0.26	0.67
	p	.17	<.001	<.001
<b>Sous-score</b>	r	0.19	0.23	0.51
	p	<.001	<.001	<.001

généralement pas d'une amélioration de la performance globale. Au contraire, dans les conditions les plus difficiles (2 – 2), plus les participants établissaient une préférentielle attentionnelle pour l'une des deux sous-tâches, moins ils détectaient de cibles ( $r = -.71$ ). Toutefois, cette diminution de la performance, sous cette condition de difficulté, n'avait pas d'incidence sur la rationalité globale des participants (score).

Au niveau local, en revanche, l'augmentation de la quantité de ressources allouée à une sous-tâche se traduisait, en général par une augmentation du taux de détection ( $r = .16$ ). Ceci était d'autant plus marqué dès lors que la sous-tâche en question était difficile, c.-à-d. sollicitait une quantité élevée de ressources, comme une sous-tâche de 2-Back ( $r = .67$ ). Cette augmentation du taux de détection s'accompagnait, en outre, d'une amélioration de la *rationalité locale*. En effet, pour une sous-tâche donnée, le (sous-)score obtenu était d'autant plus élevé que l'était la quantité de ressources visuelles qui lui était allouée. Enfin, cette dépendance entre score et temps de fixation était d'autant forte que la sous-tâche était difficile.

### Synthèse des résultats

L'interaction de second ordre que nous avons observée pour les coûts des taux de détection était reliée à une réorientation ouverte des ressources attentionnelles vers la sous-tâche la plus importante, dans les conditions de charge de travail plus élevée. De plus, lorsque la charge de travail était plus faible, nous avons observé deux types de comportements oculaires. Quand les règles de réponse étaient identiques (0 – 0 et 1 – 1), les participants semblaient favoriser le traitement périphérique des deux sous-tâches, indiqué par une augmentation du temps de fixation pour l'AOI centrale. D'un autre côté, quand les règles de réponses étaient différentes (0 – 1 et 0 – 2), les participants allouaient préférentiellement leurs ressources visuelles vers la sous-tâche la plus difficile. Ainsi, selon le niveau général de charge de travail, les deux

attributs des sous-tâches ne contribuaient pas systématiquement à l'allocation des ressources visuelles.

Dans le cadre de notre questionnement, la mesure du nombre de permutations de tâches ne s'avérait pas aussi pertinente que celle des temps de fixation. Premièrement, une diminution du nombre de permutations de tâche pouvait être causée par deux phénomènes distincts : un accroissement de la focalisation attentionnelle sur la sous-tâche la plus importante, dans la condition de difficultés 2 – 2 par exemple, ou bien un traitement périphérique des deux sous-tâches, par exemple dans la condition 0 – 0. Deuxièmement, cette mesure était moins discriminante des différentes conditions, et admettait une idiosyncrasie plus forte. Troisièmement, elle est moins directement reliée au phénomène qui, de notre point de vue est au cœur de la priorisation, c'est-à-dire l'allocation d'une quantité limitée de ressources dans une fenêtre de temps donnée. Toutefois, la mesure peut s'avérer utile pour mieux distinguer des conditions qui amènent des résultats équivalents en termes de temps de fixation. Par exemple, bien qu'il ne s'agisse pas d'une différence significative ici, une augmentation du nombre de permutations a pu être observée entre les conditions 0 – 0 et 1 – 1, lesquelles élicitaient des comportements équivalents, si l'on s'en tient à la mesure des temps de fixation.

Enfin, la tendance des participants à se prioriser, c.-à-d. à établir une différence plus ou moins marquée entre les deux sous-tâches, en termes de ressources visuelles, n'avait pas d'influence significative du point de vue rationnel. Autrement dit, les participants qui se priorisaient le plus n'ont pas réalisé des scores significativement plus élevés que les autres. En revanche, au niveau *local*, plus une sous-tâche se voyait allouer de ressources visuelles, plus son (sous-)score était élevé.

## 4. Discussion

Les résultats que nous venons de présenter sont compatibles avec notre hypothèse générale selon laquelle les différents attributs des tâches ne biaiseraient pas systématiquement l'allocation des ressources visuelles à travers les différentes conditions, ce qui permettrait d'expliquer les divergences observées dans la littérature à ce sujet. Plus particulièrement, nous pensons, comme cela s'est vérifié, que les participants se prioriseraient en fonction de l'importance des sous-tâches, *uniquement lorsque leurs ressources seraient excédées* par le niveau général de demande. En effet, les divers attributs n'ont pas modulé *linéairement* l'allocation des ressources, au lieu de quoi les participants semblent avoir changé de stratégies, passant d'une allocation *dirigée par la difficulté* à une allocation dirigée par l'importance, selon le niveau de charge

de travail. Autrement dit, l'attribut d'importance n'avait aucun poids dans le choix de la stratégie attentionnelle, dans la mesure où une politique *gloutonne et polie* (Salvucci et Taatgen, 2008) permettait aux participants de détecter un nombre élevé de cibles.

Ces résultats sont en accord avec un nombre significatif de travaux, ayant démontré l'importance de la priorisation dans le choix des stratégies attentionnelles (Anderson, 2013; Chelazzi et al., 2014; Gopher et al., 1982, 2000; Janssen et Brumby, 2015; Kurzban et al., 2013; Matton et al., 2016; Schumacher et al., 2001), et plus généralement dans la régulation humaine en situation complexe (Loft et al., 2007). En particulier, nous avons montré que l'allocation des ressources est sujette à des modulations descendantes (*top-down*), qui sont fortement reliées au niveau général de charge, comme le suggérait le travail de Raby et Wickens (1994). Nous inspirant des travaux réalisés dans les domaines de l'apprentissage et de la résolution de problèmes, nous proposons que ces modulations sont soutenues par un niveau métacognitif qui surveille l'état occurrence de la performance, et prend éventuellement des décisions pour réguler l'allocation des ressources (Nelson, 1990). Dans les domaines que nous venons d'évoquer, il a par exemple été démontré que le temps accordé au traitement d'un item à mémoriser, était largement influencé par la complexité de l'item lorsque ce dernier était relativement simple à mémoriser, mais que ce temps subissait une influence plus grande d'attributs d'importance lorsque l'item devenait plus complexe (Ackerman, 2014; Koriat et al., 2014).

Bien que ce type de modulation ne soit pas encore inclus dans des modèles comme le STOM (Wickens et al., 2016, voir introduction, page 127), les présents résultats pourraient permettre de l'enrichir. Par exemple, nous avons montré que contrairement à ce que le modèle postule, l'interaction des attributs des tâches n'est pas *linéaire* mais est médiatisée par des adaptations volontaires des opérateurs, qui cherchent à « protéger » la performance lorsque celle-ci se trouve menacée par un niveau de difficulté trop élevé. Dans les termes du modèle STOM, il se pourrait que les poids ou les polarités des attributs se trouvent tout simplement modifiés, en fonction de paramètres dynamiques telle que la performance perçue, avec la possibilité pour les opérateurs, d'augmenter le poids de l'attribut d'importance dans le cas où l'objectif assigné ne pourrait être réalisé de façon optimale.

#### 4.1. Priorisation et heuristiques de décision

La présente étude illustre l'intrication des processus de prise de décision et de contrôle exécutif (Coutlee et Huettel, 2012). Dès lors qu'un opérateur fait face à un problème de simultanéité (Kurzban et al., 2013), le contrôle exécutif requiert la possibilité pour l'opérateur d'évaluer l'ensemble des tâches



disponibles, quant à leurs priorités respectives, afin de sélectionner une stratégie. Mais quel est le critère de cette décision ? Et ce processus d'évaluation peut-il être décrit ? Le caractère discontinu de nos données plaide en faveur d'une prise de décision de nature *heuristique*.

Dans le champ de la prise de décision, nombreuses sont les études qui ont montré que, faisant face à plusieurs alternatives, les individus prennent leur décision en se basant sur des heuristiques plutôt que des analyses rationnelles et exhaustives (Gigerenzer et Gaissmaier, 2011; Payne et al., 1993). Par exemple, selon l'heuristique « prendre-le-meilleur » (*take-the-best*; Brandstätter et al., 2006), l'individu qui, par exemple, souhaite acquérir un véhicule, détermine en premier lieu l'attribut le plus important pour lui (p.ex., le prix) et vérifie si ce dernier permet de discriminer les différentes alternatives qui s'offrent à lui. Dans le cas contraire, il considère le second attribut le plus important (p.ex., la puissance) et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il puisse prendre une décision. Non seulement ce type de politiques amène souvent des choix aussi (sinon plus) précis que des politiques plus rationnelles, mais il est aussi plus plausible que ces dernières, dans la mesure où il s'accompagne de calculs bien moins coûteux et permet à l'opérateur d'éviter un effort mental inutile, ce qui est une logique fondamentale de l'économie cognitive humaine (Kool et al., 2010; Taatgen, 2007).

Dans la présente étude, de telles heuristiques ont pu être à l'œuvre, dans la mesure où l'attribut d'importance n'exerçait aucune influence lorsqu'une stratégie dirigée par la difficulté était *satisfaisante*. Cela suggère qu'une activité, aussi complexe soit-elle, implique des heuristiques de décision et, plus particulièrement, que les opérateurs n'y considèrent pas systématiquement l'ensemble de l'information au moment de sélectionner une stratégie quant à l'allocation de leurs ressources. Dans cette perspective, un opérateur en environnement multitâches pourrait se fier à l'attribut le plus important des tâches pour sélectionner une stratégie exécutive appropriée, et explorer le second attribut le plus important dès lors que le premier ne permet pas de trouver une stratégie exécutive satisfaisante. Par exemple, dans la présente étude, les participants ne tenaient pas compte de l'importance des tâches dès lors que l'attribut de difficulté *suffisait* à conduire une stratégie satisfaisante, au regard du but assigné.

Toutefois, nous ne voulons pas dire ici que ces critères s'excluent mutuellement. La structure de la tâche ne cesse jamais d'influencer l'activité, et la difficulté des tâches, en un sens, *continue d'influencer* le contrôle exécutif, dans la mesure où c'est elle-même qui pousse l'opérateur à trouver d'autres attributs pour diriger l'allocation de ses ressources. Il ne s'agit donc pas de dire que les participants ne « traitent » qu'un et un seul attribut à la fois, mais

plutôt qu'au plan stratégique, un attribut se voit donner la primauté.

Si cela est correct, cette hypothèse pourrait fournir une explication fondamentale de la façon dont les opérateurs font face à la complexité informationnelle des environnements de travail, en dépit de la limitation de leurs ressources (Norman et Bobrow, 1975; Kahneman, 1973; Sperandio, 1971). De plus, cela serait cohérent avec certaines théories émergentes, qui postulent que les individus cherchent à éviter les opérations mentales coûteuses (Kool et al., 2010), à la faveur d'heuristiques « rapides et efficaces » (*“fast and frugal”*; Gigerenzer et Gaissmaier, 2011). D'un point de vue purement computationnel, cela correspond à l'idée que les opérateurs favorisent les stratégies qui comportent un nombre *minimal* d'étapes de contrôle (Taatgen, 2007). Cela expliquerait aussi comment un opérateur se priorise lorsque les tâches disponibles présentent des attributs multiples et parfois contradictoires, en termes de polarité. Dans ce dernier cas, au lieu de postuler une intégration continue et rationnelle de deux ou plusieurs attributs, la présente étude suggère que les divers attributs sont en fait *ordonnés* et *explorés* dans l'ordre, jusqu'à ce que l'un de ces attributs amène à une stratégie satisfaisante.

## 4.2. Les deux rationalités de la priorisation

Du point de vue leur conséquence, en termes de performance, les comportements de priorisation ont ici montré deux facettes. De façon générale, les participants qui se priorisaient le plus ne montraient pas un niveau moyen de performance plus élevé. En revanche, pour les combinaisons 1 – 2 et 2 – 2, plus les participants faisaient une différence entre les deux sous-tâches, au niveau visuel, moins bonne était leur performance globale. Ceci peut s'entendre. En effet, dans la mesure où les comportements de priorisation répondent principalement à un dépassement de la simultanéité des sollicitations (Kurzban et al., 2013), ceux-là ont plus de chances de se manifester dans les conditions où les ressources des participants sont insuffisantes pour traiter les deux sous-tâches de façon optimale. En revanche, de façon générale, les sous-tâches élicitaient des niveaux de performance d'autant plus élevés qu'elles recevaient une grande proportion de ressources visuelles. Ces deux visages de la rationalité de la priorisation seront discutés plus longuement lors de la discussion générale (p.232).

## 4.3. Limites

Cette étude comporte des limites, que nous tenterons de corriger dans les prochaines expériences que nous présenterons dans les chapitres suivants (pp. 155 et 182). Tout d'abord, le nombre limité (2) d'attributs impliqués ici ne

nous a pas permis d'identifier avec plus de précision les types d'heuristiques qui étaient effectivement utilisés par les participants. L'heuristique que nous avons présentée précédemment n'est, en effet, qu'un exemple parmi d'autres d'heuristiques possibles. De plus, nous nous sommes concentrés ici à élaborer la situation la plus simple possible : celle où deux tâches identiques présentent deux attributs, identiques eux-aussi. En situation réelle, c'est à un ensemble de tâches et d'attributs plus disparate que les opérateurs doivent faire face.

De plus, si les résultats suggèrent un rôle pour l'ordonnancement des attributs, notre paradigme ne permet pas de décrire correctement ces ordonnancements. Certes nous avons vu que les participants changeaient de critère pour la définition de leur stratégie, en fonction de la charge de travail ; mais rien ne nous permet de conclure quant à la hiérarchie réelle entre ces attributs pour le moment.

Enfin nous avons montré qu'une manipulation de la difficulté générale de la tâche (par les règles de *N-Back*) affectait clairement la façon dont les divers attributs influençaient la priorisation. Toutefois, comme la revue de littérature l'a montré, il ne s'agit pas seulement de décrire et comparer les phénomènes de priorisation dans des situations à charge de travail variable, mais aussi de comprendre la logique de la priorisation, lorsque la charge se trouve *constamment* élevée : ce qui n'était pas le cas ici.

Ces éléments seront repris dans la présentation de la contribution suivante.

## Bibliographie du chapitre

- Ackerman, R. (2014). The diminishing criterion model for metacognitive regulation of time investment. *Journal of Experimental Psychology : General*, 143(3) :1349.
- Anderson, B. A. (2013). A value-driven mechanism of attentional selection. *Journal of Vision*, 13(3) :7.
- Bakdash, J. Z. et Marusich, L. R. (2017). Repeated measures correlation. *Frontiers in Psychology*, 8.
- Barabasi, A.-L. (2005). The origin of bursts and heavy tails in human dynamics. *Nature*, 435(7039) :207–211.
- Bland, J. M. et Altman, D. G. (1995). Calculating correlation coefficients with repeated observations : part 1 – correlation within subjects. *BMJ*, 310(6980) :633.
- Brandstätter, E., Gigerenzer, G., et Hertwig, R. (2006). The priority heuristic : making choices without trade-offs. *Psychological Review*, 113(2) :409.
- Chelazzi, L., Eštočinová, J., Calletti, R., Gerfo, E. L., Sani, I., Della Libera, C., et Santandrea, E. (2014). Altering spatial priority maps via reward-based learning. *The Journal of Neuroscience*, 34(25) :8594–8604.

- Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., et Aiken, L. S. (1983). Multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences. *Hillsdale, NJ : Earlbaum.*
- Coutlee, C. G. et Huettel, S. A. (2012). The functional neuroanatomy of decision making : Prefrontal control of thought and action. *Brain Research*, 1428 :3–12.
- Gigerenzer, G. et Gaissmaier, W. (2011). Heuristic decision making. *Annual Review of Psychology*, 62 :451–482.
- Gopher, D., Armony, L., et Greenshpan, Y. (2000). Switching tasks and attention policies. *Journal of Experimental Psychology : General*, 129(3) :308–339.
- Gopher, D., Brickner, M., et Navon, D. (1982). Different difficulty manipulations interact differently with task emphasis : evidence for multiple resources. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 8(1) :146.
- Gutzwiller, R. S., Wickens, C. D., et Clegg, B. A. (2014). Workload overload modeling an experiment with matb-ii to inform a computational model of task management. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 58 of 1, pages 849–853.
- Jaeggi, S. M., Seewer, R., Nirikko, A. C., Eckstein, D., Schroth, G., Groner, R., et Gutbrod, K. (2003). Does excessive memory load attenuate activation in the prefrontal cortex ? load-dependent processing in single and dual tasks : functional magnetic resonance imaging study. *NeuroImage*, 19(2) :210–225.
- Janssen, C. P. et Brumby, D. P. (2015). Strategic adaptation to task characteristics, incentives, and individual differences in dual-tasking. *PLoS ONE*, 10(7) :–0130009.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall series in experimental psychology. Prentice-Hall.
- Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of experimental psychology*, 55(4) :352.
- Kool, W., McGuire, J. T., Rosen, Z. B., et Botvinick, M. M. (2010). Decision making and the avoidance of cognitive demand. *Journal of Experimental Psychology : General*, 139(4) :665.
- Koriat, A., Ackerman, R., Adiv, S., Lockl, K., et Schneider, W. (2014). The effects of goal-driven and data-driven regulation on metacognitive monitoring during learning : A developmental perspective. *Journal of Experimental Psychology : General*, 143(1) :386.
- Kurzban, R., Duckworth, A., Kable, J. W., et Myers, J. (2013). An opportunity cost model of subjective effort and task performance. *The Behavioral and Brain Sciences*, 36(6) :661–679.
- Loft, S., Sanderson, P., Neal, A., et Mooij, M. (2007). Modeling and predicting mental workload in en route air traffic control : Critical review and broader implications. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(3) :376–399.

- Matton, N., Paubel, P., Cegarra, J., et Raufaste, E. (2016). Differences in multitask resource reallocation after change in task values. *Human Factors*.
- Navon, D. et Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3) :214.
- Nelson, T. O. (1990). Metamemory : A theoretical framework and new findings. *Psychology of Learning and Motivation*, 26 :125–173.
- Norman, D. A. et Bobrow, D. J. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7 :44–64.
- Payne, J. W., Bettman, J. R., et Johnson, E. J. (1993). *The adaptive decision maker*. Cambridge University Press.
- Peirce, J. W. (2009). Generating stimuli for neuroscience using psychopy. *Frontiers in Neuroinformatics*, 2(10).
- Raby, M. et Wickens, C. D. (1994). Strategic workload management and decision biases in aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 4(3) :211–240.
- Salvucci, D. et Bogunovich, P. (2010). Multitasking and monotasking : the effects of mental workload on deferred task interruptions. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pages 85–88.
- Salvucci, D. et Taatgen, N. A. (2008). Threaded cognition : an integrated theory of concurrent multitasking. *Psychological Review*, 115(1) :101–130.
- Schumacher, E. H., Seymour, T. L., Glass, J. M., Fencsik, D. E., Lauber, E. J., Kieras, D. E., et Meyer, D. E. (2001). Virtually perfect time-sharing in dual-task performance : Uncorking the central cognitive bottleneck. *Psychological Science*, 12(2) :101–108.
- Sperandio, J. C. (1971). Variation of operator's strategies and regulating effects on workload. *Ergonomics*, 14(5) :571–577.
- Taatgen, N. A. (2007). *Integrated Models of Cognitive Systems*, chapter The minimal control principle, pages 368–379. New York : Oxford University Press.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., et Santamaria, A. (2015). Discrete task switching in overload : A meta-analysis and a model. *International Journal of Human-Computer Studies*, 79 :79–84.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., Vieane, A., Clegg, B. A., Sebok, A., et Janes, J. (2016). Time sharing between robotics and process control validating a model of attention switching. *Human Factors*, 58(2) :322–343.



## CHAPITRE 7

# *Deuxième contribution*

## *Les heuristiques de priorisation*

<b>1 Introduction</b> .....	155
<b>2 Méthode</b> .....	159
2.1 Participants .....	159
2.2 Matériel .....	159
2.3 Procédure .....	161
2.4 Mesures et plan expérimental .....	164
<b>3 Résultats</b> .....	165
3.1 Préambule : des comportements oculaires disparates .....	165
3.2 Analyse de la performance .....	166
3.3 Analyse de l'allocation des ressources visuelles .....	170
3.4 Analyses corrélationnelles .....	171
3.5 Synthèse des résultats .....	172
<b>4 Discussion</b> .....	173
4.1 Les déterminants de la priorisation .....	174
4.2 Les heuristiques de priorisation .....	176

### **1. Introduction**

Les résultats de la contribution précédente ont mis en évidence un effet de la charge de travail sur les comportements de priorisation. Lorsque la charge était faible, la difficulté des sous-tâches dirigeait l'allocation des ressources visuelles; au contraire, lorsque la charge était élevée, c'est l'importance des sous-tâches qui dirigeait cette allocation. De plus, ces effets s'excluaient mutuellement : nous n'avons pas observé d'*influence linéaire conjointe* des différents attributs des sous-tâches, sur les comportements de priorisation,

mais plutôt un changement stratégique du critère de priorisation (difficulté *ou* importance), en fonction du niveau général de charge de travail. Partant de ce constat, nous avons fait l'hypothèse que l'évaluation des priorités n'est pas un processus *exhaustif*, établissant la priorité d'une tâche comme un compromis entre ses différents attributs, mais plutôt un processus *sélectif*, ramenant la priorité d'une tâche à *l'un de ses attributs*, à chaque instant. Nous avons ensuite établi une analogie entre ce phénomène et les heuristiques étudiées dans le champ de la décision (Brandstätter et al., 2006; Gigerenzer et Gaissmaier, 2011; Montgomery, 1983; Payne et al., 1993; Tversky et Kahneman, 1973). Selon ces travaux, des jugements en apparence coûteux peuvent s'expliquer par une série d'opérations simples. Ainsi, lorsqu'un individu est confronté à un ensemble d'alternatives, toutes décrites par un ensemble d'attributs, les choix réalisés par les individus sont aussi bien, sinon mieux expliqués par des heuristiques, que par des stratégies rationnelles de calcul d'utilité espérée, intégrant l'ensemble des attributs (Gigerenzer et Gaissmaier, 2011). Comme l'avancé déjà Montgomery en 1983, puisque « dans la plupart des situations de décision, il n'existe pas une alternative qui domine *strictement*<sup>1</sup> toutes les autres alternatives », l'individu cherche, en général, à modifier sa représentation de la situation en utilisant un ensemble de stratégies simples (Tableau 7.1, p.157), de sorte que l'une des alternatives s'approche le plus possible d'un statut de *dominance*.

Par exemple, selon l'heuristique *prendre-le-meilleur* (TTB pour « take-the-best »; Gigerenzer et Goldstein, 1996), l'individu qui souhaite acquérir un véhicule détermine en premier lieu l'attribut le plus pertinent pour lui (p.ex., le prix du véhicule) et vérifie si ce dernier permet de discriminer les différentes alternatives. Dans le cas contraire, il considère le second attribut le plus pertinent (p.ex., la puissance) et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il puisse effectuer son choix.

L'heuristique de comptage (*tallying*) mérite aussi d'être mentionnée. Selon cette dernière, les individus ne favorisent aucun attribut des alternatives, mais les considérant tous, sélectionnent l'alternative qui comporte le plus d'attributs « favorables ». Dans ce cadre, le véhicule choisi ne sera donc pas celui qui présente le meilleur résultat pour l'attribut le plus pertinent, mais celui pour lequel le nombre d'attributs favorables sera le plus élevé. Ce dernier type d'heuristiques renvoie à l'idée que, lorsqu'ils cherchent à évaluer l'utilité des différentes alternatives, les individus ne comptent que sur la *polarité* des différents attributs en ignorant leurs *poids* respectifs (Dawes, 1979).

---

1. Est *strictement* (ou purement) dominante « une alternative qui n'est pas pire que les autres pour quelque attribut que ce soit, et qui est meilleure pour au moins un attribut » (traduit de Montgomery, 1983, p. 344).



**Tableau 7.1** – Exemples de règles de décision, identifiés par [Montgomery \(1983\)](#), comme contribuant à rapprocher une alternative d'un statut de dominance. Traduit et adapté de [Montgomery \(1983, p.345\)](#)

Nom de la règle	Critères de choix
Dominance	Choisir l'alternative $A_1$ si cette dernière est meilleure qu' $A_2$ pour au moins un attribut, et pas pire qu' $A_2$ pour tous les autres attributs
Conjonctif	Retenir uniquement les alternatives qui sont supérieures ou égales à un ensemble de valeurs-cibles $C_i$ pour les attributs
Disjonctif	Retenir uniquement les alternatives qui sont supérieures ou égales à <i>au moins l'une</i> d'un ensemble de valeurs-cibles $D_i$ pour les attributs
Prendre-le-meilleur	Choisir l'alternative $A_1$ si elle est meilleure (ou significativement meilleure) qu' $A_2$ pour l'attribut le plus important. Si cette exigence n'est pas satisfaite, baser le choix sur les dimensions les plus attractives des attributs suivants, par ordre d'importance, etc.
Élimination par aspect	Exclure toutes les alternatives qui ne dépassent pas une valeur-cible $C_i$ , pour l'attribut le plus important. Répéter éventuellement cette procédure avec les autres attributs, par ordre d'importance
Comptage	Choisir l'alternative qui comporte le plus d'attributs favorables
Addition des utilités	Choisir l'alternative avec la plus grande somme de valeurs pondérées d'utilité, à travers l'ensemble des attributs
Addition des différences d'utilité	Ajouter les « différences » $D_k = f(a_{1k} - a_{2k})$ , où $a_{jk}$ est l'attractivité de l'attribut $k$ pour l'alternative $j$ , et $D_k$ , une fonction continue de $a_{1k} - a_{2k}$ . Si la somme de ces différences est positive, choisir $A_1$ , si elle est négative, choisir $A_2$

Si les résultats de notre première contribution semblent mieux expliqués par une heuristique lexicographique (TTB), il n'est pas encore question de généraliser. En effet, la précédente expérimentation présentait un certain nombre de limites, que nous souhaitons maintenant adresser.

Tout d'abord, la charge de travail y était délibérément fluctuante et expliquait les changements stratégiques des participants. Si c'est un résultat intéressant, il est fort probable que le niveau de charge ne soit pas la seule explication des variations stratégiques observées chez les opérateurs. Comme le suggèrent les théories de la décision que nous avons présentées, il est aussi possible qu'un individu soit amené à changer le critère de ses décisions, en fonction des valeurs respectives de chaque attribut. Par exemple, selon l'heuristique TTB, lorsque l'attribut le plus pertinent n'est pas suffisamment discriminant, l'individu devrait être amené à considérer le deuxième attribut le plus pertinent, et ainsi de suite (Gigerenzer et Gaissmaier, 2011) – indépendamment de la charge de travail éprouvée.

De plus, dans la situation précédente, l'importance des sous-tâches était ramenée à un seul paramètre de récompense. Or, en situation opérationnelle, les individus font face, pour chacune des sous-tâches, à un ensemble d'informations dont plusieurs peuvent être liées à leur « importance » (échéance, criticité, récompense éventuelle...). Ainsi, au-delà du rôle propre de la charge de travail sur les stratégies de priorisation, il apparaît tout aussi pertinent d'évaluer ces stratégies à niveau de charge constant, et lorsque plusieurs attributs ont trait à l'importance des sous-tâches. De plus, si l'on considère que la priorisation a avant tout pour fonction de résoudre des conflits pour les ressources, il paraît d'autant plus pertinent d'étudier son fonctionnement dans des situations où ces conflits sont permanents.

Pour tenir compte de ces limites, nous avons élaboré une situation de double-tâches où les participants devaient surveiller deux ensembles de stimuli (barres), et détecter des événements peu fréquents de rotation. Chaque sous-tâche était caractérisée par trois attributs. Parmi ces attributs, l'un était relié à la difficulté (temps de rotation) des sous-tâches, et les deux autres à leur importance. Le premier déterminait les gains successifs à de bonnes réponses (récompense), le second les risques de perte en cas d'erreurs (tolérance à l'erreur). Les participants devaient maximiser le nombre de points qu'ils gagnaient. Pour induire un niveau élevé de charge de travail, nous évaluions, lors du pré-test, la vitesse de rotation en-deçà de laquelle les participants ne parvenaient pas à détecter plus de 50 % des rotations. Nous réutilisons ces valeurs lors de la phase test, afin d'y maintenir un niveau élevé de charge. Enfin, comme dans l'expérimentation précédente, des indices de performance et de comportement oculaire étaient relevés.

Nous avons fait les hypothèses suivantes. Tout d'abord, en accord avec nos résultats précédents, nous pensons que du fait de la surcharge constante, l'attribut de difficulté n'aurait pas d'influence sur les stratégies attentionnelles (H1a), ni sur les niveaux de performance (H1b). Autrement dit nous pensons que les comportements oculaires, et les performances associées seraient exclusivement dirigés par l'importance des sous-tâches. De plus, nous pensons que la priorité des sous-tâches serait évaluée selon l'heuristique TTB (H2). Plus précisément, nous avons émis l'hypothèse que les participants ordonneraient les deux attributs d'importance et ne se fieraient qu'au second attribut dans la mesure où le premier ne serait pas discriminant, c.-à-d., montrerait des valeurs identiques pour les deux sous-tâches. Nous ne postulons *a priori* aucun ordonnancement particulier pour ces attributs.

## 2. Méthode

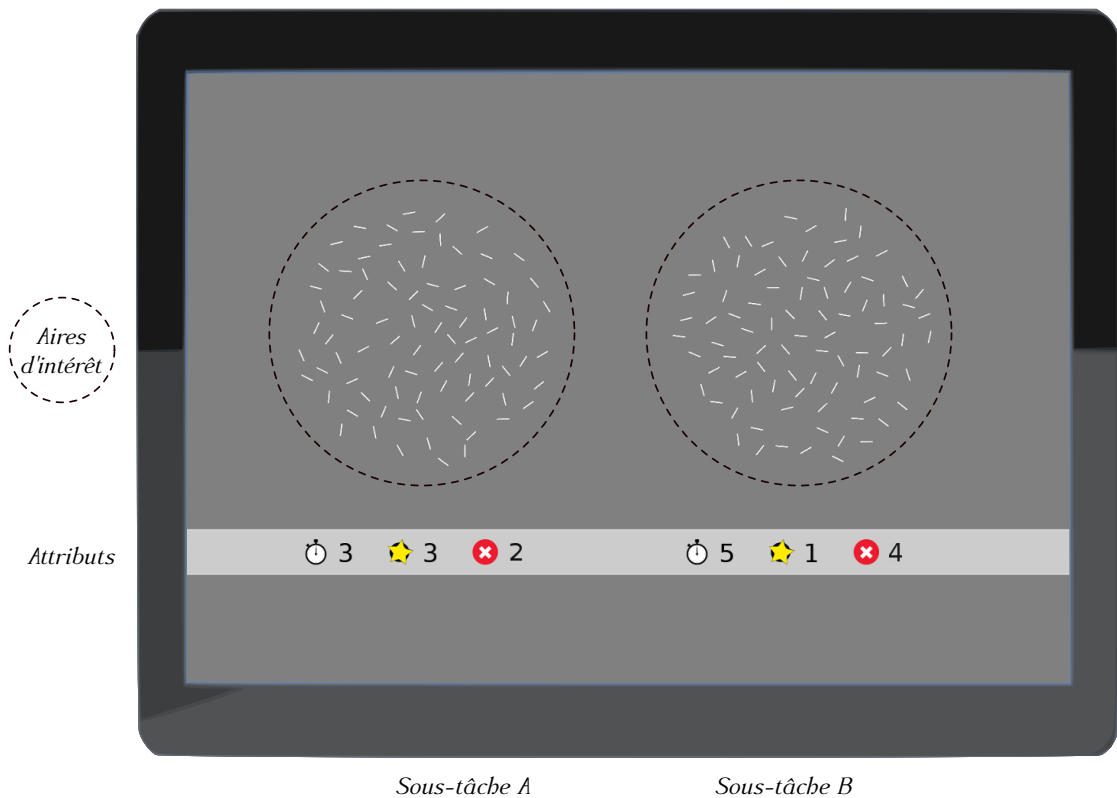
La méthode présentée ci-dessous a été validée par le Comité d'Éthique sur les Recherches Non-Interventionnelles (CERNI), dans un avis portant le numéro suivant : CERNI-Université fédérale de Toulouse-2016-010.

### 2.1. Participants

Vingt-sept participants (âge moyen :  $22.6 \pm 3.0$ ) ont été recrutés. Tous étaient volontaires et étudiants à l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC, Toulouse) ou à l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE, Toulouse). Avant l'expérimentation, tous ont lu et rempli un formulaire de consentement. Leur participation n'était pas rétribuée.

### 2.2. Matériel

L'expérimentation avait lieu dans une salle calme et isolée, dont la luminosité était comprise entre 10 et 15 lux. Toutes les tâches étaient exécutées sur un ordinateur Dell, pourvu d'un moniteur de 22 pouces, avec une résolution de  $1680 \times 1250$  pixels. Les participants s'asseyaient à environ 70 cm de l'écran. Pendant la tâche, les données oculométriques étaient enregistrées grâce à un dispositif fixe RED 500 (SensoriMotric Instruments ©). Les réponses des participants étaient données directement par le biais du clavier. L'enregistrement des réponses, des temps de réaction, ainsi que l'affichage des stimuli étaient pris en charge par Python 2.7, et la librairie PsychoPy 1.83 (Peirce, 2009). Le code complet de la tâche est disponible dans les annexes de ce manuscrit, page 329.



**Figure 7.1** – Environnement de la double-tâche de surveillance. Durant la phase test, chaque sous-tâche était caractérisée par une combinaison de trois attributs : le temps de rotation (3 ou 5 secondes), la récompense par détection correcte (1 ou 3 point(s)) et le nombre d’erreurs tolérées (2 ou 4). Dans cet exemple, la sous-tâche de droite était caractérisée par un temps de rotation plus long, une récompense plus faible, et un niveau de tolérance plus fort. Les textes extérieurs à l’écran, ainsi que les lignes pointillées définissant les aires d’intérêt ne sont donnés ici qu’à titre illustratif.

L'environnement visuel se composait de deux sous-tâches identiques, placées de part et d'autre du centre de l'écran (Figure 7.1). Chaque sous-tâche consistait en un ensemble de 85 barres verticales (caractère ASCII 124), d'une taille de 20 pixels, distribuées au hasard dans un cercle d'un rayon de  $4.4^\circ$ , et dont le centre était distant du milieu de l'écran de  $6.5^\circ$ . L'orientation initiale de chaque barre verticale était déterminée au hasard, et leurs centres étaient séparés par un minimum de  $0.7^\circ$  (30 pixels). Les barres verticales étaient de couleur blanche, et affichées sur un fond gris (#808080). La position des barres ainsi que leur orientation initiale étaient redéfinies au début de chaque essai. La vitesse de rotation initiale des barres était de  $6^\circ$  par seconde. Cette vitesse était amenée à changer, comme expliqué plus loin (section 2.3, p.161).

Plus bas sur l'écran se trouvait une bande horizontale, de couleur gris-clair (#CCCCCC) et de 70 pixels de haut, dans laquelle les différents attributs de chaque sous-tâche étaient affichés (Temps, Récompense et Erreur, voir Tableau 7.2). Cette bande était distante de  $8.7^\circ$  du centre vertical de l'écran. Chaque attribut était représenté par un icône et un chiffre. Les trois icônes mesuraient  $0.9^\circ$  de côté (40 pixels). Les chiffres faisaient la même hauteur que les icônes.

**Touches de réponse** Les participants interagissaient avec la tâche par le biais de trois touches du clavier : la touche `[espace]` permettait de passer d'un écran à l'autre lors de l'affichage des consignes, et aussi d'initier le début d'un essai ; la touche `[Ctrl gauche]` permettait de signaler une rotation pour la sous-tâche de gauche ; la touche `[Ctrl droit]` permettait de signaler une rotation pour la sous-tâche de droite.

### 2.3. Procédure

La calibration de l'oculomètre était d'abord réalisée. L'expérimentation se divisait ensuite en quatre phases. Avant chaque phase de l'expérimentation, les participants étaient invités à prendre connaissance des instructions qui s'affichaient à l'écran. Ils pouvaient demander des éclaircissements à l'expérimentateur, qui restait dans un coin de la pièce, hors du champ visuel du participant. L'ensemble des consignes est disponible en annexes, p.296.

Après avoir décrit le séquençage général d'un essai tout au long de l'expérimentation, nous décrirons plus précisément chacune des quatre phases.

### Séquençage général d'un essai

Tout au long de l'expérimentation, la structure générale d'un essai demeurerait la même. Chacun durait 50 secondes. Il y avait 10 rotations au total (5 rotations par sous-tâche), réparties aléatoirement sur le temps de l'essai. Pour chaque sous-tâche, deux rotations étaient séparées entre-elles par un minimum d'une seconde, mais pouvaient en revanche avoir lieu simultanément entre les deux sous-tâches, selon le hasard de la distribution. Par défaut, le temps d'une rotation était de quatre secondes, et sa vitesse de 6°/sec. Ces deux valeurs étaient amenées à changer dans les deux dernières phases de l'expérience, pour soutenir l'augmentation progressive de la charge de travail. Les participants initiaient eux-mêmes chaque essai en appuyant sur la touche `[espace]`. À la fin d'un essai, un écran indiquait le score réalisé pour chaque sous-tâche, ainsi que le score global, correspondant à la somme arithmétique des scores des deux sous-tâches.




### Phase de familiarisation

Une première phase avait pour but de familiariser les participants avec la double-tâche de surveillance. Ces derniers étaient informés que leur tâche consistait à détecter des rotations, qui pouvaient survenir à tout moment, dans l'un ou l'autre des groupes de traits, à l'aide des touches de réponses correspondantes. On leur indiquait que chaque rotation durerait 4 secondes, et que l'objectif consistait à détecter le plus de rotations possible, et à les signaler le plus rapidement possible. Enfin, on leur précisait qu'il existait deux façons de faire des erreurs : (1) ne pas signaler une rotation (omission) ou (2) en signaler une lorsqu'il n'y en avait pas (fausse alarme). Il était précisé que toute réponse survenant après la fin d'une rotation ne serait pas comptabilisée. Cette phase s'arrêtait dès lors que pour un essai, le participant montrait un taux de détection supérieur à 80 % – ce qui nous semblait suffisant pour assurer que le principe général de la tâche était compris. *Le bandeau des attributs n'était pas affiché durant cette phase.*

### Phase d'augmentation de la demande

Les participants étaient ensuite informés que, pendant une dizaine de minutes les rotations à détecter seraient *de moins en moins rapides*. On leur indiquait que l'objectif de cette phase était de mesurer leur capacité à détecter un maximum de rotations malgré le ralentissement. Il y avait deux essais successifs par vitesse de rotation donnée. Cette vitesse – de 6°/sec initialement – diminuait de 1°/sec tous les deux essais. Pour chaque participant, cette phase s'arrêtait dès lors que le taux de détection moyen pour

**Tableau 7.2** – Valeurs et icônes des trois attributs. \*Si, pour une sous-tâche donnée, un participant dépassait le seuil d'erreurs tolérées, son score pour cette sous-tâche était nul. Par exemple, si le seuil de tolérance était de 2, le score pour la sous-tâche devenait nul si 3 erreurs ou plus étaient commises.

Nom	Icône	[Valeurs] unité	Description
Temps		[3;5] secondes	durée d'une rotation (évènement-cible)
Récompense		[1;3] points	points gagnés par bonne réponse
Erreur		[2;4] erreurs	erreurs tolérées *

une vitesse donnée était inférieure à 50 % – ou bien lorsque la valeur minimale (1°/sec) était atteinte. Là encore, le bandeau des attributs n'était pas affiché durant cette phase.

Le véritable objectif de cette phase consistait à mesurer le vitesse de rotation pour laquelle chaque participant ne parvenait pas à détecter 50 % ou plus des rotations. Nous conservions cette valeur pour la ré-utiliser dans les phases suivantes et assurer un niveau de difficulté suffisamment élevé. Les participants étaient informés de la fonction réelle de cette manipulation en fin d'expérimentation.

### Phase test, introduction des attributs

Les participants étaient ensuite informés que, lors de la phase qui allait suivre, trois attributs des tâches seraient manipulés et admettraient chacun deux valeurs possibles. On leur indiquait aussi que ces valeurs seraient affichées sous les deux sous-tâches, à côté des icônes correspondants (Tableau 7.2, p.163)

On insistait sur l'indépendance des deux sous-tâches, et on indiquait aux participants que leur objectif consistait à réaliser le score le plus élevé possible ; celui-ci correspondant à la somme arithmétique des scores obtenus à chaque sous-tâche. Avant le test à proprement parler, les participants réalisaient un entraînement de 5 minutes, correspondant à cinq essais, choisis parmi l'ensemble des conditions possibles (voir section 2.4) pour leur représentativité. Le nombre relativement faible d'essais devait permettre de limiter la fatigue inhérente à cette phase. Les participants étaient ensuite informés que lors de la phase test, ils allaient devoir réaliser la même tâche que précédemment, mais sur un nombre plus important d'essais (27). Ils étaient encouragés à profiter des pauses (entre deux essais) pour se détendre si besoin. Avant de commencer, plusieurs points leurs étaient rappelés : le fonctionnement des attributs, l'objectif assigné (gagner un maximum de points), les deux façons

**Tableau 7.3** – Définition, en pixels, des aires d'intérêt (AOIs) pour la double-tâche de surveillance. Le rayon de ces AOIs était de 50 pixels plus grand que celui de l'aire occupée par les barres verticales. L'origine du repère était située au centre de l'écran, dont la résolution était de  $1680 \times 1050$  pixels

AOI	centre		rayon
	x	y	
gauche (A)	-300	100	200 + 50
droite (B)	300	100	200 + 50

possibles de faire une erreur, ainsi que la nécessité de limiter le plus possible leurs mouvements de tête et de corps, pour faciliter l'acquisition des données oculaires.

## 2.4. Mesures et plan expérimental

Pour chaque condition et chaque sous-tâche, des métriques de performance et de comportement oculaire étaient relevées. Concernant la performance, un taux de détection était calculé. Pour le comportement oculaire, l'analyse se concentrait sur le temps cumulé de fixation (ci-après le « temps de fixation »). Deux aires d'intérêt (AOIs) étaient définies autour de chaque groupe de barres verticales (Figure 7.1 et Tableau 7.3). Enfin, pour une condition donnée, nous calculions aussi la différence absolue des temps de fixation. Cette métrique permettait de mieux caractériser le comportement *général* de priorisation des participants, et notamment leur tendance moyenne à favoriser l'une des deux sous-tâches.

### 2.4.1. Plan expérimental

Étant donné que nous nous intéressions principalement aux relations entretenues entre les valeurs des attributs des deux sous-tâches, il y avait 27 conditions possibles au total. En effet, chaque attribut d'une sous-tâche pouvait avoir une valeur supérieure (>), égale (=) ou inférieure (<) à la sous-tâche concurrente. En suivant cette logique. Lorsque l'attribut était égal, une valeur était choisie au hasard parmi les deux possibles.

Le plan expérimental de cette étude pouvait être formalisé comme  $S_{27} * T_3 * R_3 * E_3$ . Il s'agissait d'un plan croisé complet, où pour chaque sous-tâche, 27 sujets (S) rencontraient toutes les conditions issues du croisement des trois modalités possibles (<, =, >) pour chaque attribut (T, le temps de rotation ; R, la valeur de la récompense et E, le nombre d'erreurs tolérées).



Toutes les mesures étaient soumises à une ANOVA intra-sujet  $3 \times 3 \times 3$ , où les différentes relations d'attributs ( $<$  ou  $=$  ou  $>$ ) étaient des mesures répétées. Les analyses étaient conduites avec le logiciel statistique R (version 3.2.1.)<sup>2</sup>. Pour tous les résultats, le seuil de significativité était fixé à  $p = .05$  et l'éta-carré généralisé ( $\hat{\eta}_G^2$ ) était calculé. Si nécessaire, des tests post-hoc étaient conduits sur les données, par des comparaisons multiples corrigées avec la méthode de Bonferroni.

#### 2.4.2. Analyses corrélationnelles

Pour des raisons expliquées précédemment (p.136), nous avons mené deux types d'analyses corrélationnelles.

**Corrélation inter-individuelle** Nous avons employé la méthode de corrélation de Pearson pour évaluer l'intensité des relations suivantes :

- corrélation entre la vitesse de rotation, et le taux de détection *moyen* obtenu ;
- corrélation entre la différence moyenne des temps de fixations entre les deux sous-tâches, et le taux de détection *moyen* obtenu ;
- corrélation entre la différence moyenne des temps de fixations entre les deux sous-tâches, et le score *moyen* obtenu ;

**Corrélation intra-individuelle** De plus, nous avons utilisé la méthode de corrélation pour mesures répétées, décrite par Bakdash et Marusich (2017), pour évaluer l'intensité des relations suivantes :

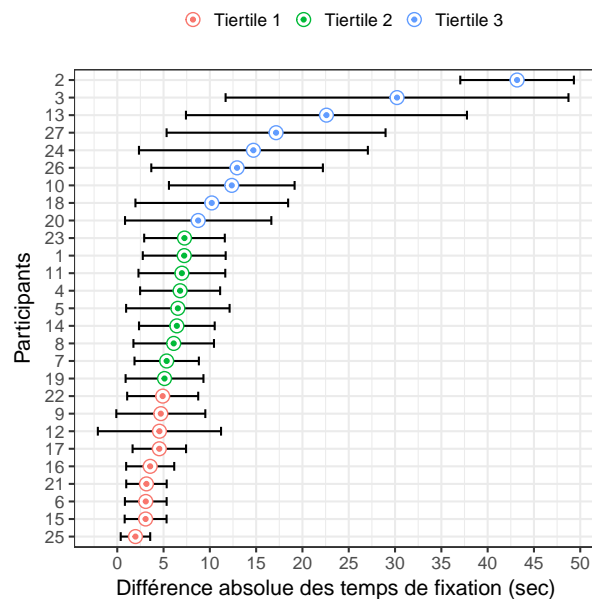
- corrélation entre le taux de détection atteint et le temps de fixation, pour une sous-tâche donnée ;
- corrélation entre le sous-score obtenu et le temps de fixation, pour une sous-tâche donnée.

## 3. Résultats

### 3.1. Préambule : des comportements oculaires disparates

Avant de nous lancer plus avant dans la présentation de l'effet des attributs sur nos variables dépendantes, soulignons que les comportements oculaires montraient en eux-mêmes une forte disparité entre les participants (Figure 7.2, p.166). En effet, les différences absolues des temps de fixation montraient un

2. <https://cran.r-project.org/>



**Figure 7.2** – Moyenne des différences absolues des temps de fixation, par participant. La couleur représente trois tertiles de participants, relativement à cette mesure. Les barres horizontales représentent l'écart-type pour chaque participant, sur les 27 essais.

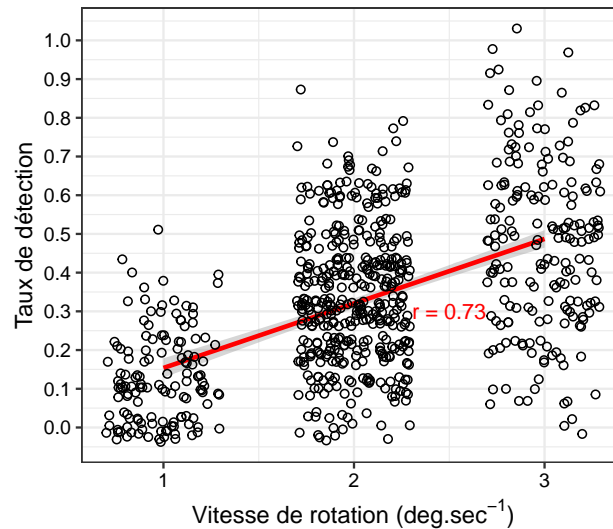
indice de dispersion très élevé ( $M = 9.76 \pm 9.28$ ). Partant de ce constat, il nous a semblé essentiel de ségréguer l'échantillon en trois tertiles, afin de vérifier l'influence éventuelle de cette variabilité inter-individuelle sur les résultats (Figure 7.2).

Évidemment, l'introduction du tertile dans l'analyse amenait une modification du plan expérimental, qui devenait  $S_9 < Tiert_3 > * T_3 * R_3 * E_3$ . Le tertile était une variable catégorielle, invoquée a posteriori, définissant trois groupes de 9 participants.

### 3.2. Analyse de la performance

#### La vitesse de rotation influençait le taux de détection global

La vitesse moyenne en deçà de laquelle les participants détectaient moins de 50 % des cibles, était de  $2.07 \pm 0.68^\circ/\text{sec}$ . Précisément, cette limite était de  $3^\circ/\text{sec}$  pour 7 participants,  $2^\circ/\text{sec}$  pour 15 participants, et  $1^\circ/\text{sec}$  pour 5 participants. Pour rappel, ces vitesses étaient spécifiques à chacun; elles étaient calculées pendant la phase d'augmentation de la demande (p.162) et étaient réutilisées pendant la phase test pour induire une situation spécifique de surcharge.

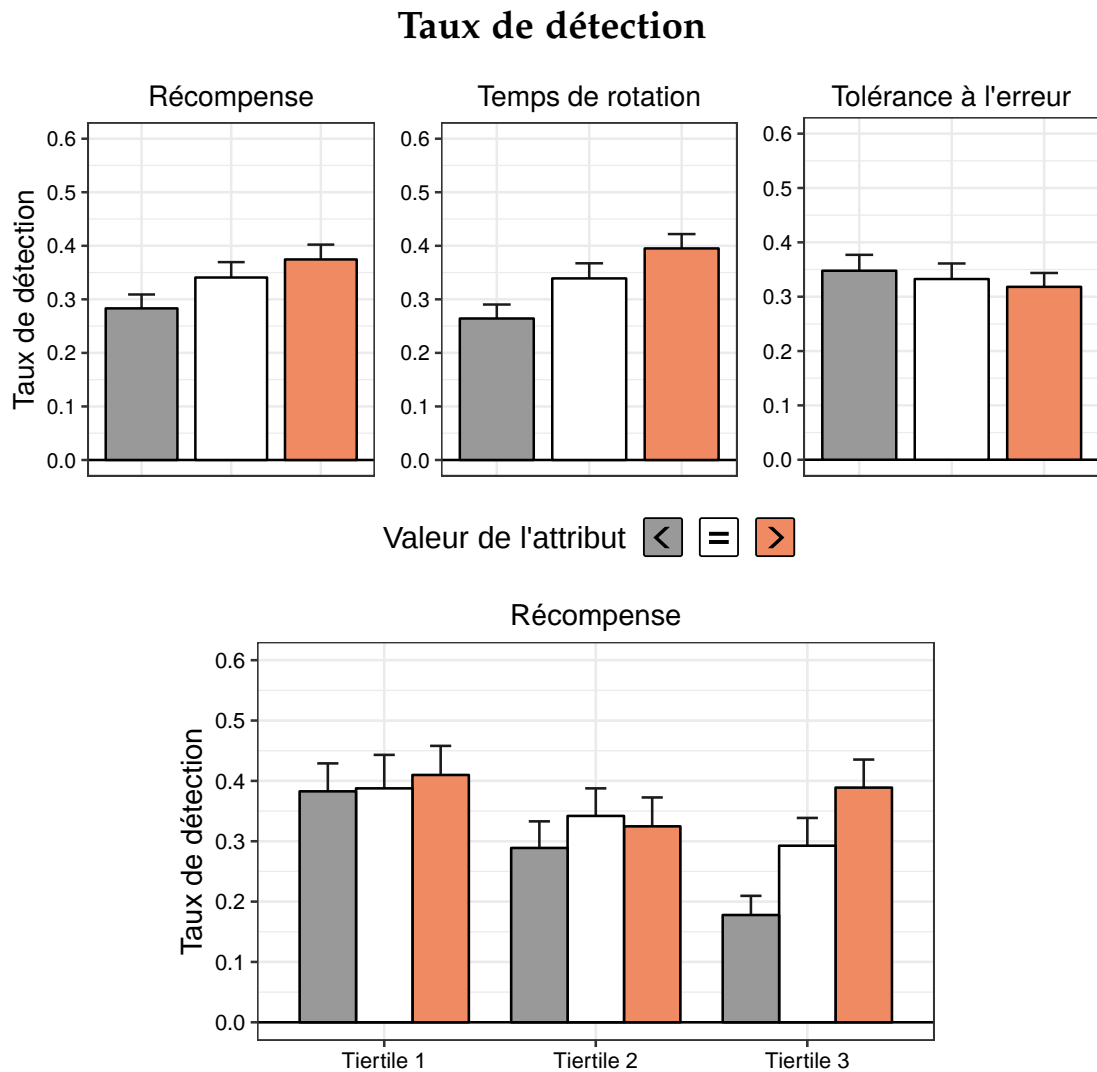


**Figure 7.3** – Taux de détection global en fonction de la vitesse de rotation. Les points représentent l'ensemble des essais pour tous les participants. Nous retrouvons logiquement plus de points pour une vitesse de 2°/sec, correspondant à plus de participants. Il y avait une corrélation positive significative, entre la vitesse de rotation et le taux moyen de détection, [ $r = 0.73$ ,  $df = 25$ ,  $p < .001$ ].

Cette manipulation a fonctionné, dans la mesure où pendant la phase de test, le taux de détection global était bien inférieur à 50 % ( $M = 0.33 \pm 0.15$ ). Malgré cette induction réussie, un test de corrélation de Pearson a révélé que le taux de détection moyen, durant la phase test, demeurait fortement *corrélé à la vitesse de rotation* [ $r = 0.73$ ,  $df = 25$ ,  $p < .001$ ]. Globalement, plus la vitesse de rotation était élevée, et meilleure était la performance de détection globale des participants (Figure 7.3). Aussi, si la phase d'apprentissage nous a permis d'induire des situations de surcharge de façon spécifique à chaque participant, il n'est pas possible de dire que tous les participants ont été confrontés au même niveau de difficulté.

### **Pas d'influence de la vitesse de rotation sur le comportement global de priorisation**

Comme l'a révélé un test de corrélation de Pearson, il n'existait pas de corrélation entre la vitesse des rotations, définie pour chaque participant, et leur tendance à se prioriser, c'est-à-dire allouer des quantités de ressources différentes aux deux sous-tâches, [ $r = -.18$ ,  $df = 25$ ,  $p = .36$ ].



**Figure 7.4** – Effets des attributs et du tertile sur les taux de détection.

**En haut** : effets principaux des attributs. Seuls les attributs de Récompense et de Temps influencent significativement les taux de détection.

**En bas** : seul le tertile 3 montrait une sensibilité spécifique à l'attribut de Récompense. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance.

### Les attributs de Temps (difficulté) et de Récompense avaient un effet sur la performance

Pour une sous-tâche donnée, le taux de détection était largement influencé par un effet principal de l'attribut Temps [ $F(2, 48) = 44.95, p < .001, \hat{\eta}_G^2 = .07$ ] ainsi que par un effet principal de l'attribut Récompense [ $F(2, 48) = 19.49, p < .001, \hat{\eta}_G^2 = .035$ ]. Une rotation avait d'autant plus de chance d'être détectée qu'elle durait longtemps *ou* qu'elle était associée à une récompense plus élevée (Figure 7.4). En revanche, l'attribut Erreur n'avait pas d'influence significative [ $F(2, 48) = 2.92, p = .11$ ]. Il n'y avait pas d'interaction significative de premier ordre (Points×Temps ou Points×Erreur ou Temps×Erreur), comme il n'y avait pas non plus d'interaction significative de second ordre (Points×Temps×Erreur), pour expliquer les modulations de la performance. Ces résultats invalidaient notre hypothèse (H1b), qui avançait que seuls les attributs d'importance auraient une influence sur les niveaux de performance.

**Une influence spécifique du tertile** Lorsque l'on considérait le tertile des participants, les résultats montraient une interaction entre l'attribut Récompense et le tertile [ $F(4, 48) = 8.69, p < .001, \hat{\eta}_G^2 = .03$ ]. Les post-hoc nous ont permis de préciser que cette interaction traduisait une plus grande sensibilité du tertile 3 (c-à-d. les participants manifestant généralement une préférence marquée pour l'une des deux sous-tâches) à la récompense, entraînant des taux de détection significativement différents entre les trois conditions ( $< = >$ ), comparées deux à deux ( $p < .05$  pour 3 comparaisons). Lorsque la récompense était supérieure, elle entraînait, chez ces participants, un taux de détection plus élevé ( $M = .39 \pm .21$ ) que lorsqu'elle était égale ( $M = .29 \pm .21$ ) et inférieure ( $M = .18 \pm .15$ ). Toutefois, si les participants du tertile 3 étaient plus sensibles à l'attribut Récompense, cela ne signifie pas pour autant que cette « sensibilité » engendrait une meilleure performance que les deux autres groupes. Lorsque la récompense de la sous-tâche était moins élevée que celle de la sous-tâche concurrente ( $<$ ), le tertile 3 montrait un taux de détection ( $M = .29 \pm .23$ ) significativement inférieur aux tertiles 2 ( $M = .35 \pm .28$ ) et 1 ( $M = .40 \pm .23; p < .03$  pour 2 comparaisons). Les autres conditions de récompense ( $>$  et  $=$ ) n'engendraient pas de différences significatives entre les trois tertiles ( $p \geq .10$ , pour 6 comparaisons). Autrement dit, la sensibilité accrue du tertile 3 à l'attribut Récompense n'engendrait pas une amélioration de la performance pour les sous-tâches à la récompense supérieure, mais plutôt une diminution de la performance pour les sous-tâches à la récompense inférieure.

### 3.3. Analyse de l'allocation des ressources visuelles

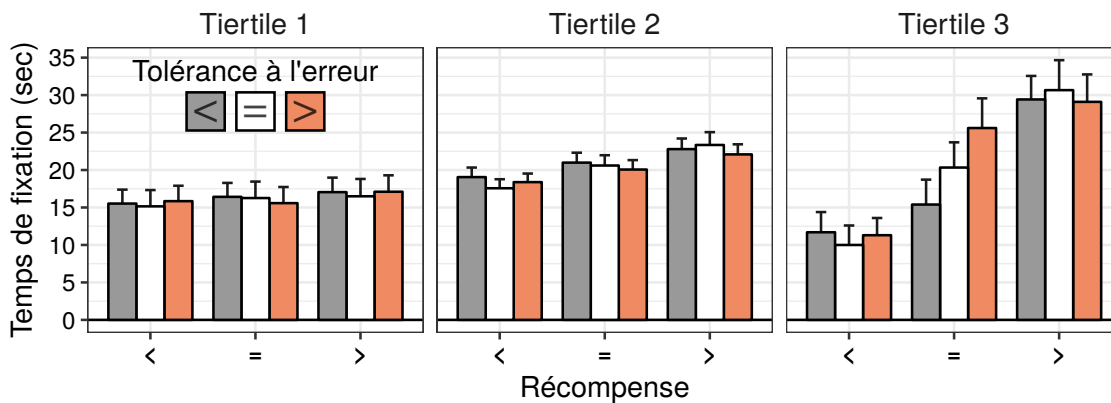
#### Effet différencié des attributs sur les temps de fixation, en fonction du tertile

L'ANOVA a révélé que l'attribut Temps n'engendrait ni d'effet principal [ $F(2,48) = 0.02, p = .98$ ], ni d'effet d'interaction de premier [ $F \leq 1.15$ , pour 3 analyses] ou de second ordre [ $F \leq 1.17$ , pour 3 analyses], sur les temps de fixation. En revanche, il y avait une interaction de second ordre entre le tertile, l'attribut Récompense et l'attribut Erreur, pour expliquer la variabilité des temps de fixation [ $F(8,96) = 4.03, p < .05, \hat{\eta}_G^2 = 0.03$ ]. Les attributs Récompense et Erreur montraient un effet différencié selon le tertile considéré (Figure 7.5).

Pour le **tertile 1**, les attributs Récompense et Erreur ne modulaient pas la différence des temps de fixation. Pour être plus précis, les trois conditions de récompense élicitaient des temps de fixation similaires ( $p = 1.0$  pour 3 comparaisons), et pour chacune de ces conditions, le nombre d'erreurs tolérées n'avait aucun effet ( $p = 1.0$  pour 9 comparaisons). Pour le **tertile 2**, seules les conditions de récompenses asymétriques ( $<$  et  $>$ ) engendraient des comportements oculaires différents ( $p < .001$ ). Ce résultat traduisait une allocation préférentielle des ressources visuelles vers la récompense la plus forte, pour ce groupe de participants. Comme pour le tertile 1, il n'y avait pas dans ce tertile d'effet de l'attribut Erreur, quelle que soit la condition de récompense considérée ( $p = 1.0$  pour 9 comparaisons). Enfin, seul le **tertile 3** montrait une sensibilité à l'attribut Erreur, et ce *uniquement lorsque l'attribut Récompense n'était pas discriminant* (Figure 7.5; cadre rouge). Plus précisément, lorsque la récompense était discriminante ( $<$  et  $>$ ), les ressources étaient préférentiellement allouées à la sous-tâche la plus importante, et l'attribut Erreur ne modulait en rien cet effet ( $p = 1.0$  pour 6 comparaisons). En revanche, lorsque la récompense n'était plus discriminante ( $=$ ), l'attribut Erreur modulait significativement l'allocation des ressources, qui étaient préférentiellement allouées à la sous-tâche tolérant le plus d'erreurs ( $p < .001$  pour 3 comparaisons).

Ces résultats validaient l'hypothèse (H1a) selon laquelle seuls les attributs d'importance auraient une influence sur les stratégies attentionnelles. En revanche, ils ne validaient que partiellement l'hypothèse (H2), puisque d'un côté, les comportements observés traduisaient bien une heuristique de type lexicographique mais que, d'un autre côté, ces comportements ne concernaient pas l'ensemble des participants de notre échantillon, mais plutôt un tiers, les autres ayant manifesté des stratégies plus simples (attribut Récompense seulement), ou ayant ignoré les attributs (tertile 1) dans la détermination de leur stratégie oculaire.

## Temps cumulés de fixation



**Figure 7.5** – Effet différencié des attributs Récompense et Erreur sur les temps de fixation, en fonction du tertile. Seul le **tiertile 3** montre une sensibilité à l’attribut Erreur lorsque l’attribut Récompense n’est pas discriminant (cadre rouge). Les barres d’erreur représentent les intervalles de confiance.

### 3.4. Analyses corrélationnelles

Comme lors de la précédente expérimentation, nous avons mené plusieurs analyses corrélationnelles dans la perspective d’évaluer la relation entre les comportements oculaires et les indicateurs de performance (taux de détection, score), tant au niveau global qu’au niveau local (sous-tâche).

#### 3.4.1. Pas d’influence du comportement global de priorisation sur les indicateurs de performance (taux de détection, score)

**Taux de détection** Nous n’avons pas relevé de relation significative entre la tendance moyenne des participants à se prioriser, c.-à-d. à manifester une différence dans les quantités de ressources visuelles allouées respectivement aux deux sous-tâches, et la performance (taux de détection) globale qu’ils atteignaient. En effet, une corrélation de Pearson a montré qu’il n’existait pas de corrélation significative, à travers les participants, entre la moyenne des différences absolues des temps de fixation entre les deux sous-tâches, et le taux de détection moyen obtenu, [ $r = -.20$ ,  $df = 25$ ,  $p = .30$ ].

**Score** De même, il n’existait pas de corrélation significative entre le score moyen obtenu par les participants et leur tendance à se prioriser, [ $r = -.09$ ,  $df = 25$ ,  $p = .66$ ].

Ces deux résultats indiquent que les participants qui se priorisaient le plus n’étaient – *globalement* – ni plus performants (taux de détection), ni

plus rationnels (score) que les autres, dans la mesure où leur comportement attentionnel ne leur permettait pas d'atteindre des niveaux plus élevés de performance globale.

### 3.4.2. La performance *locale* était influencée par le temps de fixation

**Taux de détection** Les analyses de corrélations pour mesures répétées ont révélées que le taux de détection et le temps de fixation entretenaient une relation de covariance significative [ $r = .35, df = 701, p < .001$ ]. Cette corrélation positive signifiait qu'en moyenne, plus les participants accordaient une forte quantité de ressources visuelles à une sous-tâche, plus ils y détectaient de cibles, par comparaison à des sous-tâches auxquelles ils accordaient moins de ressources visuelles.

**Sous-score** De même, lorsque l'on considérait le score atteint, localement, pour une sous-tâche donnée, celui-ci était d'autant plus élevé que la sous-tâche recevait une quantité importante de ressources visuelles [ $r = .27, df = 1430, p < .001$ ].

Ainsi, au plan local de la sous-tâche, l'augmentation de la quantité de ressources allouée à une sous-tâche, engendrait une augmentation du taux de détection, ainsi que du sous-score obtenu.

## 3.5. Synthèse des résultats

Lors de cette expérimentation, nous avons induit un niveau élevé de charge de travail avec succès, puisqu'en moyenne les participants ne sont pas parvenus à détecter plus de la moitié des rotations lors de la phase test. Toutefois la performance se trouvait modulée d'au moins deux façons. Tout d'abord par des facteurs de *demande* : plus la durée des rotations était élevée, meilleurs étaient les taux de détection. De plus, chez les participants du troisième tertile, la performance se trouvait aussi modulée par l'attribut Récompense. Comparé aux deux autres tertiles, ce tertile n'améliorait pas sa performance lorsque la récompense était supérieure, mais plutôt la diminuait lorsqu'elle était inférieure. Pour rappel, le tertile 3 correspondait au tiers des participants qui montrait la plus forte tendance à allouer préférentiellement ses ressources visuelles à l'une des deux sous-tâches. Enfin, l'attribut Erreur n'avait pas d'effet sur la performance. De façon plus générale (indépendamment des variables indépendantes), les niveaux de performances locaux, obtenus pour une sous-tâche donnée, étaient d'autant plus élevés que cette dernière se voyait allouer une quantité importante de ressources visuelles.



Au plan oculaire, nous retrouvions des disparités inter-individuelles. En effet, l'influence des attributs sur l'allocation des ressources visuelles dépendait fortement du tertile. Plus les participants établissaient une différence importante entre les deux sous-tâches, en termes de ressources visuelles, et plus ils étaient influencés par les attributs d'importance des sous-tâches. Alors que le premier tertile ne montrait pas de sensibilité aux différents attributs, le deuxième était sensiblement influencé par l'attribut Récompense, et le troisième par les attributs Récompense et Erreur. Plus précisément, pour ce dernier groupe, l'attribut Erreur influençait la quantité de ressources visuelles allouées, *uniquement lorsque l'attribut Récompense n'était pas discriminant (=)*. L'inverse n'était pas vrai : l'attribut Récompense influençait significativement les comportements oculaires, quelle que fût la valeur de l'attribut Erreur. Ce résultat indique que les participants de ce groupe « utilisaient » principalement l'attribut Récompense pour déterminer leur stratégie attentionnelle, et secondairement l'attribut Erreur, dès lors que le premier ne permettait pas de discriminer les deux sous-tâches : ce qui indiquait la primauté d'un attribut sur l'autre.

## 4. Discussion

L'objectif premier de cette expérimentation consistait à identifier les stratégies d'évaluation des priorités, déployées par les individus, dans des situations de surcharge mentale. Pour rappel, nous pensions que du fait de la surcharge, l'attribut de difficulté des sous-tâches n'aurait pas d'influence sur la performance et les comportements oculaires des participants (H1). Cette hypothèse n'a été que partiellement confirmée par nos résultats. En effet, si les comportements oculaires n'ont pas du tout été influencés par l'attribut Temps (H1a), ce n'était pas le cas de la performance (H1b), dont le niveau s'est amélioré sensiblement lorsque la sous-tâche comportait des durées de rotation (attribut Temps) plus élevées. En d'autres termes, si l'attribut Temps n'a pas eu d'influence sur l'allocation des ressources visuelles des participants, une plus grande durée de rotation engendrait une probabilité plus grande que des cibles furent détectées. Ceci rejoint une observation réalisée lors de la contribution précédente, selon laquelle, en situation de surcharge, les participants ne se fient plus aux attributs de difficulté pour déterminer leurs stratégies oculaires, mais plutôt à l'attribut d'importance. Pour rappel, nous avons défini l'importance comme tout « attribut objectif d'une tâche traduisant sa relation au but général assigné, indépendamment de sa difficulté » (section 3, p.77). Dans cette expérimentation, les attributs Récompense et Erreur traduisaient effectivement la pertinence des sous-tâches au regard du but assigné (c.-à-d., réaliser le score

le plus élevé possible). Nous avons montré le rôle de l'importance des tâches, lorsqu'elle était réduite à un seul attribut (première contribution); ici, nous l'avons à nouveau montré, avec deux attributs d'importance.

Nous avons aussi fait l'hypothèse que la priorité des sous-tâches serait évaluée selon l'heuristique TTB (H2). Là encore, l'hypothèse n'a été que partiellement confirmée par nos résultats. Tous les participants n'ont pas montré les mêmes comportements de priorisation, comme la ségrégation de l'échantillon en trois tertiles l'a bien montré. Toutefois, dès lors qu'ils se priorisaient fortement (tertile 3), les participants manifestaient clairement des comportements oculaires déterminés par des stratégies du type lexicographique, portant sur les deux attributs d'importance. Chez ces participants, alors que l'attribut de Récompense se voyait donner la primauté pour diriger l'allocation des ressources visuelles, l'attribut d'Erreur pouvait être « utilisé » dès lors que l'attribut de Récompense n'était pas discriminant (=).

Avant de discuter plus longuement la nature heuristique des stratégies que nous avons observées, nous devons donc essayer de comprendre pourquoi une partie substantielle des participants n'a pas manifesté de sensibilité à quelque attribut que ce soit.

## 4.1. Les déterminants de la priorisation

En discussion de la contribution précédente (section 4, p.147), nous avons avancé qu'une charge de travail élevée amenait les participants à favoriser les attributs d'importance pour diriger l'allocation de leurs ressources (voir aussi Raby et Wickens, 1994). Par conséquent, ayant élaboré une situation de surcharge permanente, nous faisons implicitement l'hypothèse que *tous* les participants montreraient une sensibilité aux attributs des sous-tâches, pour se prioriser. Or, ce n'est pas ce que nous avons observé lors de la présente étude. Au moins un tiers des participants n'a pas montré d'allocation préférentielle de ses ressources visuelles vers l'une ou l'autre des deux sous-tâches, et leur a attribué, au contraire, des quantités équivalentes de ressources visuelles. Ce résultat inattendu nous amène à analyser les différences fondamentales entre les deux paradigmes employés, pour tenter de faire ressortir des éléments de compréhension et, éventuellement, des déterminants des comportements de priorisation.

### 4.1.1. Charge variable contre surcharge constante

Alors que lors de la première expérimentation, nous manipulions la charge de travail par l'entremise de l'attribut de difficulté, nous souhaitons, dans la présente étude, induire un niveau constant et élevé de charge de travail,

par le ralentissement de la vitesse des rotations. Ceci peut expliquer l'absence *manifeste* de comportement de priorisation chez certains participants, pour au moins deux raisons. Tout d'abord, la surcharge, en tant que propriété *constante* de la tâche (en phase test), a pu être perçue comme un paramètre *nominal* de la situation, ne nécessitant pas d'adaptation particulière. De plus, la difficulté excessive de la tâche ainsi que l'impossibilité, pour les participants d'établir une stratégie oculaire plus performante, ont pu pousser les participants à ne pas investir de ressources dans des processus coûteux de contrôle (Kool et al., 2010), alors même que ces derniers s'avéraient inutiles puisque, comme nous l'avons montré, il n'y avait pas une stratégie oculaire plus optimale qu'une autre, au plan de la performance générale.

Pour reprendre les termes de Simon (1956), étant donné la normalité de la surcharge et de la concurrence, l'impossibilité manifeste d'améliorer leur performance par le biais de quelque stratégie que ce soit, ainsi que la liberté que nous leur laissions de déployer la stratégie exécutive de leur choix, les participants ont pu considérer *satisfaisant* de traiter les deux sous-tâches simultanément. En tout cas, d'un point de vue normatif, et compte tenu des résultats de performance obtenus, une répartition égalitaire des ressources entre les deux sous-tâches, n'apparaissaient pas *moins rationnelle* qu'une allocation préférentielle (priorisation).

#### 4.1.2. Le rôle des rétroactions

Une autre différence majeure entre les deux expérimentations concerne les rétroactions (*feedback*) fournies aux participants. En effet, dans l'étude précédente, toute erreur commise par les participants (omission ou fausse alarme) leur était signalée directement par l'affichage d'un rond rouge. De plus, le nombre de points qu'ils gagnaient/perdaient était affiché après chacune de leurs réponses. Enfin, ils pouvaient perdre des points en cas d'erreur et aller jusqu'à obtenir un score négatif. Au contraire, dans la présente étude, les participants disposaient de moins d'information. Leurs erreurs ne leur étaient pas signalées; ils devaient attendre la fin de l'essai (50 secondes) pour connaître le résultat et ils ne pouvaient pas *perdre* de points, le score minimal possible pour un essai étant de 0. Autrement dit, le lien entre le score réalisé et leur propre comportement était plus difficile à établir. Il est, par exemple, possible que les participants n'aient pas saisi le poids des erreurs du type « fausse-alarme » sur leur score, compte tenu que ces fausses alarmes ne leur étaient pas signalées. Ce manque potentiel d'informations, la difficulté d'établir un lien entre leur comportement et leurs résultats, ainsi que la difficulté inhérente à la tâche, ont peut-être conduit les participants à délaissé toute possibilité d'établir une stratégie exécutive, en

se basant sur les attributs disponibles, et à partager leur temps entre les deux sous-tâches sans *a priori* stratégique. Ces analyses ne sont pas sans évoquer une idée relativement récente, selon laquelle l'implication des processus de contrôle cognitif, est médiatisée par le traitement d'indices contextuels de la situation (Mushtaq et al., 2011), tels que la détection<sup>3</sup> des erreurs (Braver, 2012), des changements dans la valeur motivationnelle de l'environnement (sa pertinence relativement au but assigné; Baddeley, 2007), un conflit entre des réponses concurrentes (Botvinick et al., 2001), ainsi qu'une augmentation de la probabilité de commettre une erreur (Brown et Braver, 2005). Ici, il est fort probable qu'en l'absence de rétroactions relatives aux erreurs commises par les participants, une partie de ces derniers n'a pas déployé plus de contrôle sur la situation. Ceci serait aussi cohérent avec une idée avancée récemment par Braver (2012), selon laquelle les différences individuelles (ou *traits*) ont un rôle central « *dans la modulation des fonctions du contrôle cognitif, non seulement les traits cognitifs consensuels, tels que la capacité en mémoire de travail ou l'intelligence fluide, mais aussi des traits de personnalité que l'on considère généralement comme "non-cognitifs", telle que la sensibilité à la récompense ou à la sanction* » (traduit de Braver, 2012, p. 6).

## 4.2. Les heuristiques de priorisation

Malgré la variabilité inter-individuelle dont nous venons de rendre compte, les phénomènes de priorisation, lorsqu'ils étaient manifestes, reflétaient la dimension *heuristique* des processus de prise de décision soutenant l'allocation des ressources. En effet, ces comportements ne reflétaient pas la réalisation d'un *compromis* linéaire entre les attributs disponibles (stratégie *compensatoire*), mais plutôt leur ordonnancement et utilisation sélective (stratégie non-compensatoire) comme le modèle de l'heuristique TTB (ou « prendre-le-meilleur ») le prévoyait. Dans le champ des théories de la décision, la distinction entre stratégies compensatoires et non-compensatoires est centrale. Elle renvoie à la tendance plus ou moins grande des individus à réaliser des compromis entre les attributs. Les stratégies de décision qui réalisent ces compromis, tel que le calcul de l'utilité espérée subjective (axiomatisé par Savage, 1972), sont dites compensatoires, alors que les heuristiques de type lexicographique sont dites non-compensatoires<sup>4</sup>. Cette distinction renvoie, en

---

3. Le terme « détection » est ici à entendre au sens de Posner (1980) : est *déecté* un stimulus qui « *a atteint un certain niveau du système nerveux tel qu'il est possible pour l'individu de relater verbalement sa présence* ». Autrement dit, le phénomène de détection existe indépendamment de toute réponse comportementale.

4. Il existe évidemment des stratégies intermédiaires. Par exemple, selon l'heuristique de comptage (voir Tableau 7.1, p.157), sera choisie l'alternative comportant le plus d'attributs

fait, à la tendance variable chez les individus, à mettre en perspective des attributs différents, sur une *échelle de valeur commune* (p.ex., l'utilité). Ainsi, l'heuristique TTB est dite non-compensatoire puisqu'une mauvaise valeur, pour l'attribut dominant, empêchera la sélection de l'alternative associée, quelle que soit la valeur de ses autres attributs (Payne et al., 1993).

Dans la présente expérimentation, lorsque les participants du tertile 3 faisaient face à une sous-tâche comportant une récompense inférieure, ils ne compensaient pas cette faiblesse en considérant l'attribut de tolérance à l'erreur. Ainsi, les sous-tâches qui rapportaient moins de points se voyaient allouer moins de ressources visuelles, et ce, quelque fut leur niveau de tolérance à l'erreur. Et il n'y a que dans la mesure où l'attribut de récompense n'était pas discriminant que les participants de ce tertile considéraient l'attribut de tolérance à l'erreur. Ils ne *compensaient* donc pas un attribut par un autre. Outre qu'elles suffisent à expliquer les comportements observés, les théories heuristiques sont fortement plausibles au plan psychologique (Gigerenzer et Gaissmaier, 2011), en même temps qu'elles dessinent une tout autre conception de la rationalité humaine (Payne et al., 1993; Simon, 1990). Ces deux points seront développés plus loin, lors de la discussion générale (section 9, p.221).

Pour revenir au modèle STOM (Wickens et al., 2015), présenté en introduction (p. 86), celui-ci prédit que l'attractivité d'une tâche résulte de l'intégration linéaire et pondérée des divers attributs des tâches (sur un mode *compensatoire*), chaque attribut augmentant ou diminuant l'*attractivité* d'une tâche, en fonction de sa polarité (+/-). Si ce modèle est *prédictif* des comportements de permutations de tâches, il est pourtant peu plausible au plan *descriptif*, dans la mesure où il présuppose un opérateur *omniscient*, ayant connaissance et utilisant, à chaque instant, l'ensemble des informations disponibles. La présente étude suggère, au contraire, une modélisation plus parcimonieuse des comportements de priorisation, et la construction de modèles plus simples, qui, tout en étant *prédictifs*, rendraient compte des stratégies *effectivement* utilisées par les opérateurs. De ce point de vue, la présente recherche ne doit pas être perçue comme une tentative d'identifier une fois pour toutes l'heuristique expliquant les comportements de priorisation, mais comme un effort pour mettre en évidence des *traces* de la nature heuristique des évaluations qui soutiennent les comportements exécutifs.

---

favorables. Alors l'existence de deux attributs favorables pourrait compenser un attribut défavorable, y compris s'il s'agit de l'attribut le plus pertinent. Il y a donc bien *compensation*, quoique les poids des attributs soient ici ignorés.

## Bibliographie du chapitre

- Baddeley, A. (2007). *Working memory, thought, and action*, volume 45. OUP Oxford.
- Bakdash, J. Z. et Marusich, L. R. (2017). Repeated measures correlation. *Frontiers in Psychology*, 8.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., et Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological review*, 108(3) :624.
- Brandstätter, E., Gigerenzer, G., et Hertwig, R. (2006). The priority heuristic : making choices without trade-offs. *Psychological Review*, 113(2) :409.
- Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control : a dual mechanisms framework. *Trends in cognitive sciences*, 16(2) :106–113.
- Brown, J. W. et Braver, T. S. (2005). Learned predictions of error likelihood in the anterior cingulate cortex. *Science*, 307(5712) :1118–1121.
- Dawes, R. M. (1979). The robust beauty of improper linear models in decision making. *American psychologist*, 34(7) :571.
- Gigerenzer, G. et Gaissmaier, W. (2011). Heuristic decision making. *Annual Review of Psychology*, 62 :451–482.
- Gigerenzer, G. et Goldstein, D. G. (1996). Reasoning the fast and frugal way : models of bounded rationality. *Psychological review*, 103(4) :650.
- Kool, W., McGuire, J. T., Rosen, Z. B., et Botvinick, M. M. (2010). Decision making and the avoidance of cognitive demand. *Journal of Experimental Psychology : General*, 139(4) :665.
- Montgomery, H. (1983). Decision rules and the search for a dominance structure : Towards a process model of decision making. *Advances in psychology*, 14 :343–369.
- Mushtaq, F., Bland, A. R., et Schaefer, A. (2011). Uncertainty and cognitive control. *Frontiers in psychology*, 2.
- Payne, J. W., Bettman, J. R., et Johnson, E. J. (1993). *The adaptive decision maker*. Cambridge University Press.
- Peirce, J. W. (2009). Generating stimuli for neuroscience using psychopy. *Frontiers in Neuroinformatics*, 2(10).
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly journal of experimental psychology*, 32(1) :3–25.
- Raby, M. et Wickens, C. D. (1994). Strategic workload management and decision biases in aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 4(3) :211–240.
- Savage, L. J. (1972). *The foundations of statistics*. Courier Corporation.

- Simon, H. A. (1956). Rational choice and the structure of the environment. *Psychological review*, 63(2) :129.
- Simon, H. A. (1990). Invariants of human behavior. *Annual review of psychology*, 41(1) :1–20.
- Tversky, A. et Kahneman, D. (1973). Availability : A heuristic for judging frequency and probability. *Cognitive psychology*, 5(2) :207–232.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., et Santamaria, A. (2015). Discrete task switching in overload : A meta-analyses and a model. *International Journal of Human-Computer Studies*, 79 :79–84.





## CHAPITRE 8

# *Troisième contribution*

## *La priorisation en situation d'incertitude*

<b>1</b>	<b>Introduction</b> .....	182
1.1	Priorisation et effets de structure .....	182
1.2	La priorisation en situation d'incertitude .....	183
1.3	Objectifs et présentation de l'étude .....	184
<b>2</b>	<b>Méthode</b> .....	186
2.1	Participants .....	186
2.2	Matériel .....	186
2.3	Procédure .....	191
2.4	Mesures et plan expérimental .....	194
<b>3</b>	<b>Résultats comportementaux</b> .....	195
3.1	Analyse des performances à la sous-tâche de détection de pannes (FPT) .....	195
3.2	Analyse des performances à la sous-tâche de surveillance de l'écran de vol principal (PFD) .....	197
3.3	Analyse de l'allocation des ressources en condition double-tâche (test) .....	199
3.4	Analyses corrélationnelles .....	202
<b>4</b>	<b>Discussion des résultats comportementaux</b> .....	202
<b>5</b>	<b>Résultats des questionnaires</b> .....	205
5.1	Question ouverte .....	205
5.2	Évaluation subjective de la performance .....	206
5.3	Estimations des contingences indice-résultat .....	207
<b>6</b>	<b>Discussion des résultats des questionnaires</b> .....	209

<b>7</b>	<b>Discussion générale</b> .....	211
7.1	L'apprentissage déclaratif dans le cadre de la théorie des ressources multiples .....	211
7.2	L'apprentissage déclaratif dans le cadre du modèle computationnel ACT-R.....	212
7.3	Conclusion.....	214

## CHAPITRE 9

# *Troisième contribution*

## *La priorisation en situation d'incertitude*

<b>1 La dimension proximale de la priorisation : l'évaluation cognitive des priorités</b> .....	222
1.1 La plausibilité psychologique des heuristiques .....	223
1.2 Vers une définition des règles heuristiques .....	226
<b>2 La dimension distale de la priorisation : causes et conséquences des manifestations de la priorisation</b> .....	227
2.1 Les conditions d'apparition de la priorisation .....	227
2.2 Les conséquences de la priorisation .....	229

### **1. Introduction**

Les deux contributions précédentes nous ont permis d'apporter des éléments de réponse quant aux politiques d'évaluation des priorités, soutenant l'allocation des ressources en situation complexe. Néanmoins, les tâches que nous avons proposées comportaient des limitations qui ne nous ont pas permis d'adresser certaines questions relatives à la priorisation. Cette troisième contribution doit être avant tout entendue comme une tentative de dépasser certaines limites des expérimentations précédentes, afin de donner une représentation plus complète des phénomènes de priorisation. Dans un premier temps, nous allons passer en revue ces limitations, avant d'en extraire un ensemble de questionnements, qui feront donc l'objet de l'expérimentation.

## 1.1. Priorisation et effets de structure

Les deux précédentes expérimentations admettaient au moins un point commun : toutes deux mettaient les participants aux prises avec des situations de double-tâche, où les deux sous-tâches étaient identiques (deux sous-tâches de *N-Back* et deux sous-tâches de surveillance). Il s'agissait d'un choix délibéré de notre part. Nous souhaitons, par ce biais, contrôler d'éventuels effets de la nature des sous-tâches sur l'allocation des ressources, et focaliser l'analyse sur l'influence spécifique des attributs.

Si ces manipulations nous ont permis de mettre en évidence la dimension stratégique à l'œuvre dans les comportements de priorisation, il reste que, par ce biais, nous avons aussi mis de côté une dimension essentielle des situations opérationnelles : l'hétérogénéité des tâches. Tous les systèmes complexes sans exception proposent des environnements de travail hétérogènes, où les tâches diffèrent les unes des autres, par exemple par leur difficulté, leur exigence temporelle, le type de ressources qu'elles sollicitent etc. Cette hétérogénéité est d'ailleurs une dimension essentielle des environnements de simulation multitâches, tels que le MATB-II (Santiago-Espada et al., 2011), SYNWORK (Elsmore, 1994), ou encore le PMB (présenté p.70 ; Matton et al., 2016).

Étudier les phénomènes de priorisation en évacuant ces effets de structure, c'est prendre le risque de surévaluer le poids des attributs et des phénomènes cognitifs associés. Par exemple, dans leur étude de 2014, Gutzwiller et al., notaient le faible poids d'une consigne de priorité, sur l'allocation des ressources, en comparaison à d'autres dimensions des tâches comme leur difficulté ou leur saillance. Ces considérations ont d'ailleurs mené les auteurs à attribuer un poids nul au paramètre « priorité », de leur modèle de gestion stratégique des situations de surcharge (modèle STOM ; Wickens et al., 2016).

C'est donc la première limite que nous adresserons dans cette contribution, où il s'agira d'évaluer le poids des phénomènes de priorisation dans un environnement double-tâche *mais hétérogène*.

## 1.2. La priorisation en situation d'incertitude

Comme nous l'avons expliqué en introduction de ce manuscrit (p.3), les situations auxquelles nous nous intéressons sont fondamentalement *dynamiques* et, à ce titre, sont traversées par des phénomènes d'incertitude (Amalberti, 2001; Hoc, 2004a; Woods, 1988). En effet, dans la mesure où une situation dynamique est par définition ouverte à d'autres influences que celles de l'opérateur humain, ce dernier ne peut disposer d'une conscience *complète* de la situation future (Endsley, 1995; Lu et Zhang, 2004). Par exemple, le pilote d'un avion de combat ne peut connaître *complètement* l'état

futur d'une situation, dans la mesure où les informations relatives à une attaque ennemie sont partielles et incertaines (Amalberti, 1996). De même à l'hôpital, l'anticipation de l'activité future est toujours soumise à un certain degré d'incertitude, puisque certains paramètres, telle que l'arrivée d'un ou plusieurs patients dans le service, ne sont pas contrôlés directement par les opérateurs – lesquels, dans de telles situations, doivent se contenter de gérer les conséquences de ces événements. Enfin, l'automatisation grandissante de nombre d'opérations, en même temps qu'elle se présente comme un élément central de la fiabilité des systèmes, peut générer des incertitudes, en raison notamment d'un manque de transparence quant au fonctionnement interne des automatismes (Sarter et Woods, 2000; Woods et al., 1994), manque que l'on pourrait aussi qualifier de « bruit », entre les entrées et les sorties d'un système du point de vue de l'opérateur (Osman, 2010). Ainsi, l'incertitude est une composante fondamentale des situations dynamiques, et la gestion/réduction de l'incertitude, une dimension centrale de l'activité des opérateurs, à laquelle de nombreux processus de contrôle contribuent (Huettel et al., 2005; Mushtaq et al., 2011; Osman, 2010).

Par exemple, Osman (2010) a montré que, lors de la réalisation de tâches complexes, la perception de l'incertitude était associée à une augmentation de la fréquence des comportements de surveillance (*monitoring*), ainsi qu'à une augmentation de la quantité de ressources allouée à la vérification des résultats d'une action. Mosier et al. (2007), lors de recherches portant sur la performance des pilotes dans un contexte de simulation, ont noté que les pilotes passaient plus de temps dans des opérations de surveillance, lorsque l'environnement présentait des informations incongrues, conflictuelles, et inattendues (p.ex., pannes système), par comparaison à un environnement plus stable et prévisible. De même, Metzger et Parasuraman (2005) ont montré que des contrôleurs aériens avaient plus de chance de détecter des situations conflictuelles dès lors que le système d'aide qui leur était fourni était présenté comme moins fiable, entraînant, comme l'ont supposé les auteurs, une augmentation des ressources allouées par les opérateurs à la surveillance des conflits. Enfin, et conformément aux résultats de ces travaux, Diez et al. (2001), ont montré en utilisant une technique d'oculométrie, que dans le contexte d'un vol simulé, les pilotes allouaient plus de ressources visuelles aux indicateurs les moins stables (p.ex., altitude, position, vitesse etc.), susceptibles d'évoluer rapidement, et indépendamment de l'action des pilotes.

Dans nos deux premières contributions, les tâches que nous avons proposées aux participants ne présentaient pas une telle incertitude : le lien qui unissait *stimuli*, *réponses* et *résultats* était connu et stable. Toutefois, dans la mesure où la priorisation a des conséquences directes sur l'allocation des

ressources, il apparaît nécessaire d'introduire des tâches d'incertitude dans notre étude. Il n'existe à notre connaissance aucuns travaux portant sur l'étude des relations entre priorité et gestion de l'incertitude. Pourtant, il est fort probable que les priorités (assignées ou calculées) des tâches, en ayant une influence sur l'allocation des ressources, aient une influence indirecte sur la performance à des tâches comportant une forte incertitude. En effet, l'incertitude est un facteur important de complexité (Osman, 2010), dont on sait qu'elle est souvent corrélée à la charge de travail (Svensson et al., 1997; Athènes et al., 2002; Knorr et Walter, 2011). De ce fait, et compte tenu des résultats obtenus jusqu'ici, nous pouvons supposer que des indications d'importance devraient avoir une influence sur la performance à une tâche comportant une forte incertitude. Dans l'idée de tester cette hypothèse, l'expérimentation qui sera présentée plus loin comportera une sous-tâche complexe d'incertitude.

### 1.3. Objectifs et présentation de l'étude

Suivant les limites que nous venons de présenter, la présente étude se donnait pour objectif d'apporter des éléments de réponse aux deux questions suivantes :

1. la priorisation peut-elle moduler l'allocation des ressources, dans un environnement double-tâche hétérogène ? Si oui, à quelle(s) condition(s) ?
2. la priorisation a-t-elle une influence sur la performance à une tâche d'incertitude ? Si oui, en vertu de quel(s) mécanisme(s) ?

Pour répondre à ces deux questions, nous avons élaboré une situation de double-tâche sur ordinateur, dans laquelle les deux sous-tâches que les participants devaient réaliser simultanément différaient de par leur nature. Pour la première sous-tâche, les participants devaient *surveiller* un écran de pilotage principal (PFD), et signaler toute valeur anormale. Pour la seconde sous-tâche, ils devaient réaliser des *prédictions* d'un état du système (panne ou  $\overline{\text{panne}}$ ), à partir de quatre voyants lumineux, dont chacun pouvait être allumé ou éteint, et était plus ou moins prédictif d'une panne (tâche de prédiction probabiliste, ou FPT pour *Failure Prediction Task*). Pour induire des importances diverses aux deux sous-tâches, nous n'avons pas utilisé d'attributs (comme lors des expérimentations précédentes) mais nous avons constitué trois groupes de participants qui ont reçu trois *consignes de priorité* distinctes. Les deux premiers groupes devaient respectivement donner une importance plus grande à la première et à la seconde sous-tâche. Le troisième groupe était un groupe contrôle, qui devait considérer les deux sous-tâches comme étant aussi importantes l'une que l'autre. Comme précédemment, les comportements des

participants étaient caractérisés grâce au relevé de leur performance et de leur comportement oculaire.

Nous faisons les hypothèses suivantes. Tout d'abord, compte-tenu du caractère hétérogène de l'environnement, nous faisons l'hypothèse que *toute chose étant égale par ailleurs*, la nature spécifique des sous-tâches (surveillance visuelle/apprentissage probabiliste) aurait une influence sur l'allocation des ressources et la performance (H1). Plus particulièrement, nous pensons que la sous-tâche de surveillance visuelle (PFD), en raison de la vigilance continue qu'elle impose, se verrait allouer une quantité de ressources visuelles supérieure à la sous-tâche d'apprentissage probabiliste (FPT), dont la performance dépendrait plutôt de processus cognitifs centraux (H1a). Sur le plan de la performance nous faisons l'hypothèse que la sous-tâche FPT, en raison de son caractère probabiliste, éliciterait des niveaux de performance moins élevés que la sous-tâche de surveillance visuelle, dont les règles stimulus-réponse étaient simples et connues des participants (H1b). De plus, nous faisons l'hypothèse que les consignes de priorité amèneraient les participants à moduler l'investissement des ressources spécifiquement sollicitées par chaque sous-tâche, et ce d'autant plus que la sous-tâche serait difficile. Ainsi, conformément à (H1b), nous pensons que seule la performance à la sous-tâche FPT serait modulée par les consignes de priorité (H2a). Plus précisément, nous pensons que le groupe ayant reçu la consigne de prioriser la sous-tâche FPT y montrerait une amélioration de sa performance, et qu'au contraire, le groupe ayant reçu la consigne de prioriser la sous-tâche PFD verrait ses performances décroître. Par ailleurs, et dans la mesure où la sous-tâche FPT solliciterait spécifiquement des ressources centrales ([Wickens, 2002](#)), nous faisons l'hypothèse que le comportement oculaire ne se trouverait pas modulé par ces consignes (H2b).

## 2. Méthode

La méthode présentée ci-dessous a été validée par le Comité d'Éthique sur les Recherches Non-Interventionnelles (CERNI), dans un avis portant le numéro suivant : CERNI-Université fédérale de Toulouse-2016-010.

## 2.1. Participants

Pour cette étude, trois groupes de six participants ont été constitués<sup>1</sup>. Tous étaient volontaires et étudiants à l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) ou à l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE, Toulouse). Avant l'expérimentation, tous ont lu et rempli un formulaire de consentement. Leur participation n'était pas rétribuée. Les participants n'étaient pas recrutés en fonction d'une compétence quelconque au pilotage ou à l'utilisation des instruments de bord d'un cockpit, tel que l'écran de vol principal (PFD).

## 2.2. Matériel

L'expérimentation a eu lieu dans une salle calme et isolée, dont la luminosité était comprise entre 10 et 15 lux. Toutes les tâches ont été exécutées sur un ordinateur Dell, pourvu d'un moniteur de 22 pouces, avec une résolution de 1680×1250 pixels. Les participants s'asseyaient à environ 70 cm de l'écran. La direction de leur regard était enregistrée grâce à un dispositif fixe d'oculométrie RED 500 (SensoriMotric Instruments ©). Les réponses des participants étaient données par le biais du clavier. Les temps de réaction ainsi que l'affichage des stimuli étaient pris en charge par Python 2.7. L'ensemble de la tâche a été codé en collaboration avec Antoine PERICCHI (ingénieur ENAC). Le codage complet de la tâche est disponible dans les annexes de ce manuscrit, page 340.

L'expérimentation était divisée en deux phases d'entraînement et de test. Lors de l'entraînement, les participants réalisaient séparément chacune des deux sous-tâches (Figure 8.1, p.188). Par soucis de synchronisation, les deux sous-tâches ont été conçues pour avoir la même durée par bloc ( $\approx 275$  secondes).

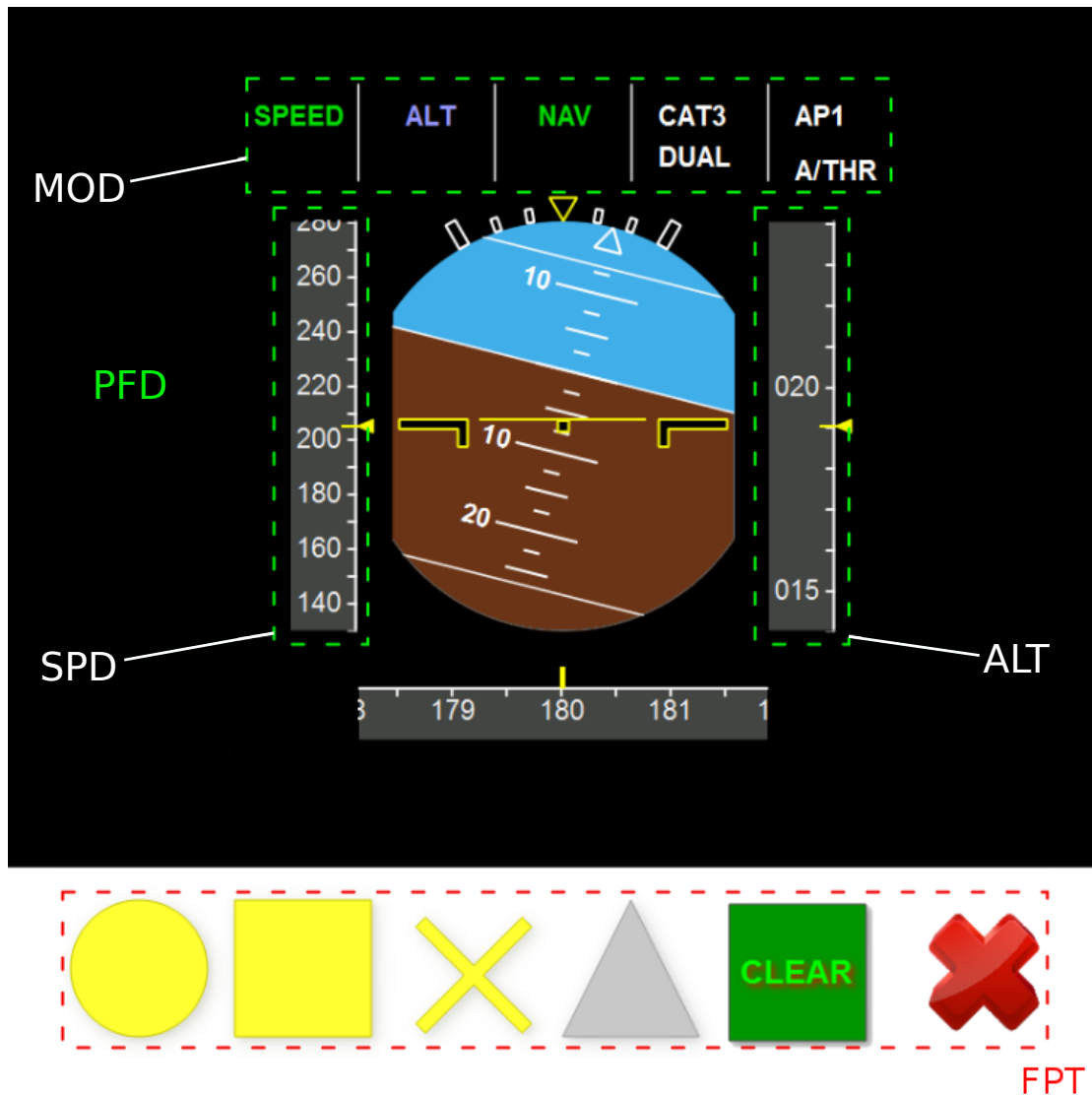
### 2.2.1. Sous-tâche de surveillance de l'écran de vol principal

Un écran de vol principal (ou *Primary Flight Display*, PFD), était affiché dans la partie haute de l'environnement, sur une aire de 10.5° de large, et 11° de haut. Les différents éléments du PFD (horizon artificiel, valeurs de cap, d'altitude, de vitesse) étaient animés par des mouvements sinusoïdaux de vitesses variables. Hormis les valeurs de mode (partie haute du PFD), toutes ces valeurs variaient de façon continue. Les participants devaient surveiller trois indicateurs et signaler toute valeur anormale en appuyant sur le bouton adéquat. Les indicateurs pertinents étaient les suivants :

---

1. Les résultats qui seront présentés ne sont que provisoires : les analyses définitives devraient inclure au moins dix participants par groupe.





**Figure 9.1** – Environnement de la double-tâche de surveillance et prédiction de panne. En haut, la tâche de surveillance de l'écran de vol principal (PFD). En bas, la tâche de prédiction de panne (FPT). Pour cette dernière, les voyants (rond, carré, croix, triangle) pouvaient être allumés (jaune) ou éteints (gris); les deux autres symboles représentent respectivement la réponse donnée par le participant (CLR ou ENG) et le *feedback* (✓ pour une bonne réponse; ✗ pour une mauvaise). Les cadres en pointillés représentent les aires d'intérêt définies pour l'analyse des données oculaires. Pour la sous-tâche PFD, trois sous-aires d'intérêt (pointillés verts) ont été définies, correspondant aux trois indicateurs à surveiller : l'altitude (ALT), la vitesse (SPD) ainsi que le mode de navigation (NAV). Les coordonnées précises de ces aires d'intérêt sont disponibles p.195 (Tableau 8.3)

<b>Vitesse</b>	Cet indicateur se situait à gauche de l'horizon artificiel (SPD). Par défaut, sa valeur oscillait entre 180 et 220 nœuds. Un évènement indésirable correspondait à une sortie de cette zone, par le haut (> 220) comme par le bas (< 180).
<b>Altitude</b>	L'indicateur d'altitude se trouvait à droite de l'horizon artificiel (ALT). Par défaut, sa valeur oscillait entre 1800 et 2200 pieds. Là encore, toute sortie de cette zone représentait un évènement indésirable.
<b>Mode de navigation</b>	En haut, au centre du PFD se trouvait un ensemble d'indications textuelles, dont le mode de navigation. Par défaut, le mode normal était indiqué par l'affichage du message <b>NAV</b> . Un évènement indésirable correspondait à un changement de couleur du texte : <b>NAV</b> .

Les participants interagissaient avec cette sous-tâche par le biais de trois touches du clavier, que nous avons étiquetées. La touche **SPD**-**F** servait à signaler une valeur anormale de vitesse ; la touche **NAV**-**H** servait à signaler un mode de navigation anormal ; enfin la touche **ALT**-**K** servait à signaler une altitude incorrecte. L'organisation des touches sur le clavier correspondait à l'organisation spatiale des trois zones, dans l'environnement de la sous-tâche PFD.

### 2.2.2. Sous-tâche de prédiction de pannes

La seconde sous-tâche était adaptée d'une tâche de prédiction probabiliste, conçue initialement par [Knowlton et al. \(1994\)](#), dans la perspective d'étudier les processus d'apprentissage implicite. Nous décrivons cette tâche, dans sa forme initiale, avant de présenter son adaptation.

#### La tâche de prédiction probabiliste de [Knowlton et al. \(1994\)](#)

Dans la tâche initiale de prédiction probabiliste utilisée par [Knowlton et al. \(1994\)](#), les participants voyaient se succéder un ensemble de combinaisons, composées à partir de 4 cartes. Chaque carte pouvait être présente ou absente, et pour chaque combinaison en résultant, les participants devaient réaliser une prédiction quant à la météo à venir (soleil ☀ ou pluie ☁). Chaque indice (carte) était lié au résultat avec une probabilité fixe (Tableau 8.1), les participants ne connaissaient pas ces valeurs et devaient, petit à petit, tenter de les apprendre pour réaliser les meilleures prédictions possibles.

### Adaptation de la tâche

Pour les besoins de l'expérimentation, nous avons repris cette tâche et lui avons donnée un nouvel habillage afin de simuler une tâche de prédiction *de pannes*. Nous avons strictement respecté la structure probabiliste initiale, explicitée par [Gluck et al. \(2002\)](#), voir Tableau 8.2), où nous avons simplement remplacé les quatre cartes-indices par quatre voyants lumineux. Le résultat à deviner lors de chaque essai n'était plus d'ordre météorologique, mais avait trait à l'état hypothétique d'un moteur (bon *ou* en panne). Les voyants étaient toujours présents à l'écran, et pouvaient être allumés (1) ou éteints (0). Globalement, les deux événements (panne et  $\overline{p}\overline{a}\overline{n}\overline{n}\overline{e}$ ) étaient équiprobables.

Les participants interagissaient avec cette sous-tâche par le biais de deux touches du clavier numérique, dûment étiquetées. La touche **CLR**-4 (pour *clear*) servait à signaler une absence de panne; la touche **ENG**-6 (pour *engine*) servait à signaler une panne moteur. Pour chaque participant, les quatre voyants étaient disposés dans un ordre aléatoire.







#### 2.2.3. Évaluation des stratégies individuelles à la sous-tâche de prédiction de pannes

Dans la perspective d'évaluer les stratégies individuelles des participants à la sous-tâche de prédiction de pannes, nous avons employé un questionnaire subjectif, administré après la phase test, suivant la méthode employée par [Gluck et al. \(2002\)](#).

Le questionnaire devait permettre aux participants de rendre compte des stratégies qu'ils pensaient avoir utilisées pour résoudre la sous-tâche de prédiction de panne. Il devait aussi leur permettre de réaliser une évaluation subjective de leur propre performance, ainsi que des contingences élémentaires indice-résultat. Ce questionnaire, dont la version complète est consultable p.303 des annexes, se décomposait comme suit :

1. **Question ouverte** : tout d'abord, les participants étaient invités à décrire le plus précisément possible, la stratégie qu'ils pensaient avoir utilisée pour prédire l'état du système (panne ou  $\overline{p}\overline{a}\overline{n}\overline{n}\overline{e}$ ). Les participants devaient aussi préciser s'ils trouvaient leur stratégie satisfaisante et/ou optimale.
2. **Évaluation subjective de la performance** : les participants devaient ensuite estimer leur performance, sur une échelle analogique, dont les deux extrémités représentaient respectivement une performance nulle et une performance maximale.
3. **Évaluation subjective des contingences indice-réponse** : pour finir, les

**Tableau 9.1** – Probabilités élémentaires de chaque résultat en fonction de la présence de chaque indice (voyant), dans la tâche de Knowlton et al. (1994, à gauche) et sa nouvelle version (à droite).

Version de Knowlton et al. (1994)				Nouvelle version			
Indice		Probabilité de		Indice		Probabilité de	
						panne	$\overline{\text{panne}}$
Carte 1		.756	.244	Voyant 1	○	.756	.244
Carte 2		.575	.425	Voyant 2	□	.575	.425
Carte 3		.425	.575	Voyant 3	×	.425	.575
Carte 4		.244	.756	Voyant 4	△	.244	.756

**Tableau 9.2** – Adapté de Gluck et al. (2002). Table des contingences de la tâche de prédiction de pannes. Pour chaque combinaison, un symbole peut être allumé (1) ou éteint (0). Pour une combinaison donnée, la probabilité de survenue d'une panne provient de la combinaison des probabilités élémentaires associées à l'état (0 ou 1) de chaque voyant (Tableau 8.1).

*Exemple de lecture* : 14 % d'essais montrent la combinaison A (0 0 0 1). Sur ces essais, 14.3 % sont associés à une panne, les autres sont associés à l'absence de panne.

Combinaisons	○	□	×	△	contingence	p(Panne)
A	0	0	0	1	0.14	0.143
B	0	0	1	0	0.08	0.375
C	0	0	1	1	0.09	0.111
D	0	1	0	0	0.08	0.625
E	0	1	0	1	0.06	0.167
F	0	1	1	0	0.06	0.500
G	0	1	1	1	0.04	0.250
H	1	0	0	0	0.14	0.857
I	1	0	0	1	0.06	0.500
J	1	0	1	0	0.06	0.833
K	1	0	1	1	0.03	0.333
L	1	1	0	0	0.09	0.889
M	1	1	0	1	0.03	0.667
N	1	1	1	0	0.04	0.750

participants devaient évaluer l'intensité de l'association entre chaque indice et l'évènement panne. Les questions étaient de la forme : « si seulement le voyant en forme de carré/rond/croix/triangle s'affichait, quel serait le pourcentage de fois où la réponse à donner serait une panne ? (Répondez par un nombre compris entre 0 et 100) »

### 2.3. Procédure

L'ensemble des consignes fournies aux participants est consultable dans les annexes (section 4, p.300).

Les participants commençaient par remplir un formulaire de consentement. Ils étaient alors, sans le savoir, affectés aléatoirement à l'un des trois groupes expérimentaux suivants :

<b>Groupe AUCUNE</b>	les sous-tâches sont aussi importantes l'une que l'autre (groupe contrôle)
<b>Groupe PFD</b>	la sous-tâche PFD est la plus importante
<b>Groupe FPT</b>	la sous-tâche FPT est la plus importante

Ils s'installaient ensuite à une distance convenable ( $\approx 70$  cm) du moniteur. Une fois la calibration de l'*eye-tracker* réalisée, les participants prenaient connaissance de l'environnement de la tâche. On leur indiquait la présence des deux sous-tâches, auxquelles ils allaient devoir s'entraîner séparément. Ils étaient ensuite informés que, à chaque phase de l'expérimentation (entraînement, test), ils recevraient des consignes sous forme écrite, mais qu'ils seraient autorisés à poser toute question qu'ils jugeraient nécessaire à l'expérimentateur, qui resterait dans la pièce tout au long de la passation, hors du champ visuel du participant. Seules les informations relatives à la structure probabiliste de la sous-tâche de prédiction de pannes devaient rester inconnues des participants.

Avant la phase test, les participants s'entraînaient à réaliser chaque sous-tâche séparément, ainsi que les deux simultanément. L'ordre des phases d'entraînement aux deux sous-tâches (PFD et FPT) était contre-balancé entre les participants.

#### Entraînement à la sous-tâche de surveillance (PFD)

Pour cet entraînement, les participants étaient informés qu'ils allaient devoir surveiller un écran de vol principal (PFD), et, qu'en particulier, ils devraient signaler toute valeur anormale, en appuyant sur le bouton correspondant. Ces valeurs leurs étaient ensuite indiquées (voir section 2.2.1, p.187). Il leur était précisé que le comportement du PFD ne serait pas réaliste

(c.-à-d. ne respecterait pas un modèle de vol) et qu'en ce sens, il n'était nul besoin d'une compétence particulière de pilotage pour réaliser correctement cette sous-tâche. Les participants devaient répondre en utilisant leur main gauche, pour se préparer à la condition double-tâche.

Cet entraînement se composait d'un bloc de 275 secondes. Un bloc comportait 8 événements à détecter, de 4 secondes chacun. Ces événements étaient distribués aléatoirement sur toute la durée du bloc. Ils étaient séparés deux à deux – ainsi que du début et de la fin du bloc, par un minimum de 8 secondes. Deux indicateurs ne pouvaient donc afficher des valeurs anormales simultanément. De même, deux événements successifs ne pouvaient concerner le même indicateur. Lorsqu'un événement-cible était détecté assez vite (en moins de 4 secondes), l'indicateur retournait immédiatement à son état nominal. Ces informations, relatives au séquençage, au nombre d'événements-cibles, et à leur distribution dans le temps, n'étaient pas connues des participants. Enfin les mauvaises réponses (oubli ou fausse alarme) n'étaient pas signalées aux participants.

### **Entraînement à la sous-tâche de prédiction de pannes (FPT)**

Pour cet entraînement, les participants étaient informés qu'ils allaient devoir prédire la survenue d'une panne moteur sur la base d'indications lumineuses (voyants). Ils étaient informés que chaque voyant serait *plus ou moins* prédictif d'une panne et que, pour chaque combinaison lumineuse, ils devraient prédire si elle annonçait plutôt une panne ou non, en utilisant les touches correspondantes. Les participants n'étaient pas prévenus du caractère probabiliste de la sous-tâche. Néanmoins ils étaient informés qu'au départ, ils auraient le sentiment de répondre aléatoirement, mais que ce sentiment s'estomperait au fil du temps, à mesure de leur apprentissage.

Cette phase se composait de 4 blocs. Un bloc se composait lui-même de 50 essais, et durait 275 secondes. Toutes les combinaisons possibles apparaissaient durant un bloc, en fonction de leur proportion d'apparition (Tableau 8.2, colonne « contingence »). Par exemple, la combinaison A apparaissait 14 % du temps, soit 7 essais sur 50, alors que la combinaison N n'apparaissait que 4 % du temps, soit 2 essais sur 50. Ces différences de proportion servaient à établir, au niveau d'un bloc, une *équiprobabilité* entre les les événements panne et  $\overline{\text{panne}}$ . Chaque essai durait 5.5 secondes. Cette durée correspondait à l'apparition d'une combinaison de voyants lumineux, pendant 4 secondes, suivi de l'apparition d'un *feedback* (✓ pour une bonne réponse; ✗ pour une mauvaise), pendant 1 seconde. La disparition du *feedback* et de la combinaison lumineuse était séparée de l'essai suivant par un intervalle inter-stimuli d'une demi-seconde. La réponse donnée par le participant (**CLR** ou **ENG**)

s'affichait dès l'appui touche, jusqu'à la disparition du *feedback*. L'ensemble des essais était présenté de façon aléatoire. Seule la répétition de deux combinaisons identiques était empêchée. Ces informations de séquençage et de contingences n'étaient pas connues des participants.

Les participants pouvaient modifier leur réponse tant que les quatre secondes n'étaient pas écoulées. Une absence de réponse était considérée comme une mauvaise réponse.

### **Entraînement à la double-tâche**

On indiquait alors aux participants que lors de la phase suivante, ils devraient réaliser les deux sous-tâches simultanément, en utilisant la main gauche pour répondre à la sous-tâche PFD, et la main droite pour répondre à la sous-tâche FPT. Ils étaient informés que les deux sous-tâches ne changeaient pas par rapport aux phases précédentes. C'est aussi à ce moment-là que les participants *recevaient la consigne de priorité* relative à leur groupe. *Les participants n'avaient pas connaissance de l'existence d'autres consignes possibles.* Cette phase se composait d'un seul bloc.

### **Phase de test et questionnaire**

Les participants recevaient ensuite les consignes de la phase test. Il leur était surtout rappelé la consigne de priorité qu'ils s'étaient vu attribuée. La phase de test se composait de 4 blocs, et durait 18 minutes environ.

Une fois la phase de test terminée, les participants devaient remplir le questionnaire d'évaluation des stratégies individuelles, pour la sous-tâche de prédiction de pannes. Il était demandé aux participants de compléter les items du questionnaire dans l'ordre.

## **2.4. Mesures et plan expérimental**

Pour chaque bloc, des métriques de performance et de comportement oculaire étaient calculées pour chacune des deux sous-tâches. La performance à la sous-tâche PFD correspondait simplement au taux de détection, c'est-à-dire le nombre de cibles détectées, ramené au nombre de total de cibles. Pour rappel, chaque évènement-cible durait 4 secondes et, toute réponse donnée après ce délai était considérée nulle.

Pour la sous-tâche FPT, le calcul de la performance correspondait strictement au calcul réalisé par [Gluck et al. \(2002\)](#). En effet, dans un tel contexte, la performance ne correspondait pas strictement au nombre de « bonnes » réponses puisque, *compte tenu du caractère probabiliste* du résultat,

**Tableau 9.3** – Définition des aires d'intérêt (AOIs), en pixels, pour la double-tâche de surveillance/prédiction. L'origine du repère était située en haut, à gauche de l'écran, dont la résolution était de 1680×1250 pixels

AOI	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>
FPT	425	1240	760	960
SPD	620	710	220	550
PFD ALT	970	1060	220	550
NAV	770	910	120	220

le participant pouvait donner une réponse optimale (c.-à-d., réponse la plus probable compte tenu de la combinaison) et, néanmoins, se voir retourner un *feedback* négatif. La performance ne correspondait donc pas à la proportion de bonnes réponses, mais à la *proportion de réponses optimales*, c'est-à-dire le nombre de réponses optimales, ramené au nombre total d'essai. Une absence de réponse était considérée comme une mauvaise réponse (non-optimale). De plus, les combinaisons n'admettant pas de réponse prépondérante [ $p(\text{panne}) = 0.5$ ] n'étaient pas incluses dans ce calcul, puisqu'aucune réponse optimale ne pouvait y être associée.

Pour chaque sous-tâche, les niveaux de performance obtenus lors de la phase test étaient systématiquement comparés aux niveaux obtenus à l'entraînement, en condition monotâche. Comme lors de la première expérimentation, (voir p.135) ce calcul devait permettre de distinguer les coûts dus à la concurrence des sous-tâches, des coûts dus à la demande des sous-tâches elles-mêmes, ainsi que de caractériser les effets spécifiques des consignes de priorité sur ces coûts de concurrence.

Enfin, le comportement oculaire était caractérisé par le *temps de fixation*, qui était exprimé en secondes, et était calculé comme la durée cumulée des fixations oculaires enregistrées à l'intérieur d'une AOI. Ces AOIs étaient rectangulaires. La sous-tâche PFD se composait de trois sous-AOIs, correspondant aux trois indicateurs à surveiller (Tableau 8.3). Le temps cumulé de fixation, pour l'AOI du PFD correspondait donc à la somme des temps cumulés de fixation pour ses trois sous-AOIs. Une fixation était définie comme un événement oculaire, au cours duquel l'œil ne présentait pas une dispersion de plus de 2°, pendant une durée d'au minimum 80 ms.

Les différentes mesures que nous venons de décrire étaient analysées selon des plans d'analyse distincts, qui seront annoncés dans les parties correspondantes de la section résultat. L'ensemble des analyses était conduit



avec le logiciel statistique R (version 3.2.1.)<sup>2</sup>. Pour tous les résultats, le seuil de significativité était fixé à .05 et l'éta-carré généralisé ( $\hat{\eta}_G^2$ ) était calculé. Si nécessaire, des tests post-hoc de comparaisons multiples corrigés avec la méthode de Bonferroni, étaient réalisés.

### 3. Résultats comportementaux

En raisons de problèmes survenus lors de l'enregistrement (absence d'acquisition des réponses), nous avons dû exclure un participant des analyses comportementales (performance et comportement oculaire;  $N = 17$ ).

#### 3.1. Analyse des performances à la sous-tâche de détection de pannes (FPT)

##### Performances en condition monotâche (entraînement)

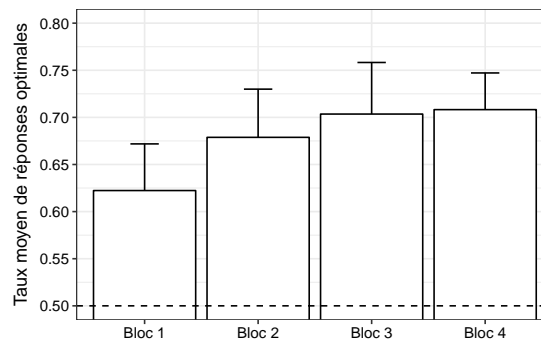
Pour l'analyse monotâche (entraînement), la proportion de réponses optimales obtenus à la sous-tâche FPT a été soumise à une ANOVA à un facteur : le bloc, facteur intra-sujet à quatre niveaux. Ce découpage devait permettre de faire ressortir l'évolution de la performance (voir [Gluck et al., 2002](#)).

Lors de l'entraînement monotâche, les participants montraient un taux de réponses optimales supérieur à 50 % ( $M = 0.67 \pm 0.07$ ). Ces taux n'étaient pas équivalents entre les quatre blocs de 50 essais [ $F(3, 51) = 4.14, p = 0.01, \hat{\eta}_G^2 = 0.11$ ]. Les tests post-hoc ont mis en évidence que cet effet était à mettre au compte d'une amélioration significative de la performance lors des deux derniers blocs relativement au tout premier bloc ( $p < .05$  pour 2 comparaisons; [Figure 8.2](#)). Enfin, les trois groupes montraient des niveaux de performance équivalents lors de l'entraînement [ $F(2, 14) = 0.53, p = .60$ ].

##### Effet des priorités sur les performances en condition double-tâche (test)

Dans la mesure où les blocs 3 et 4 de l'entraînement monotâche ne différaient pas significativement en termes de niveaux de performance, les performances obtenues lors de la phase test étaient systématiquement comparées aux niveaux de performance moyens obtenus à travers ces deux blocs. Les différences de performance obtenues étaient soumises à une ANOVA à un facteur, qu'était le groupe de priorité : variable indépendante catégorielle à trois modalités (AUCUNE, PFD ou FPT).

2. <https://cran.r-project.org/>



**Figure 9.2** – Taux de réponses optimales obtenus en condition monotâche, pour la sous-tâche de détection de pannes (FPT). Seuls les blocs 3 et 4 élicitaient des performances significativement supérieures aux performances obtenues au bloc 1. Les barres horizontales représentent les intervalles de confiance (0.95).

Globalement, la différence de performance observée entre l'entraînement et le test, était proche de 0 ( $M = -0.003 \pm 0.06$ ), et était significativement influencée par le groupe, c'est-à-dire par la consigne de priorité reçue [ $F(2, 14) = 4.17, p < .05, \hat{\eta}_G^2 = .37$ ] (Figure 8.3, B). En effet, le groupe ayant reçu la consigne de prioriser la sous-tâche FPT montrait une amélioration de performance ( $M = .040 \pm .06$ ), le groupe contrôle montrait plutôt une constance ( $M = .005 \pm .05$ ) et le groupe PFD montrait plutôt une diminution ( $M = -.052 \pm .06$ ). Les tests post-hoc ont révélé que cet effet du groupe était à mettre au compte d'une différence significative entre les groupes FPT et PFD ( $p = .036$ ). Les autres différences n'étaient pas significatives ( $p \geq .48$ , pour 2 comparaisons).

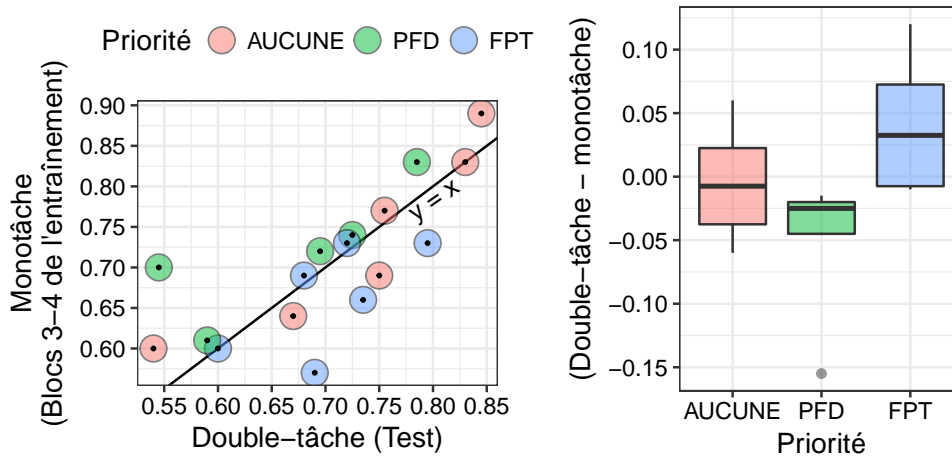
### 3.2. Analyse des performances à la sous-tâche de surveillance de l'écran de vol principal (PFD)

#### Performances en condition monotâche (entraînement)

Pour l'entraînement monotâche, les mesures de performance à la sous-tâche PFD (taux de détection), étaient soumises à une ANOVA à un facteur : l'indicateur d'intérêt, facteur intra-sujet à trois modalités (Vitesse, Navigation et Altitude).

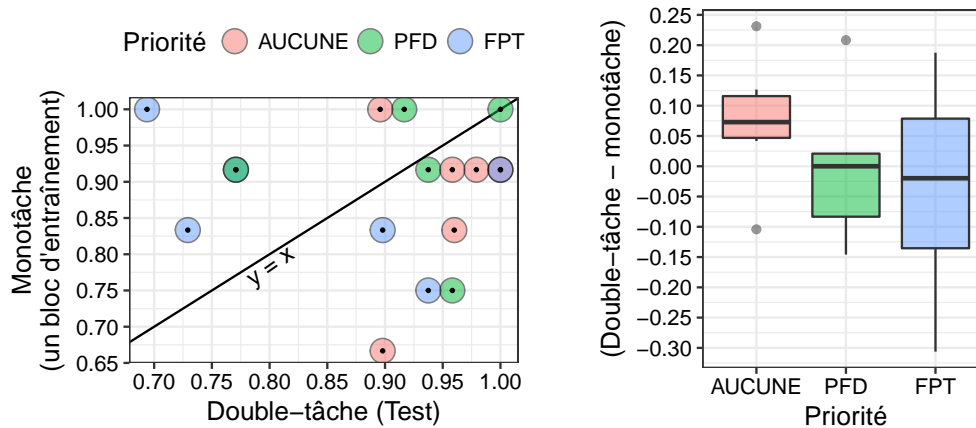
Lors de l'entraînement, le taux de détection moyen des participants à la sous-tâche de surveillance était proche de 90 % ( $M = .89 \pm .07$ ). Ce taux n'était pas significativement influencé par l'indicateur considéré [ $F(2, 32) = 2.13, p = .14$ ] (Figure 8.4, A). Enfin, les trois groupes ont montré des niveaux de performance équivalents lors de l'entraînement, [ $F(2, 14) = 0.29, p = .75$ ].

### Performances à la sous-tâche FPT



**Figure 9.3 – Différences de performances à la sous-tâche de prédiction probabiliste FPT,** entre les conditions double-tâche (Test) et monotâche (entraînement, blocs 3-4), en fonction du groupe de priorité. (A) Chaque point représente un participant. La droite  $y = x$  indique une performance équivalente entre les conditions monotâche et double-tâche. Les participants qui se trouvent sous cette droite ont amélioré leur performance durant la phase test, et vice-versa. (B) Le groupe ayant reçu l’instruction de prioriser la sous-tâche FPT est le seul a avoir amélioré sa performance *moyenne* au cours de la phase test. Les barres horizontales représentent les intervalles de confiance (0.95).

### Performances à la sous-tâche PFD



**Figure 9.4 – Performances à la sous-tâche de surveillance du PFD.** (A) Taux moyens de détection en condition monotâche (entraînement), en fonction de l’indicateur d’intérêt (Vitesse, Mode, Altitude). (B) Différences de performance, entre les conditions monotâche (entraînement) et double-tâche (test). Les barres horizontales représentent les intervalles de confiance (0.95).

### Effet des priorités sur les performances en condition double-tâche (test)

Les performances obtenues en condition double-tâche (taux de détection), à la sous-tâche PFD, étaient comparées aux niveaux atteints lors de l'entraînement monotâche. Les mesures de différence obtenues étaient soumises à une ANOVA  $3 \times 3$ , où le groupe de priorité était un facteur catégoriel à trois modalités (AUCUNE, PFD ou FPT), et où l'indicateur d'intérêt était un facteur intra-sujet à trois modalités (Vitesse, Navigation et Altitude).

Lors de la phase test, le taux de détection pour la sous-tâche de surveillance avoisinait les 90 % ( $M = 0.89 \pm 0.20$ ). En moyenne, ces niveaux ne différaient pas d'avec les niveaux obtenus en condition monotâche ( $M = -0.01 \pm .15$ ). En outre, ces différences de performance n'étaient pas significativement modulées, ni par le groupe [ $F(2,14) = 0.88, p = .44$ ], ni par l'indicateur d'intérêt [ $F(2,28) = 0.15, p = .86$ ], ni par l'interaction des deux [ $F(4,28) = 1.36, p = .27$ ] (Figure 8.4, B). En d'autres termes, cette sous-tâche ne subissait *pas de coût de concurrence* significatif, et l'évolution de la performance n'y était *pas significativement influencée par la consigne de priorité reçue*, et ce, quel que soit l'indicateur considéré (Vitesse, Navigation ou Altitude).

### 3.3. Analyse de l'allocation des ressources en condition double-tâche (test)

#### Pas d'effet des priorités sur l'allocation des ressources visuelles

La proportion de temps passé était soumise à une ANOVA à deux facteurs : le groupe de priorité, facteur catégoriel à trois niveaux (AUCUNE, FPT ou PFD) et l'AOI, facteur intra-sujet à deux niveaux (FPT et PFD, voir Tableau 8.3).

Globalement, lors de la phase test, la sous-tâche PFD se voyait allouer bien plus de ressources visuelles ( $M = 0.67 \pm 0.23$ ) que la sous-tâche FPT ( $M = 0.33 \pm 0.23$ ). Au plan statistique, cette différence se traduisait par un effet principal de l'AOI sur la proportion de temps passé [ $F(1,14) = 8.93, p < .01, \hat{\eta}_G^2 = .37$ ]. En outre, nous n'avons pas relevé d'interaction AOI  $\times$  groupe, pour expliquer la variation des proportions de temps de fixation [ $F(2,14) = 0.75, p = .49$ ].

Ainsi, la sous-tâche PFD recevait une quantité de ressources visuelles largement supérieure à la sous-tâche FPT, et cette asymétrie n'était pas influencée par les consignes de priorité reçues. En outre, notons que les différentes AOI ne se voyaient allouées qu'une partie mineure des ressources visuelles. En effet, lorsque nous ramenions, pour chaque AOI, les temps

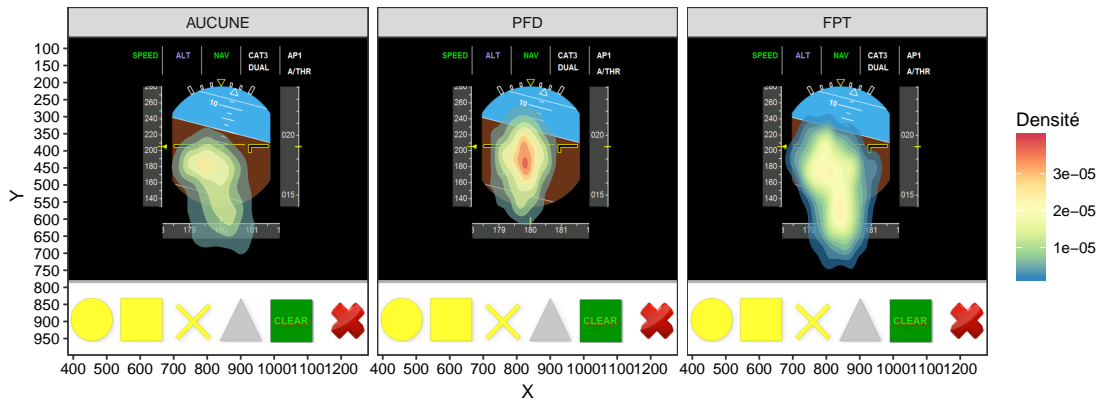


Figure 9.5 – Densité spatiale des fixations du regard, en fonction du groupe. Le groupe n’avait pas d’influence significative sur le localisation moyenne (x,y) des barycentres de ces fixations. Ces représentations spatiales de densité ont été calculées sur la base des localisations moyennes (barycentres) des fixations, par participant, par bloc et par essai (200 points par participant).

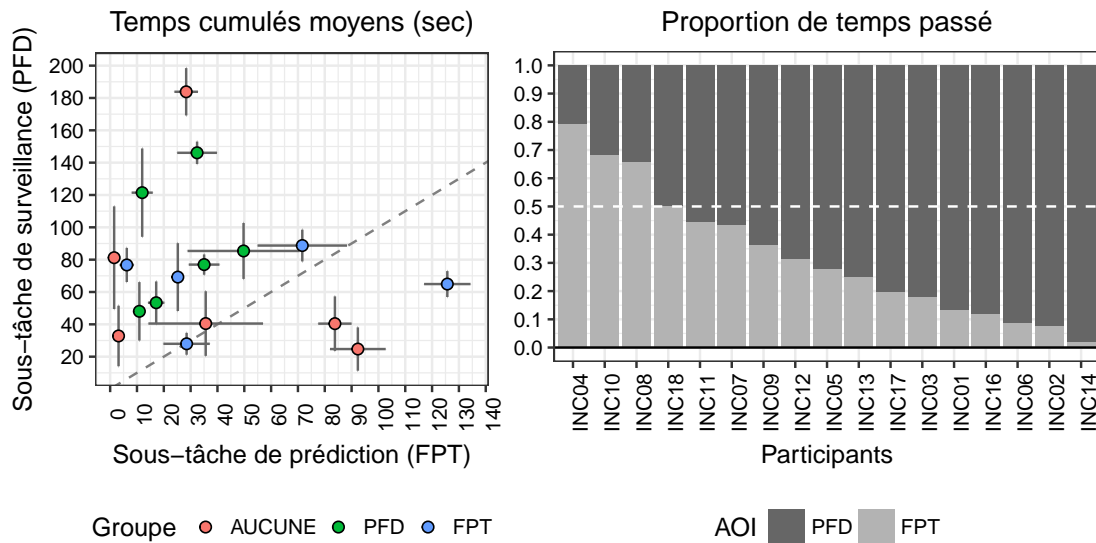


Figure 9.6 – Une forte disparité inter-individuelle dans l’allocation générale des ressources visuelles. À gauche, chaque point représente le compromis moyen réalisé par chaque participant lors de la phase test. Les barres verticales et horizontales représentent les écart-types, pour chaque participant, à travers les quatre blocs. À droite, proportion de temps passé sur chaque AOI, pour chaque participant, au cours de la phase test. Cinq participants ont alloué relativement plus de ressources à la sous-tâche FPT.

cumulés de fixation à la durée totale d'un bloc, les AOIs du PFD n'élicitaient que 6.7 % ( $\pm 3.1$ ) du temps total, et l'AOI de la sous-tâche FPT, seulement 3.5 % ( $\pm 4.0$ ). En outre, et de façon informelle, nombreux sont les participants qui ont déclaré avoir traité la sous-tâche FPT « en vision périphérique », dès lors que nous leur expliquions l'objet réel de l'étude (priorisation) en toute fin d'expérimentation.

**Barycentres visuels** Ainsi, dans l'optique d'évaluer l'allocation *générale* des ressources visuelles au sein de l'environnement, nous avons mené une analyse sur les *barycentres moyens des fixations*. Pour chaque participant, chaque bloc et chaque essai (présentation d'une combinaison lumineuse), nous avons calculé le barycentre des fixations oculaires. Nous avons alors constaté une forte concentration moyenne du regard vers la partie centrale du PFD, au niveau de l'horizon artificiel (Figure 8.5). Afin de contrôler un effet éventuel du groupe de priorité sur cette allocation générale des ressources visuelles, nous avons ensuite calculé la moyenne de ces barycentres (x,y) par participant, que nous avons soumises à une ANOVA à un facteur (le groupe de priorité). Celle-ci a révélé que la localisation spatiale moyenne du regard n'était pas influencée par l'instruction de priorité reçue, tant dans les domaines vertical (y) [ $F(2, 14) = 1.48, p = .26$ ], qu'horizontal (x) [ $F(2, 14) = 0.11, p = .90$ ]. Ainsi, l'instruction de priorité n'avait pas d'effet, ni sur la quantité de ressources allouée aux aires d'intérêt respectives des sous-tâches PFD et FPT, ni sur l'allocation générale des ressources visuelles dans l'espace.

### Pas d'effet des priorités sur le comportement de surveillance du PFD

Pour cette analyse plus spécifique des comportements oculaires au sein du PFD, la mesure de proportion de temps passé, était soumise à une ANOVA à deux facteurs : le groupe de priorité, facteur catégoriel à trois niveaux (AUCUNE, FPT ou PFD) et l'aire d'intérêt du PFD, facteur intra-sujet à trois niveaux (Vitesse, Navigation et Altitude, voir Tableau 8.3). La mesure de proportion était calculée en ramenant le temps cumulé de fixation de chaque AOI, au temps total pour les trois AOIs.

Les priorités n'avaient pas non plus d'effet principal sur l'allocation des ressources, à l'intérieur du PFD [ $F(2, 14) < 0.001, p = 1.0$ ]. En effet, cette allocation était principalement déterminée par la nature des indicateurs, c'est-à-dire, au niveau statistique, par un effet principal de l'AOI [ $F(2, 28) = 85.1, p < .001, \hat{\eta}_G^2 = .84$ ]. Les post-hoc ont montré que les trois aires différaient significativement deux à deux, relativement à la proportion de temps passé ( $p < .001$ , pour 3 comparaisons). L'indicateur de vitesse élicitait une proportion de temps passé, significativement plus élevée ( $M = 0.54 \pm .10$  sec) que

l'indicateur d'altitude ( $M = 0.39 \pm .10$  sec), lequel élicitait à son tour une proportion, significativement plus élevée que l'indicateur de navigation ( $M = 0.07 \pm 0.04$  sec). Enfin, nous n'avons pas non plus relevé d'interaction groupe  $\times$  AOI, pour expliquer les variations de proportion de temps passé, au sein du PFD [ $F(4, 28) = 1.13, p = .36$ ].

Finalement, l'ensemble des résultats portant sur l'allocation des ressources visuelles suggère qu'ici, seule la *nature* des sous-tâches, ainsi que des indicateurs du PFD, avait du poids sur la détermination de l'allocation générale des ressources visuelles. Néanmoins, comme le montre la Figure 8.6, la quantité de ressources allouée montrait une forte variabilité inter-individuelle. De ce fait, nous avons souhaité, par une analyse corrélationnelle, vérifier un éventuel effet de ces différences inter-individuelles sur les niveaux de performance atteints.

### 3.4. Analyses corrélationnelles

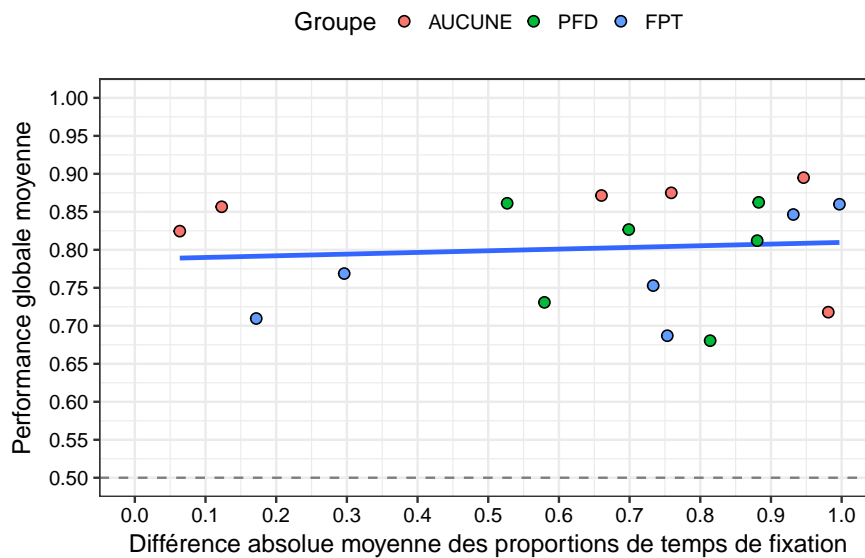
Nous avons mené deux analyses corrélationnelles inter-sujets, grâce à la méthode de Pearson. La première analyse devait permettre d'évaluer la mesure dans laquelle les niveaux de performance atteints aux deux sous-tâches, étaient corrélés à la quantité de ressources qui leur était allouée. La seconde analyse devait, comme lors des expérimentations précédentes, permettre de mesurer la corrélation entre la tendance moyenne des participants à se prioriser, et le niveau global de performance qu'ils atteignaient. Ce niveau correspondait simplement à la moyenne du taux de détection pour la sous-tâche PFD, et du taux de réponses optimales pour la sous-tâche FPT.

#### 3.4.1. Pas d'effet de la proportion de temps passé sur la performance locale

Des tests de corrélation de Pearson ont montré qu'il n'y avait pas de corrélation significative entre la proportion de temps de fixation et le taux de détection, élicités par la sous-tâche PFD [ $r = -.28, df = 16, p = .27$ ]. De même, pour la sous-tâche FPT, il n'y avait pas de corrélation significative entre proportion de temps passé et taux moyen de réponses optimales [ $r = -.04, df = 16, p = .87$ ].

#### 3.4.2. Pas de corrélation entre la tendance à se prioriser et le niveau de performance global

Le calcul de corrélation a révélé qu'il n'existait pas de relation significative entre la tendance des participants à se prioriser – indexée par la différence



**Figure 9.7** – Relation entre la tendance des participants à se prioriser et leur niveau de performance globale. Chaque point représente un participant. Comme la figure le suggère, il n’y avait aucune corrélation entre ces deux mesures.

absolue moyenne des proportions de temps de fixation, et leur niveau de performance globale [ $r = .09$ ,  $df = 16$   $p = .71$ ].

L’ensemble des résultats corrélationnels viennent appuyer l’idée que les différences de performance observées à travers les participants pour les deux sous-tâches, n’étaient pas significativement liées aux différences observées dans l’allocation de leurs ressources *visuelles*.

## 4. Discussion des résultats comportementaux

Pour rappel, l’objectif général de cette étude consistait évaluer la mesure dans laquelle des consignes de priorisation peuvent moduler l’allocation des ressources et/ou la performance, dans un environnement hétérogène impliquant une sous-tâche d’incertitude. Nous avons avancé :

H1 : que *toute chose étant égale par ailleurs*, la nature spécifique des sous-tâches (surveillance visuelle/apprentissage probabiliste) aurait une influence sur l’allocation des ressources et la performance

- a) que la sous-tâche de surveillance visuelle (PFD) se verrait allouer une quantité de ressources visuelles supérieure à la sous-tâche d’apprentissage probabiliste (FPT)



b) que la sous-tâche FPT éliciterait des niveaux de performance moins élevés que la sous-tâche de surveillance visuelle

H2 : que les consignes de priorité amèneraient les participants à moduler l'investissement des ressources spécifiquement sollicitées par chaque sous-tâche, dans la mesure où la sous-tâche serait difficile, et qu'en conséquence de (H1) :

a) seule la performance à la sous-tâche FPT serait modulée par les consignes de priorité; que le groupe ayant reçu la consigne de prioriser la sous-tâche FPT y montrerait une amélioration de sa performance, et qu'au contraire, le groupe ayant reçu la consigne de prioriser la sous-tâche PFD verrait ses performances décroître

b) que, dans la mesure où la ressource visuelle n'était pas la ressource spécifiquement sollicitée par cette sous-tâche FPT, le comportement oculaire général ne se trouverait pas modulé par ces consignes de priorité

La plupart de nos hypothèses ont été validées par les résultats comportementaux que nous venons de présenter. La sous-tâche FPT a effectivement engendré des niveaux de performance moins élevés (H1b), et s'est vue allouer moins de ressources visuelles que la sous-tâche de surveillance du PFD (H1a). De plus, conformément à (H2), nous avons observé un effet spécifique des consignes de priorité. En effet, si ces dernières n'ont eu aucune influence sur l'allocation des ressources (H2b) – tant entre les deux sous-tâches principales, qu'au sein du PFD lui-même – elles ont engendré, en revanche, une modulation de la performance élicitée par la sous-tâche FPT (H2a). Les participants ayant reçu la consigne de prioriser cette sous-tâche étaient les seuls à y voir leur performance s'améliorer lors de la phase test, alors que tous les participants du groupe PFD voyaient leur performance stagner, sinon décroître. Enfin, de façon générale, l'absence de différences significatives, entre les niveaux de performance obtenus aux phases d'entraînement et de test – sinon pour la sous-tâche FPT et sous influence exclusive de la consigne – soutient l'idée que la situation de double-tâche proposée était un cas de *perfect-time-sharing*, c'est-à-dire une situation où la concurrence des sous-tâches n'engendre pas, en elle-même, de coût pour la performance (Navon et Gopher, 1979).

Ces premiers résultats viennent confirmer que l'hétérogénéité des tâches – propriété caractéristique des environnements écologiques – a une influence essentielle sur les phénomènes de priorisation. Toutefois, au contraire de ce que suggèrent certains travaux récents (Wickens et al., 2016), nos résultats soutiennent qu'il est trop tôt pour affirmer que l'importance des tâches (manipulée ici par le biais de la consigne) est un paramètre négligeable de leur *attractivité*. Dans le cadre de notre étude, si nous nous focalisons sur les phénomènes attentionnels *ouverts* (auxquels l'attractivité est généralement

ramenée; voir Wickens et al., 2016, p.323), alors effectivement, nous pourrions dire que l'importance des tâches n'a eu qu'un poids négligeable. Mais ce serait, en retour, négliger que la performance humaine en situation complexe n'est pas exclusivement déterminée par l'allocation des ressources visuelles, mais plutôt par l'existence d'un *ensemble* de ressources (Navon et Gopher, 1979; Wickens, 1991) ou modules (Salvucci et Taatgen, 2008), pouvant être sollicités en parallèle. Dans cette étude, en l'occurrence, les résultats ont montré qu'une consigne de priorité pouvait, sans influencer l'allocation des ressources visuelles, avoir un poids sur les performances élicitées – ici à la sous-tâche FPT.

Ceci indique clairement que, dans la présente situation, les consignes de priorité sont venues moduler l'investissement de ressources, *autres que les ressources visuelles*. Il s'agit d'un résultat important qui, pour une meilleure interprétation, nécessite d'identifier clairement les ressources et mécanismes principalement sollicités par la sous-tâche FPT. En effet, un débat existe autour des tâches d'apprentissage probabiliste telle que celle que nous avons utilisée, quant à la nature, *implicite ou déclarative*, des apprentissages qui y soutiennent la performance. Ainsi, l'analyse des questionnaires, et notamment des performances de rappel explicite, de la part des participants, devra permettre d'indiquer la nature des apprentissages qui ont eu lieu et, ce faisant, d'identifier plus avant les ressources impliquées dans cette sous-tâche.

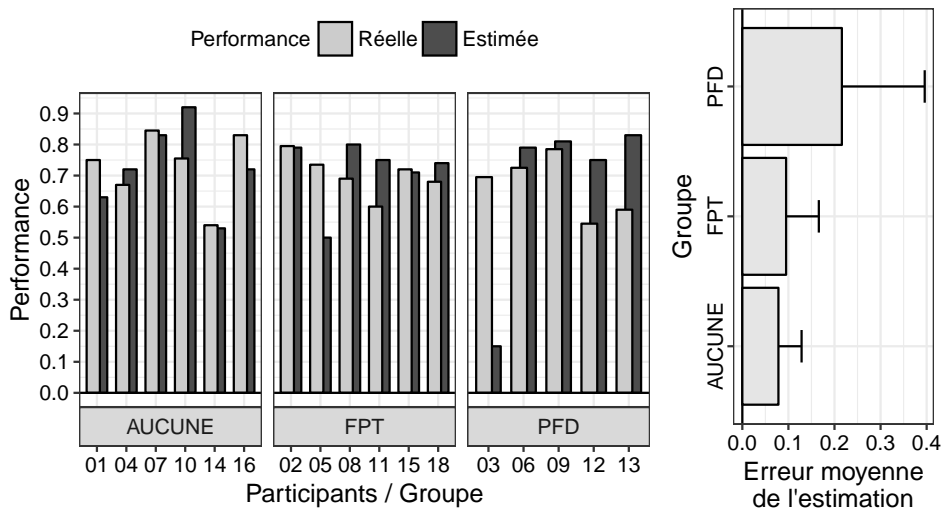
## 5. Résultats des questionnaires

### 5.1. Question ouverte

*L'ensemble des réponses à la question ouverte, est disponible p.285 des annexes*

Les réponses à la question ouverte étaient très variées. Certains participants ont simplement répondu qu'ils essayaient d'associer chaque symbole avec une probabilité de panne. D'autres participants évoquaient aussi, dans leur réponse, une tentative pour « mémoriser certaines combinaisons de voyants ». Un seul participant a rapporté une stratégie séquentielle, consistant à prédire une absence de panne lorsque la combinaison comportait au moins un voyant allumé de plus que la combinaison précédente. De même, un seul participant a déclaré répondre parfois au hasard. Pour schématiser, outre ces deux stratégies séquentielles ou hasardeuse, l'ensemble des stratégies évoquées renvoyait aux trois grandes stratégies décrites par Gluck et al. (2002) :

<b>Indice unique</b>	Lorsque le participant base sa réponse sur l'état (allumé/éteint) d'un voyant en particulier (p.ex., « La croix et le rond étaient plutôt associés à une panne » ; INC06).
----------------------	--



**Figure 9.8** – Erreur moyenne de l'évaluation subjective de la performance, en fonction du groupe. L'erreur moyenne correspondait à la différence entre l'estimation subjective de la performance et la performance moyenne réelle. Les traits horizontaux représentent les intervalles de confiance (0.95). Les différences observées dans la qualité de l'estimation subjective de la performance, entre les trois groupes, n'étaient pas significatives ( $p = .19$ ).

- Indices multiples** Lorsque le participant base sa réponse sur une combinaison de voyants (p.ex., « J'ai ensuite appris certaines combinaisons. Par exemple  $\triangle$  et  $\times$  = Clear »; INC04).
- Singleton** Lorsque le participant concentre son apprentissage sur les combinaisons ne contenant qu'un seul voyant allumé (1000,0100,0010,0001), et répond au hasard le reste du temps (p.ex., « Lorsqu'un seul symbole s'allumait, j'essayais d'apprendre le résultat, avec une certaine probabilité. Je faisais au hasard dès lors que plusieurs symboles étaient allumés »; INC05).

Ces stratégies n'étaient pas exclusives, et nombreux sont les participants ayant rapportés des stratégies composites plus complexes (p.ex., « au début, je répondais au hasard pour essayer de déterminer le rôle de chaque symbole individuel. Puis j'ai essayé de trouver la loi lorsque plusieurs symboles s'allument »; INC13).

## 5.2. Évaluation subjective de la performance

Au total, 13 participants sur 17 (76 %) ont rapporté être *satisfaits* de leur stratégie, dont 4 du groupe contrôle ( $N = 6$ ), 4 du groupe FPT ( $N = 6$ ), et

5 du groupe PFD ( $N = 5$ ). En revanche, seuls 3 participants (2 du groupe FPT, 1 du groupe PFD) pensaient avoir utilisé la *meilleure* stratégie possible. Il n'y avait pas de lien entre la performance réelle obtenue, et la satisfaction subjective. Les participants qui étaient satisfaits de leur stratégie ont réalisé en moyenne  $71.9\% (\pm 0.09)$  de réponses optimales, contre  $66.4\% (\pm 0.09)$  pour les participants non-satisfaits. Cette différence n'était pas significative [test de *student*, pour échantillons indépendants,  $t(7) = 1.04, p = .33$ ]. En revanche, ceux qui se disaient satisfaits de leur stratégie donnaient une estimation sensiblement plus élevée de leur propre performance ( $M = 0.78 \pm 0.14$ ), que ceux qui n'étaient pas satisfaits ( $M = 0.51 \pm 0.22$ ). Toutefois la significativité de cette différence n'était que marginale [ $t(4) = 2.20, p = .053$ ].

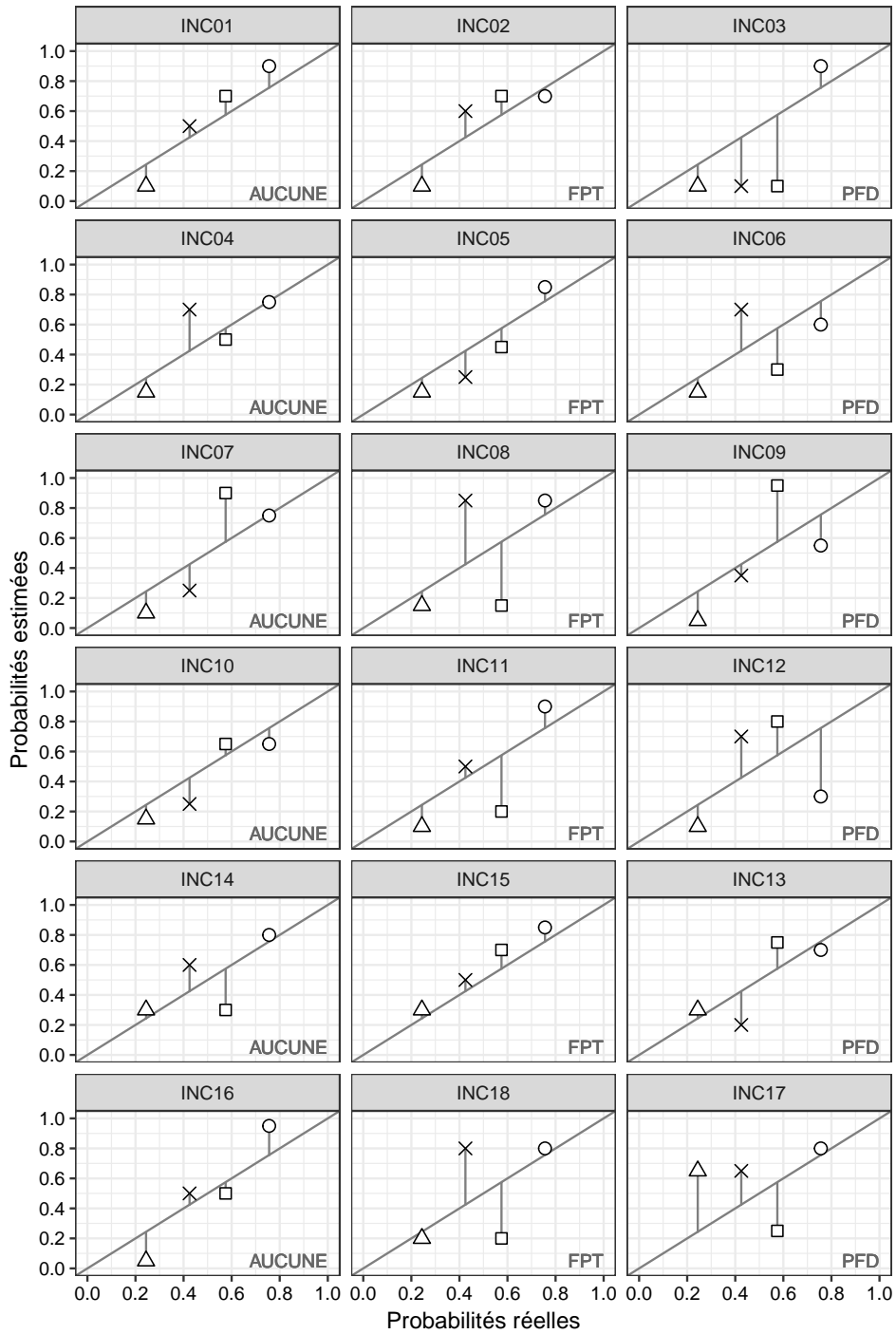
L'erreur moyenne de l'évaluation subjective de la performance, semblait plus élevée pour le groupe PFD ( $M = 0.22 \pm 0.20$ ) que pour les groupes contrôle et FPT ( $M = 0.08 \pm 0.06$  et  $M = 0.09 \pm 0.09$ , respectivement). Toutefois, ces différences n'étaient pas significatives, en raison, notamment, d'une forte variabilité inter-individuelle, au sein des groupes [ $F(2, 14) = 1.84, p = .19$ ; Figure 8.8].

### 5.3. Estimations des contingences indice-résultat

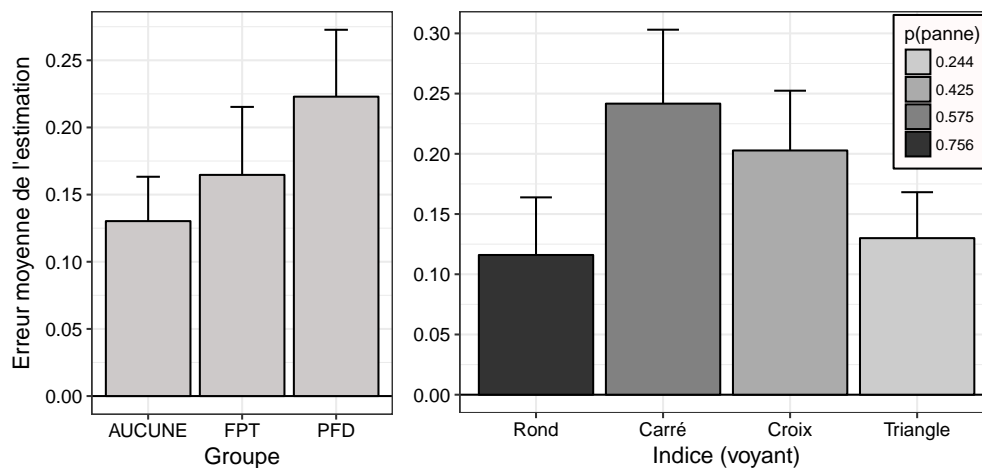
Les probabilités réelles et estimées étaient soumises à deux analyses distinctes. Tout d'abord, les données étaient soumises à une analyse de corrélation pour mesures répétées (Bakdash et Marusich, 2017, voir section 2.5, p.136). Cette analyse devait permettre d'évaluer le caractère hasardeux des estimations des participants. Puis, les différences absolues entre probabilités réelles et estimées étaient soumises à une ANOVA à deux facteurs : le groupe de priorité et l'indice, variable intra-sujet à quatre niveaux (rond, carré, croix, triangle), dans la perspective d'évaluer l'influence spécifique du groupe sur la qualité de ces estimations. Dans la mesure où ces deux analyses ne se référaient à aucune mesure comportementale, tous les participants y étaient inclus ( $N = 18$ ).

Pour chaque indice, les évaluations des participants montraient une forte étendue. Par exemple, pour le voyant rond, les estimations allaient de 0.3 à 0.95. Comme le montre la Figure 8.9, ces estimations n'étaient pas hasardeuses, et le coefficient moyen de corrélation, entre valeur estimée et valeur réelle, à travers les 18 participants, avoisinait les 70 % [ $r = .71, df = 53, p < .001$ ].

Ces estimations étaient influencées par un effet principal de l'indice [ $F(3, 45) = 5.76, p < .01, \hat{\eta}_G^2 = .23$ ]. Plus précisément les deux indices comportant la plus forte valeur prédictive (le rond et le triangle) élicitaient de meilleures estimations que le carré ( $p \leq .014$ , pour 2 comparaisons). La croix élicitaient des estimations qui ne différaient pas significativement des deux



**Figure 9.9** – Corrélations entre les probabilités de panne estimées et réelles, par participant, en fonction des indices (voyants). La corrélation intra-sujet moyenne entre probabilités réelles et estimées, était de 71 %. La droite  $y = x$  indique une estimation théorique parfaite. Les barres verticales représentent donc l'erreur d'estimation, pour chaque indice.



**Figure 9.10** – Erreur moyenne des estimations des contingences indice-résultat, en fonction (A) du groupe et (B) de l'indice (voyant). (A) Si les consignes de priorité ont bien eu un effet sur la qualité des estimations, cet effet n'a pas été suffisant pour engendrer une séparation des groupes deux à deux. Seules les groupes contrôle et FPT ont montré des niveaux d'erreurs significativement différents ( $p = .018$ ). (B) Les indices à forte valeur prédictive ont engendré moins d'erreurs d'estimation que les indices à faible valeur prédictive. Toutefois, seul l'indice carré élicitait un niveau d'erreur significativement plus élevé que les indices rond et triangle. Les barres horizontales représentent les intervalles de confiance (0.95).

indices à forte valeur prédictive ( $p \leq .14$ , pour 2 comparaisons; Figure 8.10, (B)).

Enfin, ces évaluations étaient aussi influencées par un effet principal du groupe [ $F(2, 15) = 5.19, p < .05, \hat{\eta}_G^2 = .14$ ]. Comme la Figure 8.10 le montre, les trois groupes montraient des qualités d'estimation distinctes. Les groupes contrôle et FPT montraient des erreurs moyennes d'estimation proches (respectivement  $M = 0.08 \pm 0.06$  et  $M = 0.10 \pm 0.09$ ), alors que l'erreur moyenne, pour le groupe PFD, dépassait le seuil des 20 % ( $\pm 0.19$ ). Toutefois, comme l'ont révélé les post-hoc, si la différence contrôle-PFD était significative ( $p = .018$ ), la différence FPT-PFD ne l'était pas ( $p = .16$ ).

Enfin, précisons que, comme l'a révélé une analyse de corrélation par la méthode de Pearson, il n'y avait pas de corrélation significative entre la qualité de l'estimation des contingences, et la quantité de ressources visuelles que les participants ont allouée à la sous-tâche FPT durant la phase test, [ $r = .21, df = 15, p = .33$ ].

## 6. Discussion des résultats des questionnaires

Pour rappel, la sous-tâche FPT était strictement analogue à la *Weather Prediction Task* (WPT), tâche d'apprentissage probabiliste formalisée par Knowlton et al. (1994), dont on considère en général qu'elle est résolue par l'entremise de processus d'apprentissage *non-déclaratifs*, c.-à-d. procéduraux (Knowlton et al., 1994; Poldrack et al., 2001; Shohamy et al., 2004). Plus récemment, les mécanismes soutenant l'apprentissage dans de tels paradigmes, on fait l'objet d'une controverse. Certains auteurs ont avancé que d'autres types de processus, *déclaratifs*, explicites et conscients, pouvaient être en mesure d'expliquer ce phénomène d'apprentissage probabiliste (Gluck et al., 2002; Newell et al., 2007; Price, 2009). En effet, il existe un certain nombre d'observations qui remettent en question le statut de la WPT, comme tâche sollicitant principalement les capacités d'apprentissage procédurales.

Newell et al. (2007) ont par exemple réalisé une comparaison entre deux versions de la tâche, supposées solliciter respectivement des mécanismes procéduraux (non-déclaratifs) et déclaratifs d'apprentissage. La version avec *feedback* (analogue à celle utilisée ici) était censée reposer sur un apprentissage procédural, alors que la seconde version, dite d'« observation », et dans laquelle les participants ne pouvaient qu'observer les relations indice-résultat sans pouvoir répondre, était supposée reposer sur des mécanismes d'apprentissage de type *déclaratif*. Les auteurs ont montré qu'une tâche concurrente de mémoire de travail produisait les mêmes coûts de performance, pour les deux types de tâches (expérimentation 1). De plus, il ont mis en évidence, par le biais de questionnaires, que les deux types de tâches élicitaient des représentations indice-résultat, de qualité comparable (expérimentation 2). Les auteurs ont argumenté que, si la version *feedback* avait sollicité exclusivement des processus d'apprentissage implicite, il n'aurait pas été possible d'observer des conséquences délétères d'une tâche concurrente de mémoire de travail sur la performance. De la même façon, les individus n'auraient pas pu relater une telle connaissance de la structure de la tâche.

Aussi les résultats de notre étude suggèrent, d'au moins deux façons, l'implication de mécanismes *déclaratifs* dans cette tâche d'apprentissage probabiliste. En effet, des modulations descendantes (*top-down*), induites par les différentes consignes de priorité, ont engendré, d'une part, une modulation des niveaux de performance et, d'autre part, une modulation de la qualité des représentations indice-résultat, explicitées grâce à la méthode du rappel verbal, méthode classique d'élicitation de l'apprentissage déclaratif (Tulving, 1972). Pour rappel, on caractérise généralement l'apprentissage implicite par « la production d'une base de connaissances :

- a) qui est **tacite**, abstraite, et se présente comme une structure analogue à l'environnement ;
- b) qui se déroule optimalement, **sans reposer sur un effort** conscient d'apprentissage ;
- c) qui peut soutenir la résolution de problèmes ou les prises de décision en contexte dynamique » (traduit de [Reber, 1989](#)).

Au contraire, la base de connaissance élaborée par les participants, pour la sous-tâche FPT était verbalisable, mais *surtout*, sa précision était modulée par l'importance que nous demandions aux participants d'accorder à la sous-tâche. En conséquence, il apparaît que c'est principalement sur les processus concourant à l'apprentissage explicite, que les priorités sont venues peser. Notons, toutefois, que cette affirmation n'exclue pas la possibilité que, dans le cadre de notre étude, les priorités aient pu également peser sur des processus implicites. En effet, comme l'ont affirmé [Gluck et al. \(2002\)](#), il y a fort à parier que les deux types d'apprentissage soient à l'œuvre dans ce type de tâches. Par exemple, certaines observations en imagerie fonctionnelle ont montré qu'au cours de la tâche, la structure des ganglions de la base, généralement impliquée dans l'apprentissage moteur et procédural ([Packard et Knowlton, 2002](#)), montrait une activation spécifique progressive, alors que le lobe temporal médian, structure plutôt impliquée dans les apprentissages de type déclaratif ([Squire et al., 2004](#)), montrait une désactivation ([Poldrack et al., 1999](#)). Quoiqu'il en soit, l'impossibilité dans le cadre de notre paradigme, de distinguer clairement les deux types de processus (voir [Jacoby, 1991](#), pour un exemple de procédure de dissociation), ne nous empêche en rien de conclure quant à la nature *déclarative* des phénomènes observés.

## 7. Discussion générale

L'ensemble des éléments que nous venons de présenter soutiennent l'idée que c'est bien sur les ressources contribuant à *l'apprentissage déclaratif* que les consignes de priorité sont venues peser. Toutefois, comme nous le montrons ci-dessous, la théorie des ressources multiples peine à rendre compte de ce phénomène.

### 7.1. L'apprentissage déclaratif dans le cadre de la théorie des ressources multiples

La théorie des ressources multiples ne postule pas que les phénomènes d'apprentissage déclaratifs reposent sur une ressource particulière. La théorie



prédit plutôt que la performance d'apprentissage sera fonction du *recouvrement des ressources* entre la sous-tâche d'apprentissage et la sous-tâche concurrente. Suivant la taxonomie de Wickens (2002), nous pouvons affirmer qu'ici, les deux sous-tâches reposaient sur un même ensemble de ressources, correspondant à l'étape *perceptivo-cognitive* du traitement. Dans une telle situation, la théorie prédit donc que la performance d'apprentissage aurait dû être corrélée à la quantité de ressources perceptivo-cognitives allouée – et ce d'autant plus que la sous-tâche FPT comportait une nature *déclarative* et, de ce fait, reposait pour partie sur la mémoire de travail et l'attention (Allport et al., 1972; Fisk et Schneider, 1984; Foerde et al., 2006; Nissen et Bullemer, 1987; Shiffrin et Schneider, 1977; Zeithamova et Maddox, 2006). La théorie des ressources multiples ne peut donc rendre compte de nos résultats, y compris si nous y ajoutons la distinction entre traitements visuels *focal* et *périphérique* (Previc, 1998). D'un côté, la distinction focal/périphérique pourrait permettre d'expliquer qu'en dépit d'une focalisation ouverte des participants sur la sous-tâche PFD, ces derniers ont pu traiter la sous-tâche FPT sur un mode périphérique. D'un autre côté, comme nous l'avons montré, si les participants allouaient la majeure partie de leurs ressources perceptives à la sous-tâche PFD, ce phénomène se redoublait d'une forte variabilité inter-individuelle. En effet, la sous-tâche PFD était *toujours favorisée*, mais la quantité absolue de ressources qui était allouée aux deux sous-tâches, pouvait varier d'un participant à l'autre. Or, cette variabilité ne s'est pas traduit par une modulation de la performance, à chacune des deux sous-tâches. Enfin, nous avons montré que la situation se présentait comme un cas de *perfect-time-sharing*, c'est-à-dire un cas de double-tâche, lors duquel la concurrence des sous-tâches n'engendre pas de coût intrinsèque, en elle-même. Se rajoutant aux considérations précédentes, ce fait vient confirmer que les ressources soutenant la performance à chacune des deux sous-tâches, étaient clairement distinctes.

En résumé, dans la mesure où lors de cette expérimentation, la modulation des niveaux de performance à la sous-tâche FPT n'était pas dépendante de la quantité de ressources perceptivo-cognitives qui lui était allouée, *il n'est pas possible de conclure que les consignes de priorité ont pesé sur les mécanismes d'allocation des ressources*, tout du moins des ressources identifiées comme distinctes, dans le cadre de la théorie de Wickens (2002).

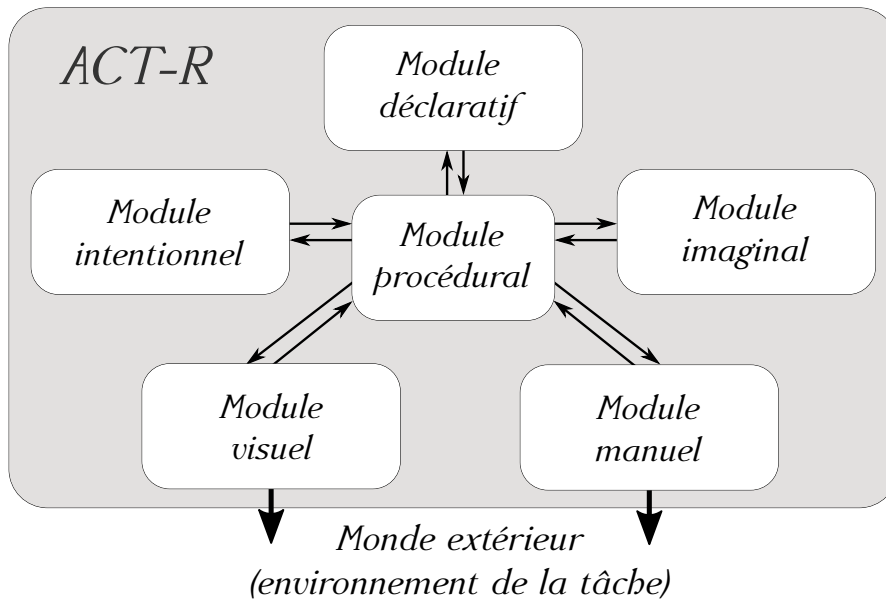
En revanche, d'autres métaphores de la structure des ressources, comme la métaphore computationnelle du modèle ACT-R (Anderson, 2009), pourraient rendre compte des résultats que nous avons présentés.

## 7.2. L'apprentissage déclaratif dans le cadre du modèle computationnel ACT-R

Le modèle ACT-R ([Anderson, 2009](#)) postule que la meilleure façon de comprendre le fonctionnement cognitif, consiste à le considérer comme un ensemble de modules (ou ressources), indépendants mais en interaction. Certains modules prennent en charge la perception et les activités motrices, comme la vision, l'audition, le contrôle manuel et la parole. D'autres modules cognitifs, caractéristiques d'ACT-R, sont dits « centraux » : le module déclaratif prend en charge la mémorisation des connaissances épisodiques ou sémantiques, ainsi que des instructions des tâches ; le module intentionnel contient le but actif du système, et prend en charge la surveillance de l'état du système, en relation avec ce but ; le module imaginal, analogue, dans une certaine mesure, à la mémoire de travail, soutient la rétention temporaire des représentations requises par la tâche ; enfin, le module procédural se présente comme un supra-module, réalisant la transmission des informations entre les différents modules, sur la base de règles, dites de « production », de la forme SI-ALORS (Figure 8.11).

L'une des propriétés les plus caractéristiques d'ACT-R, c'est que la dynamique du traitement de l'information y est déterminée par deux logiques complémentaires : une *logique intra-module sérielle*, et une *logique inter-module parallèle*. En d'autres termes, chaque module ne peut réaliser qu'une opération à la fois (p.ex., stockage d'une instance en mémoire pour le module déclaratif), mais ces opérations peuvent avoir lieu en parallèle à travers les modules. Toutefois, cela ne signifie pas une stricte indépendance de ces modules. En effet, ceux-ci sont tous interconnectés par le module procédural, qui est en charge d'organiser la transmission de l'information entre les divers modules.

Si cette théorie computationnelle semble mieux s'accorder avec nos résultats que la théorie des ressources multiples, elle souffre encore d'une limite. En effet, d'un côté elle peut permettre d'expliquer l'indépendance que nous avons observée, entre l'allocation des ressources visuelles, et les performances (objectives et subjectives) réalisées à la sous-tâche FPT. Il se pourrait en effet que, durant la tâche, le module visuel ne se soit pas trouvé à la limite de ses capacités, et ait pu, malgré des variations dans son allocation, traiter et transmettre suffisamment d'information au module procédural, pour que le traitement *visuel* des deux sous-tâches soit satisfaisant. D'un autre côté, la théorie ne permet pas réellement d'expliquer les modulations de la performance, induites par les différentes consignes de priorité. Il existe de nombreuses théories neurocognitives qui montrent et expliquent l'influence de motivations intrinsèques (buts) ou extrinsèques (récompense) sur les performances d'apprentissage déclaratif (voir [Adcock et al., 2006](#);



**Figure 9.11** – La métaphore computationnelle ACT-R. La dynamique générale du système cognitif y est caractérisée par deux contraintes : les modules ont la propriété de pouvoir opérer *parallèlement les uns aux autres*; mais chaque module comporte une dynamique intrinsèque *sérialisée* (une opération après l'autre).

Callan et Schweighofer, 2008; Miendlarzewska et al., 2016, pour des références récentes). On pourrait donc raisonnablement faire l'hypothèse que le module intentionnel, ayant contenu des buts différents selon les groupes, a pu permettre d'optimiser, chez les participants ayant reçu l'instruction de se prioriser sur la sous-tâche FPT, les performances du module déclaratif, et donc la force des traces mnésiques des associations indice-résultat. Mais malheureusement, ces hypothèses n'ont encore jamais été testées.

### 7.3. Conclusion

Finalement, la présente étude vient clairement enrichir nos précédentes conclusions à propos de la priorisation. Deux caractéristiques doivent être évoquées. Premièrement, comme nous venons de le montrer, la priorisation ne concerne pas uniquement les phénomènes attentionnels ouverts, mais peut produire des modulations de la performance, en pesant sur d'autres types de ressources/modules – ici le module déclaratif. Deuxièmement, nous avons retrouvé, lors de cette étude, l'idée qu'il existe un rapport important entre la priorisation et la charge de travail. Toutefois, alors que, dans les précédentes contributions, nous postulions un rôle pour la charge de travail *globale* d'une situation, la présente étude a, au contraire, révélé que la charge pouvait

influencer la priorisation de façon locale, c.-à-d. sur une sous-tâche et pas sur l'autre. Ceci suggère que la priorisation est un processus dont la logique première consiste à moduler l'investissement d'une ou plusieurs ressources spécifiques, dès lors qu'elles se trouvent sur-sollicitées, en raison d'un conflit entre plusieurs sous-tâches, ou d'une difficulté intrinsèque élevée. En utilisant la métaphore typologique du modèle computationnel ACT-R (Anderson, 2009), nous pourrions affirmer que, dans la situation que nous avons présentée, alors que le *module visuel* des participants n'était pas sur-sollicité (comme il l'était dans les contributions précédentes), le *module déclaratif* – en charge du stockage et de la récupération des données déclaratives – était, quant à lui, fortement sollicité, en raison du caractère probabiliste de la sous-tâche FPT et que, de ce fait, les consignes de priorité ont eu une influence *particulière* sur son activité, influence toutefois non démontrée dans la littérature ACT-R.

Enfin nous devons rester prudents quant à ces conclusions dans la mesure où les résultats que nous venons de présenter ne sont que provisoires et demandent à être complétés par d'autres passations.

## Bibliographie du chapitre

- Adcock, R. A., Thangavel, A., Whitfield-Gabrieli, S., Knutson, B., et Gabrieli, J. D. (2006). Reward-motivated learning : mesolimbic activation precedes memory formation. *Neuron*, 50(3) :507–517.
- Allport, D. A., Antonis, B., et Reynolds, P. (1972). On the division of attention : A disproof of the single channel hypothesis. *The Quarterly journal of experimental psychology*, 24(2) :225–235.
- Amalberti, R. (1996). *La conduite de systèmes à risques*. Presses universitaires de France.
- Amalberti, R. (2001). La maîtrise des situations dynamiques. *Psychologie française*, 46(2) :107–118.
- Anderson, J. R. (2009). *How can the human mind occur in the physical universe?* Oxford University Press.
- Athènes, S., Averty, P., Puechmorel, S., Delahaye, D., et Collet, C. (2002). Atc complexity and controller workload : Trying to bridge the gap. In *Proceedings of the International Conference on HCI in Aeronautics*, pages 56–60.
- Bakdash, J. Z. et Marusich, L. R. (2017). Repeated measures correlation. *Frontiers in Psychology*, 8.
- Callan, D. E. et Schweighofer, N. (2008). Positive and negative modulation of word learning by reward anticipation. *Human brain mapping*, 29(2) :237–249.
- Diez, M., Boehm-Davis, D. A., Holt, R. W., Pinney, M. E., Hansberger, J. T., et Schoppek, W. (2001). Tracking pilot interactions with flight management systems through eye movements. In *Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology*, pages 1–6. The Ohio State University Columbus.
- Elsmore, T. F. (1994). Synwork1 : A pc-based tool for assessment of performance in a simulated work environment. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 26 :421–426.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1) :32–64.
- Fisk, A. D. et Schneider, W. (1984). Memory as a function of attention, level of processing, and automatization. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 10(2) :181.
- Foerde, K., Knowlton, B. J., et Poldrack, R. A. (2006). Modulation of competing memory systems by distraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(31) :11778–11783.
- Gluck, M. A., Shohamy, D., et Myers, C. (2002). How do people solve the “weather prediction” task? : Individual variability in strategies for probabilistic category learning. *Learning & Memory*, 9(6) :408–418.

- Gutzwiller, R. S., Wickens, C. D., et Clegg, B. A. (2014). Workload overload modeling an experiment with math-ii to inform a computational model of task management. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 58 of 1, pages 849–853.
- Hoc, J.-M. (2004). *Ergonomie*, chapter 31, pages 515–530. Presses Universitaires de France.
- Huettel, S. A., Song, A. W., et McCarthy, G. (2005). Decisions under uncertainty : probabilistic context influences activation of prefrontal and parietal cortices. *Journal of Neuroscience*, 25(13) :3304–3311.
- Jacoby, L. L. (1991). A process dissociation framework : Separating automatic from intentional uses of memory. *Journal of memory and language*, 30(5) :513–541.
- Knorr, D. et Walter, L. (2011). Trajectory uncertainty and the impact on sector complexity and workload. *Federal Aviation Administration (FAA), Deutsche Flugsicherung GmbH*.
- Knowlton, B. J., Squire, L. R., et Gluck, M. A. (1994). Probabilistic classification learning in amnesia. *Learning & Memory*, 1(2) :106–120.
- Lu, J. et Zhang, G. (2004). Uncertain information processing framework for situation awareness and emergency decision-making. In *International Conference on Information*.
- Matton, N., Paubel, P., Cegarra, J., et Raufaste, E. (2016). Differences in multitask resource reallocation after change in task values. *Human Factors*.
- Metzger, U. et Parasuraman, R. (2005). Automation in future air traffic management : Effects of decision aid reliability on controller performance and mental workload. *Human Factors*, 47(1) :35–49.
- Miendlarzewska, E. A., Bavelier, D., et Schwartz, S. (2016). Influence of reward motivation on human declarative memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 61 :156–176.
- Mosier, K. L., Sethi, N., McCauley, S., Khoo, L., et Orasanu, J. M. (2007). What you don't know can hurt you : Factors impacting diagnosis in the automated cockpit. *Human Factors*, 49(2) :300–310.
- Mushtaq, F., Bland, A. R., et Schaefer, A. (2011). Uncertainty and cognitive control. *Frontiers in psychology*, 2.
- Navon, D. et Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3) :214.
- Newell, B. R., Lagnado, D. A., et Shanks, D. R. (2007). Challenging the role of implicit processes in probabilistic category learning. *Psychonomic bulletin & review*, 14(3) :505–511.

- Nissen, M. J. et Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning : Evidence from performance measures. *Cognitive psychology*, 19(1) :1–32.
- Osman, M. (2010). Controlling uncertainty : a review of human behavior in complex dynamic environments. *Psychological bulletin*, 136(1) :65.
- Packard, M. G. et Knowlton, B. J. (2002). Learning and memory functions of the basal ganglia. *Annual review of neuroscience*, 25(1) :563–593.
- Poldrack, R. A., Clark, J., Pare-Blagoev, E. J., et Shohamy, D. (2001). Interactive memory systems in the human brain. *Nature*, 414(6863) :546.
- Poldrack, R. A., Wagner, A. D., Prull, M. W., Desmond, J. E., Glover, G. H., et Gabrieli, J. D. (1999). Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *Neuroimage*, 10(1) :15–35.
- Previc, F. H. (1998). The neuropsychology of 3-d space. *Psychological bulletin*, 124(2) :123.
- Price, A. L. (2009). Distinguishing the contributions of implicit and explicit processes to performance of the weather prediction task. *Memory & cognition*, 37(2) :210–222.
- Reber, A. S. (1989). Implicit learning and tacit knowledge. *Journal of experimental psychology : General*, 118(3) :219.
- Salvucci, D. et Taatgen, N. A. (2008). Threaded cognition : an integrated theory of concurrent multitasking. *Psychological Review*, 115(1) :101–130.
- Santiago-Espada, Y., Myer, R. R., Latorella, K. A., et Comstock Jr, J. R. (2011). *The Multi-Attribute Task Battery II (MATB-II) Software for Human Performance and Workload Research : A User's Guide*.
- Sarter, N. B. et Woods, D. D. (2000). Team play with a powerful and independent agent : a full-mission simulation study. *Human Factors*, 42(3) :390–402.
- Shiffrin, R. M. et Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing : Ii. perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological review*, 84(2) :127.
- Shohamy, D., Myers, C. E., Onlaor, S., et Gluck, M. A. (2004). Role of the basal ganglia in category learning : how do patients with parkinson's disease learn? *Behavioral neuroscience*, 118(4) :676.
- Squire, L. R., Stark, C. E., et Clark, R. E. (2004). The medial temporal lobe. *Annu. Rev. Neurosci.*, 27 :279–306.
- Svensson, E., Angelborg-Thanderez, M., Sjöberg, L., et Olsson, S. (1997). Information complexity-mental workload and performance in combat aircraft. *Ergonomics*, 40(3) :362–380.
- Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. *Organization of memory*, 1 :381–403.

- Wickens, C. D. (1991). Processing resources and attention. *Multiple-task performance*, 1991 :3–34.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2) :159–177.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., Vieane, A., Clegg, B. A., Sebok, A., et Janes, J. (2016). Time sharing between robotics and process control validating a model of attention switching. *Human Factors*, 58(2) :322–343.
- Woods, D. D. (1988). Coping with complexity : the psychology of human behaviour in complex systems. In *Tasks, errors, and mental models*, pages 128–148.
- Woods, D. D., Johannesen, L. J., Cook, R. I., et Sarter, N. B. (1994). Behind human error : Cognitive systems, computers and hindsight. Technical report, Dayton University Research Institute.
- Zeithamova, D. et Maddox, W. T. (2006). Dual-task interference in perceptual category learning. *Memory & cognition*, 34(2) :387–398.



# CONCLUSION



## CHAPITRE 10

# Discussion générale

<b>1 Un processus d'orientation du contrôle exécutif.</b> . . . . .	237
<b>2 Implications pratiques</b> . . . . .	239
2.1 Enrichir la représentation des tâches . . . . .	240
2.2 Aider au maintien d'une priorisation rationnelle. . . . .	241
<b>3 Perspectives de recherche.</b> . . . . .	242
3.1 Évaluer systématiquement les dimensions proximales et distales de la priorisation. . . . .	242
3.2 Étudier la priorisation en situations dégradées . . . . .	242
3.3 Se réconcilier avec une approche normative de la priorisation . . . . .	243
3.4 Approfondir l'étude des relations entre la priorisation et le contrôle exécutif. . . . .	243
3.5 Approfondir l'étude des relations entre priorisation et détection du conflit, par l'utilisation de mesures neurophysiologiques . . . . .	244
Bibliographie générale. . . . .	247

L'objectif général de cette thèse consistait à *caractériser les processus de traitement de l'information qui soutiennent l'évaluation des priorités* dans des environnements multitâches. Ce faisant, nous avons rencontré une série de phénomènes, qui nous ont poussés vers d'autres questionnements. Nous avons par exemple rencontré nombre de situations où les participants ne manifestaient pas de comportements de priorisation. Ces situations nous ont menés à des réflexions concernant les conditions de leur apparition. En outre, en étudiant alternativement la performance double-tâche dans des conditions homogène et hétérogène, nous avons obtenu des informations très intéressantes sur le rôle de la priorisation, dans le cadre théorique des ressources multiples. Cette discussion adressera donc plusieurs sujets, qui renverront dans les faits à deux grandes questions à propos de la priorisation. Tout d'abord nous évoquerons l'ensemble des résultats qui permettent de

mieux comprendre *la logique de construction des représentations cognitives des priorités des tâches* : ce que nous appellerons la dimension *proximale* de la priorisation. Après quoi nous mettrons en perspective les résultats qui apportent des informations à propos de la priorisation « en action », c'est-à-dire à la fois des informations sur *les conditions de son apparition dans le comportement humain*, mais aussi en ce qui concerne *ses conséquences sur l'activité et la performance humaines* : ce que nous appellerons la dimension *distale* de la priorisation. Cette distinction entre dimensions proximale et distale, que nous empruntons à [Bugg et Crump \(2012\)](#), renvoie à l'idée que le contrôle cognitif est soutenu par deux types de processus : des processus qui concourent à l'élaboration de représentations pertinentes pour l'action (dimension proximale), mais aussi des processus dont la fonction est d'*utiliser* les contenus proximaux (p.ex., des niveaux de priorité) pour diriger le contrôle de l'activité. En anticipant un peu, cela signifie par ailleurs que les deux types de processus peuvent être mis au rang des processus de contrôle, dans la mesure où tous deux conditionnent la performance et l'atteinte, par les individus, des buts qui leur sont assignés.

## **1. La dimension proximale de la priorisation : l'évaluation cognitive des priorités**

Comment les opérateurs évaluent-ils les priorités respectives des tâches qu'ils ont à réaliser? Plus particulièrement, comment gèrent-ils, au plan cognitif, les conflits de polarité? Autrement dit, quelle est la politique cognitive de résolution des conflits entre divers attributs des tâches en présence?

Les deux premières contributions de cette thèse ont permis d'apporter un certain nombre de réponses à ces questions. Lors de la première expérimentation, l'allocation des ressources visuelles des participants était *alternativement* déterminée par la difficulté *ou* l'importance des sous-tâches, en fonction du niveau de charge de travail. Lorsque celle-ci était faible (performance optimale), l'allocation des ressources était principalement dirigée par les niveaux de difficulté respectifs des deux sous-tâches; au contraire, lorsqu'elle était forte (diminution de la performance), les participants accordaient une quantité supérieure de ressources visuelles à la sous-tâche la plus importante. De même, lors de la deuxième expérimentation, les participants qui manifestaient des comportements de priorisation<sup>1</sup> (tierce 3), ne réalisaient pas non plus de compromis entre les différents attributs

---

1. C'est à-dire une allocation préférentielle de leurs ressources visuelles vers l'une des deux sous-tâches

des tâches disponibles, mais « passaient » de l'un à l'autre, en fonction de leur caractère discriminant. En particulier, nous avons montré que, chez ces participants, l'attribut de Récompense des sous-tâches modulait principalement l'allocation de leurs ressources visuelles et que l'attribut de Tolérance à l'erreur pesait sur cette allocation, *uniquement* lorsque les niveaux de récompense ne permettaient pas de discriminer les deux sous-tâches (récompenses égales).

Ainsi, lors de ces deux expérimentations, les comportements visuels de priorisation ne traduisaient *pas la réalisation d'un compromis entre l'ensemble des attributs* des tâches en présence, mais plutôt la recherche et l'utilisation stratégique de l'attribut le plus pertinent, sur un mode *non-compensatoire* (Payne et al., 1993). Autrement dit, *le temps passé sur une sous-tâche donnée n'y était pas proportionnel à son utilité espérée* mais était déterminé, au contraire, par une logique *heuristique* selon laquelle, parmi les attributs disponibles, un seul était sélectionné à la fois, pour *diriger* l'orientation des ressources visuelles.

Outre qu'elles suffisent à expliquer les comportements observés, les théories heuristiques sont fortement plausibles au plan psychologique (Gigerenzer et Gaissmaier, 2011), en même temps qu'elles dessinent une toute autre conception de la rationalité humaine (Payne et al., 1993; Simon, 1990).

### 1.1. La plausibilité psychologique des heuristiques

L'une des principales justifications de l'existence des heuristiques provient de ce qu'elles permettent aux individus d'économiser leurs efforts, au prix d'une moindre précision (Shah et Oppenheimer, 2008). De ce point de vue, les êtres humains se fient aux heuristiques dans la mesure où la recherche et le traitement de l'information se payent de temps et d'effort : les heuristiques permettent en fait de « monnayer » une perte en précision contre une cognition plus simple et plus rapide (*fast and frugal*). Il existe à ce jour deux explications possibles à ce compromis *temps-précision* (Gigerenzer et Gaissmaier, 2011).

<b>Un compromis rationnel</b>	Toute décision n'est pas assez critique pour susciter un investissement maximum des ressources disponibles. Aussi, les individus recourraient aux heuristiques pour minimiser les efforts consentis dans une tâche donnée. De même que les individus tendent à éviter les efforts physiques (Hull, 1943), ils cherchent à éviter les efforts cognitifs (Kool et al., 2010), dans la mesure où ceux-ci comportent un coût intrinsèque (Smith et Walker, 1993). De ce point de vue, l'usage des heuristiques obéirait à un principe de rationalité, où le coût inhérent au calcul de la décision constituerait une
-------------------------------	--

forme d'« utilité négative », dont les individus tiendraient compte.

**Les  
limitations  
cognitives**

D'un autre point de vue, l'existence des heuristiques refléteraient tout simplement l'existence des limitations dans nos capacités de traitement. Les individus ne se fieraient pas aux heuristiques dans un soucis rationnel de *préserv*er leurs ressources, mais plutôt par nécessité. Les heuristiques se présenteraient comme la seule solution adaptative possible, étant donné nos capacités de traitement de l'information (Gigerenzer et Gaissmaier, 2011).

Ces deux explications ne s'excluent pas mais, au contraire, s'articulent l'une l'autre puisque l'usage des heuristiques tire son caractère *rationnel* de l'existence même de limitations et de la nécessité de préserver des ressources de traitement.

### 1.1.1. La rationalité écologique des heuristiques

L'étude des heuristiques s'inscrit très largement dans le cadre de la rationalité limitée, concept introduit par Simon (1956), et selon lequel les « comportements rationnels humains (et les comportements rationnels de tous les systèmes symboliques physiques) sont à l'image d'une paire de ciseaux, dont chaque lame correspond respectivement à la structure de l'environnement des tâches, et aux capacités de calcul de l'agent » (traduit de Simon, 1990, p. 7). Autrement dit, une stratégie n'est pas rationnelle en référence à un critère interne (p.ex., son caractère analytique), mais « dans la mesure où elle est adaptée à l'environnement » (traduit de Gigerenzer et Gaissmaier, 2011, p. 13). Dans son article de 1956, Simon donne l'exemple suivant. Supposons un premier environnement dans lequel de la nourriture est distribuée aléatoirement, et un second environnement dans lequel il existe des indices de la distribution de la nourriture (une forte contingence indice-nourriture). Dans le premier environnement, un organisme pourra s'en sortir en se reposant sur des stratégies de recherche relativement simples ; au contraire, dans le second environnement, l'organisme le plus adapté sera celui qui pourra tirer parti d'habiletés cognitives tels que l'apprentissage des contingences indice-résultat, ou encore des capacités à planifier sa recherche de nourriture. Autrement dit, dans le premier environnement (stochastique), un organisme rudimentaire serait *aussi rationnel* qu'un organisme disposant d'habiletés cognitives plus « évoluées ». De ce point de vue, la rationalité (limitée ou écologique) ne correspond donc pas à l'atteinte d'un *maximum* pour un critère donné (p.ex., l'utilité espérée), mais plutôt au *dépassement d'un*

*minimum*, phénomène que Simon appelle « satisfaction ». Être rationnel, ce ne serait donc pas être optimal, mais être adapté aux diverses sources de contraintes que représentent l'environnement, les limitations cognitives, ainsi que les buts assignés et poursuivis. Ce qui, par ailleurs, mène Gigerenzer et Gaissmaier (2011) à avancer que ce que l'on appelle « intelligence » ne serait rien d'autre que cette capacité à rechercher ou invoquer une stratégie efficace dans un couple *environnement-but* donné. Partant de là, la cognition ne se présente pas comme un super-calculateur général, mais comme une « boîte à outil adaptative » (*adaptive toolbox* Gigerenzer et Selten, 2002), contenant des éléments stratégiques, plus ou moins efficaces en fonction des situations : des heuristiques.

### 1.1.2. La limite des modèles non-parcimonieux

Ces considérations pointent en fait les limites des modèles qui, comme le STOM (Wickens et al., 2015), présenté page 86, sont prédictifs mais peu plausibles, au plan psychologique. Pour rappel, le modèle STOM soutient que l'*attractivité* d'une tâche résulte de l'intégration linéaire et pondérée des divers attributs des tâches, chaque attribut augmentant ou diminuant l'*attractivité* d'une tâche, en fonction de sa polarité (+/-). Si ce modèle est *prédictif* des comportements de permutations de tâches, il est pourtant peu plausible au plan *cognitif*, dans la mesure où il présuppose un opérateur *omniscient*, ayant connaissance de, et utilisant à chaque instant, l'ensemble des informations disponibles. La présente étude suggère, au contraire, une modélisation plus parcimonieuse des processus de priorisation, et la construction de modèles plus simples qui, tout en étant prédictifs, rendraient compte des stratégies *effectivement* utilisées par les opérateurs. De ce point de vue, la présente recherche ne doit pas être perçue comme une tentative d'identifier une fois pour toutes l'heuristique expliquant les comportements de priorisation, mais comme un effort pour mettre en évidence des *traces* de la nature heuristique des évaluations qui soutiennent les comportements exécutifs.

Toutefois, l'usage des heuristiques tel que nous l'avons identifié, a pu être suscité par la nouveauté des tâches. Tous les participants étaient débutants sur les tâches que nous leur avons proposées, et il n'est pas impossible que ce fait ait favorisé l'usage d'heuristiques non-compensatoires. Comme le suggérait Hogarth (1987), le conflit (des polarités) génère toujours un sentiment d'inconfort chez ceux qui doivent le résoudre, et les individus cherchent à éviter les stratégies compensatoires puisque, outre la difficulté de leur mise en œuvre (effort cognitif), celles-ci requièrent la résolution explicite de compromis complexes entre des valeurs hétérogènes sur un plan qualitatif (Payne et al., 1993). Ainsi, faute d'un entraînement plus conséquent, qui aurait pu permettre

aux sujets d'enrichir leur répertoire stratégique (par le biais, par exemple, du paradigme des priorités variables, comme chez [Gopher et al., 1982](#)), il faut se garder de considérer le fonctionnement heuristique non-compensatoire comme *la* solution à tout conflit – mais retenir simplement que, dans les situations nouvelles, pour lesquelles il faut agir rapidement et où il n'existe pas de réponse connue, l'hypothèse d'une évaluation heuristique des priorités est fortement probable.

## 1.2. Vers une définition des règles heuristiques

En même temps qu'ils enrichissent notre compréhension de la logique cognitive soutenant l'évaluation des priorités par les individus, ces apports laissent, en même temps, émerger de nouvelles questions. S'il est vrai que, dans de nombreuses situations, les individus réalisent des choix stratégiques par l'entremise de processus heuristiques, alors il nous reste à identifier plus clairement ces heuristiques. En particulier, définir une heuristique, c'est déterminer une *règle de priorité*, une *règle d'arrêt*, ainsi qu'une *règle de décision* ([Brandstätter et al., 2006](#)).

**Règle de priorité** Dans une situation donnée, est-il possible de déterminer *a priori* l'ordre dans lequel les attributs sont parcourus? Par exemple, est-il possible d'expliquer pourquoi, lors de la deuxième expérimentation, c'est l'attribut de Tolérance à l'erreur qui a été considéré après l'attribut de Récompense, et non l'attribut de Temps? En d'autres termes, quelles sont les propriétés des attributs qui pourraient permettre de comprendre leur hiérarchisation? De ce point de vue, comprendre la priorisation des tâches reviendrait à *comprendre la priorisation des attributs des tâches*, c'est-à-dire leur hiérarchisation en vue de la prise de décision.

**Règle d'arrêt** Au-delà de leur ordonnancement, il nous faut aussi comprendre les raisons qui poussent un individu à arrêter son exploration des attributs. Autrement dit, quelles sont les règles qui confèrent à un attribut la possibilité de soutenir un choix stratégique? Par exemple, lors de la deuxième expérimentation, nous avons vu que l'égalité des récompenses était une condition nécessaire pour que les participants en viennent à considérer un autre attribut. Mais ces observations ne sont pas suffisantes pour déterminer la différence maximale en deçà de laquelle l'attribut sera négligé. Par exemple, des récompenses très proches quoique non égales, auraient-elles poussé les participants à considérer le deuxième attribut? Quel est donc le critère d'arrêt? Quelles sont les jeux de valeurs d'un attribut



qui poussent un individu à le négliger ?

**Règle de décision** Enfin, une fois l'attribut de référence sélectionné, est-il possible de prédire le sens de la décision, à partir de ses valeurs respectives ? La revue de littérature a bien montré la complexité de ces questions. Par exemple, dans un contexte donné, sachant que l'allocation des ressources sera déterminée par l'attribut de Difficulté des tâches, est-il possible de prédire à partir des valeurs de difficulté la tâche qui sera priorisée ? D'un côté, on sait que, toute chose étant égale par ailleurs, les individus tendent à favoriser la tâche la plus facile, en raison d'une tendance à l'évitement de l'effort (Kool et al., 2010). Toutefois, comme nous l'avons montré lors de la première expérimentation, on sait aussi que dans une situation double-tâche, lorsque l'allocation des ressources est dirigée par l'attribut de difficulté, c'est la tâche la plus demandeuse qui se verra attribuer la plus grande quantité de ressources visuelles. Cette question est analogue à celle que posent Wickens et al. (2016), lorsqu'ils tentent d'établir les *polarités* des différents attributs.

Ainsi, la compréhension des processus d'évaluation des priorités ne s'arrête pas à la mise en évidence de leur nature heuristique. Le travail futur devra permettre de préciser plus avant les propriétés de ces heuristiques, et notamment les trois règles que nous venons de décrire.

## 2. La dimension distale de la priorisation : causes et conséquences des manifestations de la priorisation

Dans cette partie, il sera question des causes et des conséquences de la priorisation. Dans un premier temps nous nous attacherons à identifier, à travers l'ensemble de nos expérimentations, les conditions d'apparition de la priorisation. Dans un second temps, nous ferons la synthèse des conséquences des comportements de priorisation, tels que nous les avons observés, sur l'activité et la performance humaines.

### 2.1. Les conditions d'apparition de la priorisation

Tout au long de ce travail, nombreuses ont été les situations dans lesquelles nous avons observé une *absence manifeste de comportements de priorisation*. Au plan opérationnel, celle-ci correspondait à une *absence d'effet de l'importance*

*des sous-tâches sur l'allocation des ressources attentionnelles.* Lors de la première expérimentation, nous avons montré qu'en deçà d'un certain seuil de charge de travail (indexé par la performance globale), les participants ne se reposaient pas, globalement, sur les indices de récompense des sous-tâches pour déterminer l'allocation de leurs ressources visuelles, mais plutôt sur les indices de difficulté. Lors de la deuxième expérimentation, nous avons vu qu'un tiers au moins des participants, n'a montré aucune considération pour les attributs d'importance des sous-tâches, dans la détermination de sa stratégie oculaire – alors même qu'il s'agissait d'une situation de surcharge constante (capacités excédées par les demandes). Enfin, lors de la troisième expérimentation, l'allocation des ressources visuelles des participants des trois groupes était tout à fait indépendante des instructions de priorité que les participants avaient reçues – bien que ces dernières ont eu une influence sur leur performance à la sous-tâche d'apprentissage probabiliste (nous en reparlerons, p.231).

### 2.1.1. La détection du conflit pour les ressources

De ces trois situations, il nous semble possible d'extraire au moins un critère ayant précédé l'apparition de la priorisation : le conflit pour les ressources. À chaque fois que des phénomènes de priorisation se sont manifestés, il apparaissait en même temps que le *coût de performance lié à la concurrence* des deux sous-tâches n'était pas négligeable. Ceci était particulièrement saillant lors de la première expérimentation. À l'inverse, dans les situations qui ne présentaient pas de coût de concurrence, les informations d'importance semblaient n'avoir aucun poids sur l'allocation des ressources visuelles. Ceci était particulièrement visible lors de la troisième expérimentation, ainsi que dans certaines conditions – les moins difficiles – de la première expérimentation. Si cette hypothèse est juste, il nous reste cependant à expliquer *pourquoi*, lors de la deuxième expérimentation, une partie significative des participants n'a pas manifesté de comportements de priorisation, malgré la présence *objective* d'un conflit pour les ressources. Nous pensons que l'explication de ce phénomène réside en un certain nombre de biais expérimentaux, que nous avons déjà évoqués mais que nous résumons ici pour mémoire.

**Une surcharge nominale** Lors de la deuxième expérimentation (concurrence de deux sous-tâches de recherche visuelle de rotation), la surcharge était une constante de la phase test. De ce fait, les participants ont pu considérer l'impossibilité de détecter la totalité des rotations, comme un phénomène normal de la situation, n'appelant pas de régulation particulière.

**Pas de rétroaction dynamique** Les erreurs des participants, en particulier leurs omissions, ne leurs étaient pas signalées *en ligne*, ce qui ne leur permettait pas de *prendre conscience de ces erreurs*.

Ces trois considérations suggèrent qu'il ne suffit pas qu'un conflit *objectif* pour les ressources existe pour susciter des comportements de priorisation. Il faut aussi – semble-t-il – que les individus aient la *possibilité de déceler ce conflit*, par la présence de rétroactions et de situations comparatives (p.ex., difficulté variable). Des études ont par exemple montré que des manifestations du contrôle cognitif pouvaient être médiatisées par le traitement d'*indices contextuels* de la situation indiquant la nécessité du contrôle (Mushtaq et al., 2011), comme des erreurs (Braver, 2012), des changements dans la valeur motivationnelle de l'environnement (sa pertinence relativement au but assigné ; Baddeley, 2007), un conflit entre des réponses concurrentes (Botvinick et al., 2001), ou encore une augmentation de la probabilité de commettre une erreur (Brown et Braver, 2005). Ainsi, lors de la deuxième expérimentation, l'absence manifeste de rétroactions négatives, en venant diminuer la possibilité pour les participants d'évaluer le conflit pour la ressource attentionnelle, a sans doute remis plus de poids sur les variables individuelles (ou « traits » ; voir Braver, 2012), dans le déclenchement des comportements de priorisation. De ce point de vue, ce n'est pas strictement le conflit pour les ressources qui se présente comme un précurseur de la priorisation, mais plutôt *la détection d'un conflit pour les ressources*.

### 2.1.2. Conflit et simultanété

Ces idées sont proches de celles évoquées en introduction de ce manuscrit, et selon lesquelles la priorisation se présente principalement comme une réponse adaptative à la *simultanété* des sollicitations (Kurzban et al., 2013). Toutefois, nous avons pu observer des situations où la simultanété des sollicitations n'était pas synonyme de conflit. Par exemple, lors de la première expérimentation, lorsque les participants devaient traiter *simultanément* deux sous-tâches de 1-Back, ils étaient en mesure, malgré la simultanété des sollicitations pour une même ressource, d'atteindre un niveau de performance optimal aux deux sous-tâches. Dans de telles conditions, les capacités des participants n'étaient pas excédées : il y avait donc simultanété sans conflit, tout comme il n'y avait pas d'influence des attributs d'importance sur l'allocation des ressources. Cette remarque nous permet d'appuyer que *la priorisation ne correspond pas strictement à l'allocation préférentielle des ressources* ; il faut, en outre, que cette *préférence* soit déterminée par un indicateur exogène (attribut) ou endogène (consigne) de l'importance des sous-tâches.

## 2.2. Les conséquences de la priorisation

Sans doute le fait le plus marquant, relatif aux conséquences manifestes de la priorisation, concerne *la possibilité d'influencer par le biais d'indicateurs intrinsèques (consignes) ou extrinsèques (attributs), l'allocation des ressources vers les diverses tâches en présence, et parfois la performance en résultant*. Les deux premières expérimentations ont permis de montrer qu'il est possible d'influencer significativement l'allocation des ressources visuelles par le biais d'attributs des sous-tâches, et par là même d'influencer les niveaux de performance que les participants atteignent. La troisième expérimentation a, quant à elle, permis de mettre en évidence la possibilité d'influencer la performance à une sous-tâche d'apprentissage probabiliste, sans que l'allocation des ressources visuelles ne s'en trouve influencée. De ces deux résultats, nous tenterons de tirer des interprétations quant au *rôle de la priorisation dans l'allocation des ressources et la modulation de la performance*.

### 2.2.1. Des cas de priorisation ouverte (*overt*)

Les deux premières expérimentations se présentaient comme deux exemples du caractère *contrôlable* des ressources attentionnelles (Kahneman et Tversky, 1979; Navon et Gopher, 1979; Wickens, 1991). En effet, à chaque fois nous avons pu observer la possibilité pour les participants de jouer sur la quantité des ressources qu'ils allouaient aux deux sous-tâches, en fonction de leurs attributs. Ces deux expérimentations proposaient des situations *homogènes*, c'est-à-dire, deux sous-tâches identiques. En conséquence, ces dernières sollicitaient systématiquement et simultanément (concurrence) les mêmes ensembles de ressources. De ce fait, à condition égale (p.ex., 1-Back contre 2-Back), seul le caractère *contrôlable* des ressources pouvait expliquer les variations de performance, conséquentes à l'allocation préférentielle des ressources visuelles (Navon et Gopher, 1979). Dès lors qu'il y avait conflit *patent* pour les ressources (voir ci-dessus), ces phénomènes de contrôlabilité étaient redoublés d'une dimension *stratégique*. À chaque fois, et toute chose étant égale par ailleurs (notamment les niveaux de difficulté respectifs des deux sous-tâches), seuls des choix stratégiques d'allocation des ressources permettaient d'expliquer les variations de performance observées.

Ces phénomènes ne sont pas nouveaux. La littérature sur les ressources multiples avait depuis longtemps identifié la dimension stratégique de la performance multitâche, et avait employé des motivations extrinsèques (performance assignée ou récompense) afin de mieux contrôler cette dimension, et comprendre plus précisément la structure des ressources soutenant la performance en situation double-tâche (Woodhead, 1966; Gopher

et al., 1982; Sperling et Melchner, 1978). En d'autres termes, il s'agissait de neutraliser le « bruit » (Woodhead, 1966) introduit par les stratégies inter-individuelles, dans la compréhension fondamentale des ressources multiples. Si, de ce point de vue, nos manipulations peuvent paraître analogues à celles-ci, il ne faut pas perdre de vue que, dans la mesure où notre but principal consistait à saisir les processus cognitifs d'évaluation des priorités, nous n'avons pas, pour notre part, cherché à *neutraliser* les processus stratégiques, mais au contraire – par l'entremise de *plusieurs attributs* – à observer *leurs variations* pour mieux en saisir la nature.

Là où les études sus-citées assignaient, en général, des niveaux de performance à atteindre, nous n'avons pas voulu imposer aux participants d'objectifs en termes de quantités de ressources à investir dans telle ou telle sous-tâche, mais plutôt un objectif général de performance (réaliser le score le plus élevé) à mettre en relation avec des propriétés des sous-tâches, *que nous avons explicités* : des attributs (ce point a été discuté plus longuement p.77). Ce choix nous a permis de mettre en évidence – outre la dimension *contrôlable* des ressources mises en jeu – la capacité des individus à construire *par eux-mêmes*, des stratégies d'allocation des ressources, liées aux caractéristiques des sous-tâches que nous leur proposons. Enfin, nous avons démontré l'existence de ce phénomène pour deux types de tâches. Toutes deux sollicitaient principalement la *ressource perceptivo-cognitive* (Wickens, 2002) et, dans le cas du N-Back, la composante verbale de la *mémoire de travail*, deux entités du système cognitif dont les limitations et les relations fonctionnelles ont été largement documentées (Baddeley, 2012; Kane et al., 2007; Miller et Cohen, 2001).

### 2.2.2. Un cas de priorisation couverte (*covert*)

L'autre fait marquant concernant le caractère multiple des ressources mises en jeu dans les environnements multitâches, nous vient de l'observation selon laquelle *des consignes de priorité peuvent moduler la performance à une sous-tâche d'apprentissage probabiliste, sans peser sur l'allocation générale des ressources visuelles*.

Ce fait suggère d'abord que *la priorisation n'est pas qu'une question d'allocation des ressources perceptives (ici visuelles), mais pourrait aussi concerner des processus plus centraux*, notamment les processus d'encodage en mémoire à long-terme. À ce point, la notion de *priorisation* se détache conceptuellement de la notion d'*attractivité* développée par Wickens et al. (2016). En effet, cette dernière concerne principalement la prédiction de *l'allocation des ressources perceptives visuelles*, sans égard pour *l'allocation couverte* d'autres types de ressources. Si, dans le cas du N-Back, il y avait une conjonction totale entre la ressource

perceptive visuelle et la ressource cognitive<sup>2</sup>, ce n'était pas le cas lors de la troisième expérimentation, qui a suggéré la possibilité d'une modulation de la performance par des consignes de priorité, non-assortie d'une influence sur l'allocation des ressources perceptives-visuelles.

En effet, cette expérimentation a permis de mettre en évidence la possibilité d'influer, par le biais d'instructions de priorité, sur la qualité d'un apprentissage probabiliste, indépendamment de l'allocation des ressources. Compte tenu des résultats de rappel obtenus aux questionnaires, nous avons avancé que les consignes de priorisation étaient principalement venues peser sur les processus d'apprentissage explicite des contingences indice-résultat. En outre, il s'agissait d'une situation de *perfect-time-sharing*, lors de laquelle la *concurrence* des deux sous-tâches (de surveillance et d'apprentissage probabiliste visuels) ne comportait pas de coût en elle-même. En d'autres termes, la capacité des ressources visuelles y était suffisante pour autoriser le traitement concurrent des deux sous-tâches (Navon et Gopher, 1979). Nous avons donc postulé que, dans une telle situation, les consignes de priorité, en se présentant aux participants comme des buts spécifiques à atteindre, étaient venues moduler l'efficacité des processus d'encodage de l'information, qu'on sait sous influence partielle de la motivation et des buts (Adcock et al., 2006; Callan et Schweighofer, 2008; Miendlarzewska et al., 2016). Dans ce cadre, nous avons montré la pertinence de la métaphore computationnelle ACT-R, pour comprendre cette dissociation potentielle entre phénomènes attentionnels ouverts et processus d'apprentissage.

### 2.2.3. La priorisation était-elle rationnelle ?

Comme nous venons de le montrer, les comportements de priorisation se traduisaient, principalement, par un contrôle des participants, sur l'allocation de leurs ressources aux différentes sous-tâches disponibles. En outre, *ces modulations avaient des conséquences sur les niveaux de performance* atteints par les participants. À ce point, il faut rester prudent. En effet, comme nous l'avons montré, la relation entre priorisation et performance dépendait fortement du niveau – *global* ou *local* – de l'analyse. Pour rappel, sur un plan global, nous étions intéressés par la relation entre la magnitude de priorisation, c.-à-d. la tendance moyenne d'un participant à faire une différence entre deux sous-tâches, et sa capacité à atteindre le but que nous lui avons assigné. Au plan local, il nous importait de vérifier la mesure dans laquelle une augmentation de la quantité de ressources allouée à une sous-tâche se traduisait ou non, par une augmentation de sa performance à cette sous-tâche.

---

2. Nous laissons de côté le cas de deux 0-Back concurrents, traités généralement sur un mode périphérique, dans la mesure où ils ne sollicitaient pas réellement la mémoire de travail.

Selon les expérimentations, les critères de rationalité n'étaient pas les mêmes. Alors que, dans les deux premières expérimentations, ce critère pouvait se voir ramené au score, dans la troisième expérimentation, il était confondu avec la performance (taux de détection ou taux de réponses optimales selon la sous-tâche).

### **La priorisation favorisait la rationalité locale**

Au plan local, nous avons observé des motifs priorisation-performance consistants, à travers les différentes expérimentations. Dès lors qu'une sous-tâche donnée excédait, de par sa difficulté, les capacités de traitement des participants, alors la quantité de ressources qui lui était allouée devenait déterminante de la performance qu'elle élicitait. Par exemple, lors de la première expérimentation, alors qu'à une sous-tâche de 0-Back, il n'y avait pas de corrélation entre la quantité de ressources visuelles allouée et le sous-score obtenu, cette corrélation devenait plus intense et significative à mesure que le niveau de difficulté augmentait (1-Back < 2-Back). De même lors de la deuxième expérimentation, malgré une forte variabilité inter-individuelle dans l'allocation des ressources, nous avons observé une corrélation *intra-individuelle* entre temps passé et sous-score obtenu. Enfin, nous n'avons pas observé de tels effets lors de la troisième expérimentation dans la mesure où, comme nous l'avons montré, les ressources visuelles n'y étaient pas l'objet d'une priorisation. De plus, les coûts de concurrence y étaient négligeables, si bien que nous avons conclu plus haut que les capacités visuelles y étaient suffisantes pour soutenir le traitement satisfaisant des deux sous-tâches.

Ainsi, il est possible de parler d'une rationalité *locale* de la priorisation, dans la mesure où, chaque fois qu'ils se priorisaient, les participants tendaient à *favoriser l'atteinte du but, pour la sous-tâche qui faisait l'objet de leur décision*. Toutefois, comme nous allons le voir maintenant, cette amélioration de la rationalité locale ne s'accompagnait pas nécessairement d'une amélioration de la rationalité globale.

### **Aucune preuve d'une rationalité globale de la priorisation**

La priorisation est-elle un vecteur de rationalité globale? Autrement dit, la tendance à se prioriser engendre-t-elle, à condition égale, de meilleurs résultats que la tendance à attribuer des quantités équivalentes de ressources aux deux sous-tâches? Globalement, l'ensemble des résultats obtenus soutiennent l'idée que *la rationalité globale des participants n'était pas significativement liée à leur tendance à se prioriser*. À travers les trois expérimentations, *il n'y avait pas une seule condition expérimentale*, au cours de laquelle les participants qui



marquaient plus de différences entre les deux sous-tâches atteignaient des niveaux de score (expérimentations 1 et 2) ou de performance (expérimentation 3), plus élevé que les autres participants.

Tous les éléments que nous venons de développer lors de cette discussion seront mis en perspective lors de la conclusion. En particulier, nous chercherons à montrer que tous les résultats que nous avons obtenu soutiennent l'idée que la priorisation se présente comme un processus directeur du contrôle exécutif.

## Bibliographie du chapitre

- Adcock, R. A., Thangavel, A., Whitfield-Gabrieli, S., Knutson, B., et Gabrieli, J. D. (2006). Reward-motivated learning : mesolimbic activation precedes memory formation. *Neuron*, 50(3) :507–517.
- Baddeley, A. (2007). *Working memory, thought, and action*, volume 45. OUP Oxford.
- Baddeley, A. (2012). Working memory : Theories, models, and controversies. *Annual Review Of Psychology*, 63 :1–29.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., et Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological review*, 108(3) :624.
- Brandstätter, E., Gigerenzer, G., et Hertwig, R. (2006). The priority heuristic : making choices without trade-offs. *Psychological Review*, 113(2) :409.
- Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control : a dual mechanisms framework. *Trends in cognitive sciences*, 16(2) :106–113.
- Brown, J. W. et Braver, T. S. (2005). Learned predictions of error likelihood in the anterior cingulate cortex. *Science*, 307(5712) :1118–1121.
- Bugg, J. M. et Crump, M. J. (2012). In support of a distinction between voluntary and stimulus-driven control : a review of the literature on proportion congruent effects. *Frontiers in psychology*, 3.
- Callan, D. E. et Schweighofer, N. (2008). Positive and negative modulation of word learning by reward anticipation. *Human brain mapping*, 29(2) :237–249.
- Gigerenzer, G. et Gaissmaier, W. (2011). Heuristic decision making. *Annual Review of Psychology*, 62 :451–482.
- Gigerenzer, G. et Selten, R. (2002). *Bounded rationality : The adaptive toolbox*. MIT press.
- Gopher, D., Brickner, M., et Navon, D. (1982). Different difficulty manipulations interact differently with task emphasis : evidence for multiple resources. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 8(1) :146.



- Hogarth, R. M. (1987). *Judgement and choice : The psychology of decision*. Number i9780471914792. John Wiley & Sons.
- Hull, C. (1943). Principles of behavior.
- Kahneman, D. et Tversky, A. (1979). Prospect theory : An analysis of decision under risk. *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, pages 263–291.
- Kane, M. J., Conway, A. R., Hambrick, D. Z., et Engle, R. W. (2007). Variation in working memory capacity as variation in executive attention and control. *Variation in working memory*, pages 21–48.
- Kool, W., McGuire, J. T., Rosen, Z. B., et Botvinick, M. M. (2010). Decision making and the avoidance of cognitive demand. *Journal of Experimental Psychology : General*, 139(4) :665.
- Kurzban, R., Duckworth, A., Kable, J. W., et Myers, J. (2013). An opportunity cost model of subjective effort and task performance. *The Behavioral and Brain Sciences*, 36(6) :661–679.
- Miendlarzewska, E. A., Bavelier, D., et Schwartz, S. (2016). Influence of reward motivation on human declarative memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 61 :156–176.
- Miller, E. K. et Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual review of neuroscience*, 24(1) :167–202.
- Mushtaq, F., Bland, A. R., et Schaefer, A. (2011). Uncertainty and cognitive control. *Frontiers in psychology*, 2.
- Navon, D. et Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3) :214.
- Payne, J. W., Bettman, J. R., et Johnson, E. J. (1993). *The adaptive decision maker*. Cambridge University Press.
- Shah, A. K. et Oppenheimer, D. M. (2008). Heuristics made easy : an effort-reduction framework. *Psychological bulletin*, 134(2) :207.
- Simon, H. A. (1956). Rational choice and the structure of the environment. *Psychological review*, 63(2) :129.
- Simon, H. A. (1990). Invariants of human behavior. *Annual review of psychology*, 41(1) :1–20.
- Smith, V. L. et Walker, J. M. (1993). Monetary rewards and decision cost in experimental economics. *Economic Inquiry*, 31(2) :245–261.
- Sperling, G. et Melchner, M. J. (1978). The attention operating characteristic : Examples from visual search. *Science*, 202(4365) :315–318.

- Wickens, C. D. (1991). Processing resources and attention. *Multiple-task performance*, 1991 :3–34.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2) :159–177.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., et Santamaria, A. (2015). Discrete task switching in overload : A meta-analyses and a model. *International Journal of Human-Computer Studies*, 79 :79–84.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., Vieane, A., Clegg, B. A., Sebok, A., et Janes, J. (2016). Time sharing between robotics and process control validating a model of attention switching. *Human Factors*, 58(2) :322–343.
- Woodhead, M. M. (1966). An effect of noise on the distribution of attention. *Journal of Applied Psychology*, 50(4) :296.

## CHAPITRE 11

# Conclusion

<b>1</b>	<b>Formulaire de consentement éclairé</b>	290
<b>2</b>	<b>Consignes de la double-tâche de N-BACK</b>	291
2.1	Entraînement à la tâche de N-BACK	291
2.2	Tâche de double N-BACK avec récompenses	293
<b>3</b>	<b>Consignes de la double-tâche de surveillance</b>	296
3.1	Phase de familiarisation	296
3.2	Phase d'augmentation de la demande	297
3.3	Phase de familiarisation aux attributs	297
3.4	Phase de test	298
<b>4</b>	<b>Consignes de la double-tâche surveillance et apprentissage probabiliste</b>	300
4.1	Phase d'entraînement à la tâche de surveillance du PFD	300
4.2	Phase d'entraînement à la tâche de prédiction d'une panne	301
4.3	Phase d'entraînement à la double-tâche	302
4.4	Phase d'évaluation : double-tâche	302
4.5	Questionnaire d'évaluation des stratégies individuelles	303

## 1. Un processus *d'orientation* du contrôle exécutif

L'objectif général de cette thèse consistait à *identifier plus avant les processus cognitifs soutenant les comportements humains de priorisation*, en environnement multitâche. Les trois expérimentations que nous avons menées ont toutes permis d'apporter des contributions significatives à la compréhension de ce phénomène.

Sur un plan proximal, nous avons montré que, dans des situations de double-tâche, *l'évaluation dynamique des priorités suivait une logique heuristique non-compensatoire* (Brandstätter et al., 2006; Payne et al., 1993), selon laquelle

les priorités cognitives des sous-tâches n'étaient jamais la conséquence d'un compromis linéaire entre l'ensemble de leurs attributs, mais plutôt la conséquence de leur ordonnancement et utilisation sélective. Sur un plan distal, nos résultats ont suggéré que l'utilisation de ces contenus proximaux pour orienter l'allocation des ressources était *médiatisée par la détection d'un conflit pour les ressources*, et non simplement par la simultanéité des sollicitations. Nous avons montré en outre, qu'une réorientation préférentielle des ressources vers une sous-tâche spécifique, n'avait pas d'influence sur la rationalité globale du comportement des participants, mais plutôt sur leur rationalité locale : les sous-tâches favorisées élicitant des niveaux de performance plus élevés et ceci, d'autant plus que leur demande excédait les capacités des participants. Enfin, nous avons montré que la priorisation pouvait aussi influencer l'efficacité de processus *couverts*, comme l'encodage en mémoire à long-terme, sans pour autant se traduire par une réorientation des ressources attentionnelles ouvertes.

L'ensemble de ces considérations suggèrent une forte intrication des processus de priorisation au contrôle exécutif. En effet, ce que nous avons mis en évidence au cours de ce travail, ce n'est pas simplement la capacité des individus à contrôler les ressources de traitement dont ils disposent (p.ex., Kahneman, 1973; Navon et Gopher, 1979), mais leur capacité à *orienter* ce contrôle, par la prise en compte d'informations intrinsèques (consignes, buts) ou extrinsèques (attributs) des sous-tâches pour soutenir l'évaluation de leurs priorités. Cette proposition rejoint une idée, récemment avancée par divers auteurs (Arrington et Logan, 2005; Hazy et al., 2007; Monsell et Driver, 2000), selon laquelle le contrôle n'est pas une activité dirigée par une forme d'*homoncule*, qui sait à *quel moment* et *comment* contrôler, mais par un ensemble de processus d'évaluation (Coutlee et Huettel, 2012). De nombreuses études ont par exemple, cherché à mettre au jour les processus cognitifs médiateurs de *l'implication du contrôle cognitif*, comme la surveillance des conflits (pour les ressources; Botvinick et al., 2001), la surveillance de la performance (Ridderinkhof et al., 2004) ou encore l'évaluation de l'utilité espérée du contrôle (Shenhav et al., 2013). Si ces processus pourraient expliquer le « *quand* » du contrôle exécutif, nous avançons ici que la priorisation pourrait expliquer son « *comment* ». Autrement dit, pour expliquer la dynamique du contrôle exécutif, il faut en identifier les processus *déclencheurs*, qui signalent au système cognitif un besoin de contrôle; mais il y faut aussi des processus d'*orientation*, qui lui permettent d'identifier les tâches qui doivent *prioritairement* faire l'objet d'une allocation accrue de ressources ou de contrôle. Nos résultats nous amènent à avancer, finalement, que la priorisation pourrait bien être ce processus d'orientation.

Dans la partie suivante, nous tenterons de tirer les conclusions de ce travail, en termes d'implications pratiques, pour l'étude et l'amélioration de l'activité humaine en situation complexe. Une dernière partie devra permettre de faire le point sur les perspectives de recherche possibles après ce travail.

## 2. Implications pratiques

Les résultats que nous avons présentés, ainsi que les interprétations que nous en avons tirées, mettent clairement en évidence le rôle fondamental des processus de priorisation, dans la gestion stratégique des ressources, lorsque ces dernières font l'objet d'un conflit. Toutefois, les résultats que nous avons présentés ne doivent pas laisser penser que la priorisation ne souffre d'aucune erreur en situation réelle, et que les logiques d'ordonnement que nous avons mises en évidence sont tout à fait conformes aux comportements des opérateurs en situation complexe. Malgré leur apparente complexité, les situations contrôlées que nous avons étudiées étaient de loin, des versions simplifiées de certaines opérations élémentaires (mémoire de travail, surveillance visuelle, diagnostic sous incertitude), que les opérateurs doivent mener en situation réelle. En outre, l'accidentologie aérienne que nous avons présentée en introduction de ce travail a montré nombre d'exemples où des règles élémentaires de priorisation n'ont pas été respectées, ou n'ont pas pu l'être. Il reste donc un travail conséquent à fournir pour combler cet écart, et amener une compréhension plus fine, de la dynamique de ces processus, en situation réelle (voir chapitre suivant, p.242).

Toutefois, compte tenu le caractère fondamental de notre investigation, il n'est pas impossible de livrer des pistes de réflexion. Si d'une part, il est vrai que les processus de priorisation tiennent un rôle premier dans l'orientation des ressources en situation conflictuelle, et si d'autre part, il est vrai qu'une exigence toujours plus forte pèse sur ces types de processus dans les situations complexes en aéronautique, alors il apparaît crucial de faire des propositions qui devront permettre de favoriser une *bonne* priorisation, jusque dans les moments les plus critiques (situations dégradées) de l'activité.

À cette fin, notre recherche suggère plusieurs pistes de réflexion. En effet, comme nous l'avons montré, une erreur de priorisation comporte théoriquement deux précurseurs potentiels. D'une part, il est possible que son contenu proximal fasse défaut et qu'autrement dit, la représentation cognitive des priorités ne soit pas en concordance avec la réalité et les besoins objectifs de l'activité. Mais il est possible aussi que l'erreur émerge d'un problème distal et, pour ainsi dire, qu'une représentation pertinente existe, mais ne soit tout simplement pas employée, par exemple en raison d'une mauvaise visibilité

quant au besoin de contrôle, pour telle ou telle sous-tâche.

Dans l'exemple bien connu du vol L-1011 (voir p.62 [L10111973, 1973](#)), il est fort probable que les pilotes n'aient pas connu de problème proximal de priorisation (ils avaient sans doute une conscience aiguë des priorités respectives de chaque tâche), mais plutôt un problème distal, puisqu'en raison d'un changement de mode, à la fois silencieux *et* opéré par inadvertance, comment auraient-ils pu ré-évaluer à ce moment un besoin général de contrôle sur le comportement vertical de leur appareil? Bien évidemment, il s'agit de spéculation, mais qui doit mettre en évidence la pertinence de la distinction proximal/distal, dans l'analyse des erreurs de gestion des tâches ([Funk, 1991](#)).

Outre cet apport typologique, la distinction proximal/distal indique aussi les deux niveaux sur lesquels il est possible de « travailler ».

## 2.1. Enrichir la représentation des tâches

Au plan proximal, des efforts pourraient être entrepris au niveau de la formation des opérateurs. Une attention toute particulière devrait être accordée à ce que leur soient fournies, de façon plus appuyée, des informations sur les divers rôles, fonctions et importances des sous-tâches. De sorte que, possédant une représentation plus riche des différentes sous-tâches, ceux-ci soient plus en mesure de modifier leur stratégie, lorsque les demandes de l'environnement ne sont plus des indicateurs pertinents de la priorité des tâches comme, par exemple, en situation de surcharge. De même, il faudrait réfléchir à entreprendre une sensibilisation accrue aux phénomènes de priorisation, et de leur importance dans la bonne gestion des ressources de traitement. Toutefois, comme nous l'avons évoqué, ces deux composantes sont déjà des parties importantes de la formation des pilotes et – pour donner un exemple – la hiérarchie qui consiste à voler d'abord, naviguer ensuite et communiquer enfin, est une règle d'or dont l'apprentissage est exigé très tôt de la part des pilotes ([Flight Safety Foundation, 2009a](#)).

Une autre possibilité consisterait donc à *soutenir la dimension proximale de la priorisation de façon exogène*, en supplémentant l'information disponible par des indicateurs de l'importance des sous-tâches. Ceci pourrait s'avérer particulièrement pertinent pour les sous-tâches *dont le besoin de contrôle n'est pas corrélé à leur demande*, comme les automatismes. Cela est évidemment problématique, dans la mesure où cela reviendrait à régler un symptôme de la surcharge informationnelle par un ajout d'information. D'un autre côté, *l'externalisation partielle de l'activité de priorisation* pourrait permettre de faire baisser la charge mentale des opérateurs, relative au maintien d'une bonne représentation des priorités, en la reléguant dans l'espace visuel. Il ne faut donc pas évacuer *a priori* une telle solution, sans l'avoir complètement étudiée,

ni testée.

## 2.2. Aider au maintien d'une priorisation rationnelle

Nombreuses sont les études qui ont montré qu'en situation dégradée, le maintien d'une performance optimale était relié au maintien d'un comportement exécutif stable, non-erratique (van de Merwe et al., 2012), et fidèle à des règles de priorisation simples et connues, telle que la règle ANCS ou la prise en compte de la sévérité perçue (Schutte et Trujillo, 1996). Dans bien des cas il apparaît que les erreurs de priorisation émergent d'un détachement des contenus proximaux de priorisation, laissant place à des comportements exécutifs erratiques ou surdéterminés par la demande d'une tâche particulière (p.ex., tunnélisation attentionnelle, Régis et al., 2014), que nous pouvons maintenant classer dans les problèmes distaux de priorisation. À ce niveau, plusieurs pistes ont déjà été proposées au sein de notre laboratoire. Dans une thèse publiée en 2016, Peysakhovich appuyait l'idée que soient progressivement introduites des technologies oculométriques pour la surveillance *en ligne* des comportements visuels des opérateurs – afin de pouvoir, à long terme, être en mesure de les informer de façon dynamique, sur la pertinence de leur politique d'allocation des ressources (ouvertes). Par exemple, une telle innovation pourrait soutenir le retrait dynamique d'une information, en cas de focalisation excessive et non-pertinente de la part d'un opérateur (Dehais et al., 2011; Dubois et al., 2016), ou bien, à l'opposé, la présentation d'une information *prioritaire* dans son champ visuel focal.

Outre ces propositions, qui pourraient permettre d'améliorer l'adaptabilité de l'interface, ainsi que la communication opérateur-système, d'autres propositions, centrées sur les opérateurs, peuvent être faites. Il serait particulièrement pertinent d'explorer plus avant la possibilité d'améliorer l'efficacité des comportements oculaires des opérateurs par des techniques d'entraînement spécifiques. Dans une étude de 1989, Shapiro et Raymond ont par exemple montré qu'un groupe de participants, ayant reçu un entraînement spécifique qui les poussait à minimiser le nombre de mouvements oculaires, réalisait ultérieurement de meilleures performances à un jeu vidéo, et que cette amélioration de la performance s'accompagnait d'une diminution du nombre de fixations oculaires. De la même façon, serait-il possible de soutenir par le biais d'un entraînement spécifique, la stabilité des comportements de balayage visuel des pilotes, dont on a vu (section 4.3) qu'elle était un facteur important du maintien d'un bon comportement de priorisation, en situations dégradées.

### 3. Perspectives de recherche

Enfin, la présente recherche a fait émerger un certain nombre de problèmes fondamentaux qui demandent un travail plus approfondi. Dans cette dernière partie, nous passerons donc en revue, un ensemble de questions qui, toutes, devraient faire l'objet de recherches futures, dans la perspective de mieux comprendre les phénomènes dont nous avons commencé l'étude.

#### 3.1. Évaluer systématiquement les dimensions proximales et distales de la priorisation

La distinction que nous avons établie, entre les dimensions proximale et distale de la priorisation, adresse une question fondamentale aux résultats que nous avons avancés. Par exemple, lors de la deuxième expérimentation, nous avons montré qu'une part substantielle des participants n'a pas manifesté de *comportement de priorisation*. Dans une telle situation, il nous est, en l'état actuel des choses, impossible d'avancer avec certitude la dimension (proximale ou distale) qui pourrait expliquer un tel résultat. Cette limite suggère qu'à l'avenir, un soin particulier soit apporté à la définition opérationnelle des dimensions proximale et distale de la priorisation. Par exemple, on pourrait imaginer compléter systématiquement toute analyse sur l'allocation des ressources et la performance des individus, par des questionnaires subjectifs d'évaluation *a priori* et *a posteriori* des priorités des sous-tâches en présence. Ceci pourrait permettre :

- de mettre en regard les contenus proximaux et distaux de la priorisation, pour en vérifier la concordance ;
- d'évaluer l'effet spécifique d'un programme d'entraînement particulier – voire de toute situation expérimentale, en y distinguant les effets élicités sur les dimensions proximale et/ou distale de la priorisation.

#### 3.2. Étudier la priorisation en situations dégradées

Si lors de nos trois expérimentations, nous avons effectivement reproduit des sollicitations élémentaires de toute activité complexe (surveillance visuelle, diagnostic sous incertitude, mémoire de travail, partage des ressources), les situations que nous avons proposées sont loin d'être *identiques* aux situations opérationnelles vécues par les pilotes. Ainsi, l'une des perspectives de recherche les plus importantes consistera à évaluer les phénomènes de priorisation dans des situations qui devront s'approcher progressivement des situations réelles. En particulier, une attention particulière devrait être accordée



à l'étude de la priorisation en situation dégradée, puisque c'est dans ces situations critiques que ces processus deviennent critiques à leur tour. Par exemple, il serait pertinent de reproduire certaines de nos expérimentations, en y induisant divers facteurs de dégradation, comme du stress ou de la fatigue, et d'évaluer – par comparaison à un groupe contrôle – la rationalité des stratégies de priorisation.

### **3.3. Se réconcilier avec une approche normative de la priorisation**

Notre étude se voulait volontairement descriptive. Nous ne souhaitons pas, au départ, évaluer le caractère rationnel des stratégies de priorisation; nous souhaitons plutôt exercer diverses influences sur ces processus pour mettre en évidence leur logique. Toutefois, l'applicabilité de ces recherches ne peut faire l'impasse sur le caractère rationnel de ces comportements. Car, à quoi bon vouloir peser sur ces processus si nous ne savons pas précisément où ils aboutissent d'un point de vue rationnel? Si nous n'avons pas totalement négligé cet aspect de la priorisation lors de nos travaux, les interprétations que nous en avons tirées demeurent partielles. Nous avons par exemple montré que, dans certaines situations, les participants qui se priorisaient le plus n'étaient ni plus ni moins rationnels que les autres. Un effort devrait donc être entrepris pour tenter de caractériser plus finement les conditions de rationalité de la priorisation. La question sera la suivante : existe-t-il des conditions dans lesquelles un comportement normé (c.-à-d. fidèle à des indicateurs objectifs) de priorisation engendre de meilleures performances globales des opérateurs, voire du système homme-machine? Par ailleurs, cette question générale de recherche pourrait être liée à la précédente, dans la mesure où, dans les deux cas, il est question d'évaluer les conditions (nominales, dégradés ou autres) qui peuvent venir peser sur la rationalité de la priorisation.

### **3.4. Approfondir l'étude des relations entre la priorisation et le contrôle exécutif**

À travers nos trois expérimentations, nous avons principalement étudié la priorisation par le biais des phénomènes attentionnels ouverts. Nous avons à ce sujet, postulé une intrication fondamentale entre la priorisation et le contrôle exécutif. Pour confirmer cette hypothèse, il faudrait entreprendre une série de travaux, visant à montrer *l'influence de la priorisation sur l'ensemble des processus du contrôle exécutif*. Il serait par exemple intéressant, outre le contrôle de l'allocation des ressources, d'évaluer la possibilité pour la priorisation de

peser sur l'efficacité d'autres mécanismes élémentaires du contrôle, tels que la détection des erreurs, l'inhibition, les performances en mémoire de travail etc.

Seule une telle série de travaux pourrait permettre de confirmer, d'infirmier ou de préciser la nature des relations entretenues entre la priorisation et le contrôle exécutif, et si l'une se présente bien comme un processus d'orientation de l'autre.

### 3.5. Approfondir l'étude des relations entre priorisation et détection du conflit, par l'utilisation de mesures neurophysiologiques

Nos conclusions nous ont mené à établir une relation fonctionnelle entre les processus d'*implication* du contrôle (p.ex., la détection du conflit pour les ressources, [Botvinick et al., 2001](#)), et la priorisation comme processus d'*orientation*. En outre, nous avons avancé que la manifestation ouverte de la priorisation était *médiatisée* par la *détection d'un conflit pour les ressources*, du côté de l'opérateur. Pour appuyer plus fortement cette interprétation, il conviendrait d'approfondir un peu plus l'étude des relations entre détection du conflit et priorisation. Pour ce faire, nous pourrions privilégier l'usage d'une méthode neurophysiologique. En effet, l'activité cognitive de détection du conflit est largement supportée par une aire cérébrale spécifique : le *cortex cingulaire antérieur* (ACC), qui tend à montrer une sur-activation en présence d'un conflit ([Botvinick et al., 2001](#)).

Il est possible de mettre en évidence ce phénomène par la méthode dite des potentiels évoqués<sup>1</sup> par laquelle il est possible de faire ressortir des réactions cérébrales caractéristiques, consécutives au traitement d'un conflit, notamment par l'étude de composantes spécifiques du signal électrique, connues pour refléter l'activation de l'ACC (p.ex., la N2, voir [Folstein et Van Petten, 2008](#); [Ullsperger et Von Cramon, 2001](#)). Il est aussi possible de compléter ce type d'approches par des techniques de localisation de sources, par lesquelles il est possible de faire ressortir les aires cérébrales qui sont responsables des modulations du signal électrique mesuré au niveau du scalp (p.ex., avec la méthode Loreta, [Pascual-Marqui et al., 2002](#), voir [Scannella et al., 2016](#), pour un exemple récent d'utilisation dans notre laboratoire).

---

1. La méthode des potentiels évoqués (ou ERP, pour *event-related potentials*), consiste à mesurer, de façon répétée, la réaction électrique spécifique du cerveau, corrélative à une stimulation particulière (élicitant par exemple un conflit pour les ressources) et, par la technique du moyennage, d'éliminer le *bruit*, c'est-à-dire l'ensemble des composantes du signal indépendantes de la stimulation, pour finalement faire ressortir le motif électrique qui lui est spécifiquement relié.

Avec ces deux techniques, il serait intéressant de répliquer les expérimentations où nous avons mis en évidence une relation entre les phénomènes de priorisation et la détection du conflit pour les ressources, notamment la première expérimentation. Mettrions-nous alors en évidence des traces d'une suractivation spécifique de l'ACC, dans les conditions les plus difficiles, où nous avons observé des phénomènes de priorisation ? Si tel était le cas, cela viendrait renforcer notre interprétation de la priorisation, comme processus d'*orientation* du contrôle exécutif, dépendante de ses composantes de *déclenchement*.

## Bibliographie du chapitre

- Arrington, C. M. et Logan, G. D. (2005). Voluntary task switching : chasing the elusive homunculus. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 31(4) :683.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., et Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological review*, 108(3) :624.
- Brandstätter, E., Gigerenzer, G., et Hertwig, R. (2006). The priority heuristic : making choices without trade-offs. *Psychological Review*, 113(2) :409.
- Coutlee, C. G. et Huettel, S. A. (2012). The functional neuroanatomy of decision making : Prefrontal control of thought and action. *Brain Research*, 1428 :3–12.
- Dehais, F., Causse, M., et Tremblay, S. (2011). Mitigation of conflicts with automation use of cognitive countermeasures. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53(5) :448–460.
- Flight Safety Foundation (2009). Approach and landing accident reduction – golden rules. Briefing note 1.3, Flight Safety Foundation, 601 Madison Street, Suite 300, Alexandria, VA 22314-1756 USA.
- Folstein, J. R. et Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the n2 component of the erp : a review. *Psychophysiology*, 45(1) :152–170.
- Funk, K. (1991). Cockpit task management : Preliminary definitions, normative theory, error taxonomy, and design recommendations.
- Hazy, T. E., Frank, M. J., et O'Reilly, R. C. (2007). Towards an executive without a homunculus : computational models of the prefrontal cortex/basal ganglia system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 362(1485) :1601–1613.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall series in experimental psychology. Prentice-Hall.

- L10111973 (1973). Aircraft accident report, eastern air lines inc., l-1011, n310ea. Technical Report NTSB-AAR-73-14, National Transportation Safety Board, Bureau of Aviation Safety.
- Monsell, S. et Driver, J. (2000). Banishing the control homunculus. *Control of cognitive processes : Attention and performance XVIII*, pages 3–32.
- Navon, D. et Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3) :214.
- Pascual-Marqui, R. D., Esslen, M., Kochi, K., Lehmann, D., et al. (2002). Functional imaging with low-resolution brain electromagnetic tomography (loreta) : a review. *Methods and findings in experimental and clinical pharmacology*, 24(Suppl C) :91–95.
- Payne, J. W., Bettman, J. R., et Johnson, E. J. (1993). *The adaptive decision maker*. Cambridge University Press.
- Peysakhovich, V. (2016). *Study of pupil diameter and eye movements to enhance flight safety*. PhD thesis, Université Toulouse 3 Paul Sabatier.
- Régis, N., Dehais, F., Rachelson, E., Thooris, C., Pizziol, S., Causse, M., et Tessier, C. (2014). Formal detection of attentional tunneling in human operator–automation interactions. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 44(3) :326–336.
- Ridderinkhof, K. R., Van Den Wildenberg, W. P., Segalowitz, S. J., et Carter, C. S. (2004). Neurocognitive mechanisms of cognitive control : the role of prefrontal cortex in action selection, response inhibition, performance monitoring, and reward-based learning. *Brain and cognition*, 56(2) :129–140.
- Scannella, S., Pariente, J., De Boissezon, X., Castel-Lacanal, E., Chauveau, N., Causse, M., Dehais, F., et Pastor, J. (2016). N270 sensitivity to conflict strength and working memory : A combined erp and sloreta study. *Behavioural brain research*, 297 :231–240.
- Schutte, P. C. et Trujillo, A. C. (1996). Flight crew task management in non-normal situations. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, volume 40, pages 244–248.
- Shenhav, A., Botvinick, M. M., et Cohen, J. D. (2013). The expected value of control : an integrative theory of anterior cingulate cortex function. *Neuron*, 79(2) :217–240.
- Ullsperger, M. et Von Cramon, D. Y. (2001). Subprocesses of performance monitoring : a dissociation of error processing and response competition revealed by event-related fmri and erps. *Neuroimage*, 14(6) :1387–1401.
- van de Merwe, K., van Dijk, H., et Zon, R. (2012). Eye movements as an indicator of situation awareness in a flight simulator experiment. *The International Journal of Aviation Psychology*, 22(1) :78–95.

## Bibliographie générale

- Abernethy, B. (1988). Visual search in sport and ergonomics : Its relationship to selective attention and performer expertise. *Human Performance*, 1(4) :205–235.
- Ackerman, R. (2014). The diminishing criterion model for metacognitive regulation of time investment. *Journal of Experimental Psychology : General*, 143(3) :1349.
- Adams, M. J. et Pew, R. W. (1990). Situational awareness in the commercial aircraft cockpit : A cognitive perspective. In *Digital Avionics Systems Conference, 1990. Proceedings., IEEE/AIAA/NASA 9th*, pages 519–524.
- Adcock, R. A., Thangavel, A., Whitfield-Gabrieli, S., Knutson, B., et Gabrieli, J. D. (2006). Reward-motivated learning : mesolimbic activation precedes memory formation. *Neuron*, 50(3) :507–517.
- Allport, D. A. (1980). Attention and performance. *Cognitive psychology : New directions*, 1 :12–153.
- Allport, D. A., Antonis, B., et Reynolds, P. (1972). On the division of attention : A disproof of the single channel hypothesis. *The Quarterly journal of experimental psychology*, 24(2) :225–235.
- Altmann, E. M. et Traflet, J. G. (2007). Timecourse of recovery from task interruption : Data and a model. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14(6) :1079–1084.
- Amalberti, R. (1996). *La conduite de systèmes à risques*. Presses universitaires de France.
- Amalberti, R. (2001). La maîtrise des situations dynamiques. *Psychologie française*, 46(2) :107–118.
- Anderson, B. A. (2013). A value-driven mechanism of attentional selection. *Journal of Vision*, 13(3) :7.
- Anderson, B. A., Laurent, P. A., et Yantis, S. (2011). Value-driven attentional capture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(25) :10367–10371.
- Anderson, J. R. (2009). *How can the human mind occur in the physical universe?* Oxford University Press.
- Andreani, E. (1967). Le coût d'opportunité. *Revue économique*, 18(5) :840–858.
- Arrington, C. M. et Logan, G. D. (2005). Voluntary task switching : chasing the elusive homunculus. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 31(4) :683.
- Ashby, W. R. (1956). An introduction to cybernetics. *An introduction to cybernetics*.
- Athènes, S., Averty, P., Puechmorel, S., Delahaye, D., et Collet, C. (2002). Atc complexity and controller workload : Trying to bridge the gap. In *Proceedings of the International Conference on HCI in Aeronautics*, pages 56–60.

- Baccino, T., Dumercy, L., et Kicka, M. (2007). Cognitive load during information seeking : an investigation with pupil dilation analysis. In *Computational Modeling in Information Seeking : Psychological and Computing Approaches*.
- Baddeley, A. (1996). Exploring the central executive. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology : Section A*, 49(1) :5–28.
- Baddeley, A. (2003). Working memory : looking back and looking forward. *Nature reviews neuroscience*, 4(10) :829–839.
- Baddeley, A. (2007). *Working memory, thought, and action*, volume 45. OUP Oxford.
- Baddeley, A. (2012). Working memory : Theories, models, and controversies. *Annual Review Of Psychology*, 63 :1–29.
- Bakdash, J. Z. et Marusich, L. R. (2017). Repeated measures correlation. *Frontiers in Psychology*, 8.
- Barabasi, A.-L. (2005). The origin of bursts and heavy tails in human dynamics. *Nature*, 435(7039) :207–211.
- Barrouillet, P., Bernardin, S., et Camos, V. (2004). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology : General*, 133(1) :83.
- BEA (2012). Accident survenu le 1er juin 2009 à l'airbus a330-203 exploité par air france vol af 447 - rio de janeiro - paris. Rapport final, Bureau d'Enquêtes et d'Analyses. BEA f-cp090601.
- Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological bulletin*, 91(2) :276.
- Bellenkes, A. H., Wickens, C. D., et Kramer, A. F. (1997). Visual scanning and pilot expertise : the role of attentional flexibility and mental model development. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*.
- Benedetto, S., Pedrotti, M., Minin, L., Baccino, T., Re, A., et Montanari, R. (2011). Driver workload and eye blink duration. *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour*, 14(3) :199–208.
- Billings, C. E. (1996). *Human-centered aircraft automation : Principles and guidelines*. National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center.
- Bland, J. M. et Altman, D. G. (1995). Calculating correlation coefficients with repeated observations : part 1 – correlation within subjects. *BMJ*, 310(6980) :633.
- Boeing Airplane Safety (2006). Statistical summary of commercial jet aircraft accidents : Worldwide operations, 1959-2005. *Boeing Commercial Airplane, Seattle, WA*.
- Boot, W. R., Basak, C., Erickson, K. I., Neider, M., Simons, D. J., Fabiani, M., Gratton, G., Voss, M. W., Prakash, R., et Lee, H. (2010). Transfer of skill engendered by complex task training under conditions of variable priority. *Acta psychologica*, 135(3) :349–357.

- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., et Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological review*, 108(3) :624.
- Brandstätter, E., Gigerenzer, G., et Hertwig, R. (2006). The priority heuristic : making choices without trade-offs. *Psychological Review*, 113(2) :409.
- Braune, R., Hofer, E., et Dresel, K. M. (1991). Flight deck information management- a challenge to commercial transport aviation. In *International Symposium on Aviation Psychology, 6 th, Columbus, OH*, pages 78–84.
- Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control : a dual mechanisms framework. *Trends in cognitive sciences*, 16(2) :106–113.
- Brickner, M. et Gopher, D. (1981). Improving time-sharing performance by enhancing voluntary control on processing resources. Technical report, DTIC.
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. Pergamon Press.
- Broca, A. et Richet, C. (1897). Période réfractaire dans les centres nerveux. *CR Acad. Sci*, 124 :96–99.
- Brookings, J. B., Wilson, G. F., et Swain, C. R. (1996). Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Biological psychology*, 42(3) :361–377.
- Brown, A. (1987). Metacognition, executive control, self-regulation, and other more mysterious mechanisms. *Metacognition, motivation, and understanding*, pages 65–116.
- Brown, J. W. et Braver, T. S. (2005). Learned predictions of error likelihood in the anterior cingulate cortex. *Science*, 307(5712) :1118–1121.
- Bugg, J. M. et Crump, M. J. (2012). In support of a distinction between voluntary and stimulus-driven control : a review of the literature on proportion congruent effects. *Frontiers in psychology*, 3.
- Burgess, P. W., Veitch, E., de Lacy Costello, A., et Shallice, T. (2000). The cognitive and neuroanatomical correlates of multitasking. *Neuropsychologia*, 38(6) :848–863.
- Callan, D. E. et Schweighofer, N. (2008). Positive and negative modulation of word learning by reward anticipation. *Human brain mapping*, 29(2) :237–249.
- Carayon, P. (2016). *Handbook of human factors and ergonomics in health care and patient safety*. CRC Press.
- Carmody, D. P., Nodine, C. F., et Kundel, H. L. (1980). An analysis of perceptual and cognitive factors in radiographic interpretation. *Perception*, 9(3) :339–344.
- Causse, M., Peysakhovich, V., et Fabre, E. F. (2016). High working memory load impairs language processing during a simulated piloting task : an erp and pupillometry study. *Frontiers in human neuroscience*, 10.

- Cegarra, J., Baracat, B., Calmettes, C., Matton, N., et Capa, R. L. (2017). A neuroergonomics perspective on mental workload predictions in jens rasmussen's srk framework. *Le travail humain*, 80(1) :7–22.
- Chelazzi, L., Eštočinová, J., Calletti, R., Gerfo, E. L., Sani, I., Della Libera, C., et Santandrea, E. (2014). Altering spatial priority maps via reward-based learning. *The Journal of Neuroscience*, 34(25) :8594–8604.
- Cherry, E. C. (1953). Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears. *The Journal of the acoustical society of America*, 25(5) :975–979.
- Chou, C.-C., Madhavan, D., et Funk, K. (1996). Studies of cockpit task management errors. *The International Journal of Aviation Psychology*, 6(4) :307–320.
- Clark, P. J. et Evans, F. C. (1954). Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology*, 35(4) :445–453.
- Cobham, A. (1954). Priority assignment in waiting line problems. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(1) :70–76.
- Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., et Aiken, L. S. (1983). Multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences. *Hillsdale, NJ : Earlbaum*.
- Colvin, K., Funk, K., et Braune, R. (2005). Task prioritization factors : Two part-task simulator studies. *The International Journal of Aviation Psychology*, 15(4) :321–338.
- Coutlee, C. G. et Huettel, S. A. (2012). The functional neuroanatomy of decision making : Prefrontal control of thought and action. *Brain Research*, 1428 :3–12.
- Damasio, A. R. (2006). *Erreur de Descartes (L')*. Odile Jacob.
- Damos, D. L. et Wickens, C. D. (1980). The identification and transfer of timesharing skills. *Acta Psychologica*, 46(1) :15–39.
- Dawes, R. M. (1979). The robust beauty of improper linear models in decision making. *American psychologist*, 34(7) :571.
- Dehais, F., Behrend, J., Peysakhovich, S., Causse, M., et Wickens, C. (2017a). Pilot flying and pilot monitoring's state awareness during a go-around execution in aviation : A behavioral and eye-tracking study. *International Journal of Aerospace Psychology*. In press.
- Dehais, F., Causse, M., et Pastor, J. (2008). Embedded eye tracker in a real aircraft : new perspectives on pilot/aircraft interaction monitoring. In *Proceedings from The 3rd International Conference on Research in Air Transportation*. Fairfax, USA : Federal Aviation Administration.
- Dehais, F., Causse, M., et Tremblay, S. (2011). Mitigation of conflicts with automation use of cognitive countermeasures. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53(5) :448–460.



- Dehais, F., Causse, M., Vachon, F., Régis, N., Menant, E., et Tremblay, S. (2014). Failure to detect critical auditory alerts in the cockpit : evidence for inattentive deafness. *Human factors*, 56(4) :631–644.
- Dehais, F., Hodgetts, H. M., Causse, M., Behrend, J., Durantin, G., et Tremblay, S. (2017b). Momentary lapse of control : A neuroergonomics approach to understanding and mitigating perseveration in human error. Article. Soumis.
- Dehais, F., Peysakhovich, V., Scannella, S., Fongue, J., et Gateau, T. (2015). Automation surprise in aviation : Real-time solutions. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 2525–2534.
- Deubel, H. et Schneider, W. X. (1996). Saccade target selection and object recognition : Evidence for a common attentional mechanism. *Vision research*, 36(12) :1827–1837.
- Deutsch, J. A. et Deutsch, D. (1963). Attention : Some theoretical considerations. *Psychological review*, 70(1) :80.
- Di Nocera, F., Camilli, M., et Terenzi, M. (2007). A random glance at the flight deck : Pilots' scanning strategies and the real-time assessment of mental workload. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(3) :271–285.
- Diez, M., Boehm-Davis, D. A., Holt, R. W., Pinney, M. E., Hansberger, J. T., et Schoppek, W. (2001). Tracking pilot interactions with flight management systems through eye movements. In *Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology*, pages 1–6. The Ohio State University Columbus.
- Dismukes, R. K. (2017). *Human error in aviation*. Routledge.
- Dornheim, M. A. (1992). Changes hike md-11 training success. *Aviation Week & Space Technology*, 137(21) :93–95.
- Dubois, E., Camachon, C., Blättler, C., et Hurter, C. (2016). Pigat (pilotgazetrainer) : Visual strategies training tool. In *Actes De La 28IÈMe ConfÉRence Francophone Sur L'Interaction Homme-Machine, IHM '16*, pages 177–187, New York, NY, USA. ACM.
- Duchowski, A. T. (2002). A breadth-first survey of eye-tracking applications. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 34(4) :455–470.
- Duncan, J. (1990). Goal weighting and the choice of behaviour in a complex world. *Ergonomics*, 33(10-11) :1265–1279.
- Durantin, G., Gagnon, J. F., Tremblay, S., et Dehais, F. (2014). Using near infrared spectroscopy and heart rate variability to detect mental overload. *Behavioural brain research*, 259 :16–23.
- Edwards, W. et Tversky, A. (1967). *Decision making : selected readings*, volume 8. Penguin Books.
- Elmore, T. F. (1994). Synwork1 : A pc-based tool for assessment of performance in a simulated work environment. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 26 :421–426.

- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1) :32–64.
- Engle, R. W. et Kane, M. J. (2003). Executive attention, working memory capacity, and a two-factor theory of cognitive control. *Psychology of learning and motivation*, 44 :145–199.
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., et Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological review*, 100(3) :363.
- Eriksen, B. A. et Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 16(1) :143–149.
- Eriksen, C. W. et Yeh, Y.-y. (1985). Allocation of attention in the visual field. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 11(5) :583.
- Findlay, J. M. (2009). Saccadic eye movement programming : Sensory and attentional factors. *Psychological Research*, 73(2) :127–135.
- Finley, J. R., Benjamin, A. S., et McCarley, J. S. (2014). Metacognition of multitasking : How well do we predict the costs of divided attention? *Journal of experimental psychology : applied*, 20(2) :158.
- Fisk, A. D. et Schneider, W. (1984). Memory as a function of attention, level of processing, and automatization. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 10(2) :181.
- Fitts, P. M., Jones, R. E., et Milton, J. L. (1950). Eye movements of aircraft pilots during instrument-landing approaches. *Aeronautical Engineering Review*, 3 :56.
- Flavell, J. H. (1979). Metacognition and cognitive monitoring : A new area of cognitive–developmental inquiry. *American psychologist*, 34(10) :906.
- Flight Safety Foundation (2009a). Approach and landing accident reduction – golden rules. Briefing note 1.3, Flight Safety Foundation, 601 Madison Street, Suite 300, Alexandria, VA 22314-1756 USA.
- Flight Safety Foundation (2009b). Fsf alar briefing note 3.2 : Altitude deviations. Technical report, Flight Safety Foundation.
- Flight Safety Foundation (2014). A practical guide for improving flight path monitoring. Rapport, Flight Safety Foundation.
- Foerde, K., Knowlton, B. J., et Poldrack, R. A. (2006). Modulation of competing memory systems by distraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(31) :11778–11783.
- Folstein, J. R. et Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the n2 component of the erp : a review. *Psychophysiology*, 45(1) :152–170.
- Fraisse, P. (1957). La période réfractaire psychologique. *L'Année Psychologique*, 57(2) :315–328.

- Fraisse, P. (1969). Why is naming longer than reading? *Acta Psychologica*, 30 :96–103.
- Freed, M. (2000). Reactive prioritization. Non-publié.
- Friedman, A. et Polson, M. C. (1981). Hemispheres as independent resource system : Limited-capacity processing and cerebral specialization. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 7(5) :1031.
- Funk, K. (1991). Cockpit task management : Preliminary definitions, normative theory, error taxonomy, and design recommendations.
- Gagnon, J.-F., Durantin, G., Vachon, F., Causse, M., Tremblay, S., et Dehais, F. (2012). Anticipating human error before it happens : Towards a psychophysiological model for online prediction of mental workload. In *HFES Proceedings*, Toulouse. Human Factors Ergonomics Society, Dick de Waard and Karel Brookhuis and Frédéric Dehais and Clemens Weikert and Stefan Röttger and Dietrich Manzey and Sonja Biede and Florence Reuzeau and Patrice Terrier.
- Gallistel, C. R. (1990). *The organization of learning*. The MIT Press.
- Gateau, T., Durantin, G., Lancelot, F., Scannella, S., et Dehais, F. (2015). Real-time state estimation in a flight simulator using fnirs. *PLoS one*, 10(3) :–0121279.
- Gigerenzer, G. et Gaissmaier, W. (2011). Heuristic decision making. *Annual Review of Psychology*, 62 :451–482.
- Gigerenzer, G. et Goldstein, D. G. (1996). Reasoning the fast and frugal way : models of bounded rationality. *Psychological review*, 103(4) :650.
- Gigerenzer, G. et Selten, R. (2002). *Bounded rationality : The adaptive toolbox*. MIT press.
- Giraudet, L., St-Louis, M.-E., Scannella, S., et Causse, M. (2015). P300 event-related potential as an indicator of inattentive deafness? *PLoS one*, 10(2) :–0118556.
- Gluck, M. A., Shohamy, D., et Myers, C. (2002). How do people solve the “weather prediction” task? : Individual variability in strategies for probabilistic category learning. *Learning & Memory*, 9(6) :408–418.
- Gopher, D., Armony, L., et Greenshpan, Y. (2000). Switching tasks and attention policies. *Journal of Experimental Psychology : General*, 129(3) :308–339.
- Gopher, D., Brickner, M., et Navon, D. (1982). Different difficulty manipulations interact differently with task emphasis : evidence for multiple resources. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 8(1) :146.
- Gopher, D., Kramer, A., Wiegmann, D., et Kirlik, A. (2007). *Attention : From theory to practice*, chapter Emphasis change as a training protocol for high-demand tasks, pages 209–224. Oxford University Press New York, NY.
- Gopher, D. et Navon, D. (1980). How is performance limited : Testing the notion of central capacity. *Acta Psychologica*, 46(3) :161–180.

- Gopher, D. et North, R. A. (1974). The measurement of attention capacity through concurrent task performance with individual difficulty levels and shifting priorities. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 18 of 4, pages 480–485.
- Gopher, D., Weil, M., et Siegel, D. (1989). Practice under changing priorities : An approach to the training of complex skills. *Acta Psychologica*, 71(1) :147–177.
- Greenwald, A. G. (2003). On doing two things at once : Iii. confirmation of perfect timesharing when simultaneous tasks are ideomotor compatible. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 29(5) :859.
- Greenwald, A. G. et Shulman, H. G. (1973). On doing two things at once : Ii. elimination of the psychological refractory period effect. *Journal of experimental psychology*, 101(1) :70.
- Gutzwiller, R. S., Wickens, C. D., et Clegg, B. A. (2014). Workload overload modeling an experiment with matb-ii to inform a computational model of task management. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 58 of 1, pages 849–853.
- Hall, R. E., Fragola, J., et Wreathall, J. (1982). Post-event human decision errors : operator action tree/time reliability correlation. Technical report.
- Hambrick, D. Z., Oswald, F. L., Darowski, E. S., Rench, T. A., et Brou, R. (2010). Predictors of multitasking performance in a synthetic work paradigm. *Applied cognitive psychology*, 24 :1149–1167.
- Hameluck, D. E. (1990). Mental models, mental workload, and instrument scanning in flight. In *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, volume 34, pages 76–80.
- Hankins, T. C. et Wilson, G. F. (1998). A comparison of heart rate, eye activity, eeg and subjective measures of pilot mental workload during flight. *Aviation, space, and environmental medicine*, 69(4) :360–367.
- Hart, S. G. et Staveland, L. E. (1988). Development of nasa-tlx (task load index) : Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology*, 52 :139–183.
- Hazy, T. E., Frank, M. J., et O'Reilly, R. C. (2007). Towards an executive without a homunculus : computational models of the prefrontal cortex/basal ganglia system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 362(1485) :1601–1613.
- Helleberg, J. R. et Wickens, C. D. (2003). Effects of data-link modality and display redundancy on pilot performance : An attentional perspective. *The International Journal of Aviation Psychology*, 13(3) :189–210.
- Henderson, J. M. (2003). Human gaze control during real-world scene perception. *Trends in cognitive sciences*, 7(11) :498–504.

- Hess, E. H. et Polt, J. M. (1964). Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving. *Science*, 143(3611) :1190–1192.
- Hilburn, B., Jorna, P. G., Byrne, E. A., et Parasuraman, R. (1997). The effect of adaptive air traffic control (atc) decision aiding on controller mental workload. *Human-automation interaction : Research and practice*, pages 84–91.
- Hills, T. T., Todd, P. M., et Goldstone, R. L. (2010). The central executive as a search process : priming exploration and exploitation across domains. *Journal of Experimental Psychology : General*, 139(4) :590.
- Hoc, J.-M. (2004a). *Ergonomie*, chapter 31, pages 515–530. Presses Universitaires de France.
- Hoc, J.-M. (2004b). *Vers une coopération homme-machine en situation dynamique*, chapter 16, pages 269–283. Presses Universitaires de France.
- Hoc, J.-M., Amalberti, R., et Plee, G. (2000). Vitesse du processus et temps partagé : planification et concurrence attentionnelle. *L'année psychologique*, 1000(4) :629–660.
- Hoffman, J. E. (1998). Visual attention and eye movements. *Attention*, 31 :119–153.
- Hoffman, J. E. et Subramaniam, B. (1995). The role of visual attention in saccadic eye movements. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 57(6) :787–795.
- Hogarth, R. M. (1987). *Judgement and choice : The psychology of decision*. Number i9780471914792. John Wiley & Sons.
- Huettel, S. A., Song, A. W., et McCarthy, G. (2005). Decisions under uncertainty : probabilistic context influences activation of prefrontal and parietal cortices. *Journal of Neuroscience*, 25(13) :3304–3311.
- Huettig, G., Anders, G., et Tautz, A. (1999). Mode awareness in a modern glass cockpit. In *Proceedings of the 10th International Symposium on Aviation Psychology*, volume 1, pages 130–135.
- Hull, C. (1943). *Principles of behavior*.
- Iani, C. et Wickens, C. D. (2007). Factors affecting task management in aviation. *Human Factors*, 49(1) :16–24.
- Jacoby, L. L. (1991). A process dissociation framework : Separating automatic from intentional uses of memory. *Journal of memory and language*, 30(5) :513–541.
- Jaeggi, S. M., Seewer, R., Nirikko, A. C., Eckstein, D., Schroth, G., Groner, R., et Gutbrod, K. (2003). Does excessive memory load attenuate activation in the prefrontal cortex ? load-dependent processing in single and dual tasks : functional magnetic resonance imaging study. *NeuroImage*, 19(2) :210–225.
- Janssen, C. P. et Brumby, D. P. (2015). Strategic adaptation to task characteristics, incentives, and individual differences in dual-tasking. *PLoS ONE*, 10(7) :–0130009.

- Johnston, W. A., Griffith, D., et Wagstaff, R. R. (1972). Speed, accuracy, and ease of recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11(4) :512–520.
- Jones, R. E., Milton, J. L., et Fitts, P. M. (1949). Eye fixations of aircraft pilots, i. a review of prior eye-movement studies and a description of a technique for recording the frequency, duration and sequences of eye-fixations during instrument flight. *Wright Patterson AFB, OH, USAF Tech. Rep*, 5837.
- Jonsson, J. E. et Ricks, W. R. (1995). Cognitive models of pilot categorization and prioritization of flight-deck information. Technical report, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, United States.
- Just, M. A., Carpenter, P. A., et Miyake, A. (2003). Neuroindices of cognitive workload : Neuroimaging, pupillometric and event-related potential studies of brain work. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4(1-2) :56–88.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall series in experimental psychology. Prentice-Hall.
- Kahneman, D., Beatty, J., et Pollack, I. (1967). Perceptual deficit during a mental task. *Science*, 157(3785) :218–219.
- Kahneman, D. et Tversky, A. (1979). Prospect theory : An analysis of decision under risk. *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, pages 263–291.
- Kane, M. J., Conway, A. R., Hambrick, D. Z., et Engle, R. W. (2007). Variation in working memory capacity as variation in executive attention and control. *Variation in working memory*, pages 21–48.
- Kantowitz, B. H. (1987). 3. mental workload. In Hancock, P. A., editor, *Human Factors Psychology*, chapter Advances in Psychology, pages 81–121. North-Holland.
- Karlin, L. et Kestenbaum, R. (1968). Effects of number of alternatives on the psychological refractory period. *The Quarterly journal of experimental psychology*, 20(2) :167–178.
- Katidioti, I. et Taatgen, N. A. (2014). Choice in multitasking : How delays in the primary task turn a rational into an irrational multitasker. *Human Factors*, 56(4) :728–736.
- Keele, S. W. (1973). *Attention and human performance*. Goodyear Publishing Company.
- Kinsbourne, M. et Hicks, R. E. (1978). Functional cerebral space : A model for overflow, transfer and interference effects in human performance. *Attention and performance VII*, pages 345–362.
- Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of experimental psychology*, 55(4) :352.
- Klein, R. (1980). *Attention and Performance VIII*, chapter Does oculomotor readiness mediate cognitive control of attention?, pages 259–276. Nickerson, R. S., Erlbaum, hillsdale, n.j. edition.

- Kleinrock, L. (1976). *Queueing systems, volume 2 : Computer applications*, volume 66. Wiley New York.
- Knorr, D. et Walter, L. (2011). Trajectory uncertainty and the impact on sector complexity and workload. *Federal Aviation Administration (FAA), Deutsche Flugsicherung GmbH*.
- Knowlton, B. J., Squire, L. R., et Gluck, M. A. (1994). Probabilistic classification learning in amnesia. *Learning & Memory*, 1(2) :106–120.
- Koechlin, E., Ody, C., et Kouneiher, F. (2003). The architecture of cognitive control in the human prefrontal cortex. *Science*, 302(5648) :1181–1185.
- Koh, R. Y., Park, T., Wickens, C. D., Ong, L. T., et Chia, S. N. (2011). Differences in attentional strategies by novice and experienced operating theatre scrub nurses. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 17(3) :233.
- Kool, W., McGuire, J. T., Rosen, Z. B., et Botvinick, M. M. (2010). Decision making and the avoidance of cognitive demand. *Journal of Experimental Psychology : General*, 139(4) :665.
- Kool, W., McGuire, J. T., Wang, G. J., et Botvinick, M. M. (2013). Neural and behavioral evidence for an intrinsic cost of self-control. *PloS one*, 8(8) :-72626.
- Koriat, A., Ackerman, R., Adiv, S., Lockl, K., et Schneider, W. (2014). The effects of goal-driven and data-driven regulation on metacognitive monitoring during learning : A developmental perspective. *Journal of Experimental Psychology : General*, 143(1) :386.
- Kramer, A., Tham, M., Konrad, C., Wickens, C., et Lintern, G. (1994). Instrument scan and pilot expertise. In *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, volume 38 of 1, pages 36–40.
- Kramer, A. F., Larish, J. F., et Strayer, D. L. (1995). Training for attentional control in dual task settings : A comparison of young and old adults. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 1(1) :50.
- Kramer, A. F. et McCarley, J. S. (2003). Oculomotor behaviour as a reflection of attention and memory processes : Neural mechanisms and applications to human factors. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4(1-2) :21–55.
- Krey, N. (2007). Nall report : accident trends and factors for 2006. *Frederick, MD, AOPA Air Safety Foundation*.
- Kurzban, R., Duckworth, A., Kable, J. W., et Myers, J. (2013). An opportunity cost model of subjective effort and task performance. *The Behavioral and Brain Sciences*, 36(6) :661–679.
- L10111973 (1973). Aircraft accident report, eastern air lines inc., l-1011, n310ea. Technical Report NTSB-AAR-73-14, National Transportation Safety Board, Bureau of Aviation Safety.
- Lacagnina, M. (2007). Defusing the ramp. *AeroSafety world*, 2(5).

- Leplat, J. (2006). La notion de régulation dans l'analyse de l'activité. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, 8-1. consulté le 11 mars 2017.
- Levy, J. et Pashler, H. (2008). Task prioritisation in multitasking during driving : Opportunity to abort a concurrent task does not insulate braking responses from dual-task slowing. *Applied Cognitive Psychology*, 22(4) :507–525.
- Li, W.-C., White, J., Braithwaite, G., Greaves, M., et Lin, J.-H. (2016). The evaluation of pilot's situational awareness during mode changes on flight mode annunciators. In *International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*, pages 409–418.
- Liederman, J. (1986). Subtraction in addition to addition : Dual task performance improves when tasks are presented to separate hemispheres. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 8(5) :486–502.
- Lien, M.-C., McCann, R. S., Ruthruff, E., et Proctor, R. W. (2005). Confirming and disconfirming theories about ideomotor compatibility in dual-task performance : a reply to greenwald (2005). *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 31(1) :226–229.
- Liu, K. K. (1997). The highly-automated airplane : Its impact on aviation safety and an analysis of training philosophy. Technical report, Air Force Institute of Technology.
- Liu, Y. (1996). Queueing network modeling of elementary mental processes. *Psychological Review*, 103(1) :116–136.
- Loft, S., Sanderson, P., Neal, A., et Mooij, M. (2007). Modeling and predicting mental workload in en route air traffic control : Critical review and broader implications. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(3) :376–399.
- Logan, G. D. (1985). Executive control of thought and action. *Acta Psychologica*, 60 :193–210.
- Logan, G. D. et Gordon, R. D. (2001). Executive control of visual attention in dual-task situations. *Psychological review*, 108(2) :393.
- Lu, J. et Zhang, G. (2004). Uncertain information processing framework for situation awareness and emergency decision-making. In *International Conference on Information*.
- Luria, A. R. (1966). *Higher cortical functions in man*. Basic Books.
- Macdonald, J. S. et Lavie, N. (2011). Visual perceptual load induces inattentive deafness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(6) :1780–1789.
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the stroop effect : an integrative review. *Psychological bulletin*, 109(2) :163.
- Masson, G. S. et Stone, L. S. (2002). From following edges to pursuing objects. *Journal of neurophysiology*, 88(5) :2869–2873.



- Matin, E. (1974). Saccadic suppression : a review and an analysis. *Psychological bulletin*, 81(12) :899.
- Mattes, S. (2003). The lane-change-task as a tool for driver distraction evaluation. *Quality of Work and Products in Enterprises of the Future*, 57.
- Matton, N., Paubel, P., Cegarra, J., et Raufaste, E. (2016). Differences in multitask resource reallocation after change in task values. *Human Factors*.
- McConkie, G. W. et Rayner, K. (1976). Asymmetry of the perceptual span in reading. *Bulletin of the psychonomic society*, 8(5) :365–368.
- McKendrick, R. et Parasuraman, R. (2012). Effect of different types of variable and adaptive training on skill acquisition in dual verbal-spatial working memory tasks. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 56, page 1426.
- McLeod, P. (1977). A dual task response modality effect : Support for multiprocessor models of attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 29(4) :651–667.
- Metzger, U. et Parasuraman, R. (2005). Automation in future air traffic management : Effects of decision aid reliability on controller performance and mental workload. *Human Factors*, 47(1) :35–49.
- Meyer, D. E. et Kieras, D. E. (1997). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance : Part 1. basic mechanisms. *Psychological Review*, 104(4) :3–65.
- Miendlarzewska, E. A., Bavelier, D., et Schwartz, S. (2016). Influence of reward motivation on human declarative memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 61 :156–176.
- Miller, E. K. et Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual review of neuroscience*, 24(1) :167–202.
- Miller, G. A., Galanter, E., et Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. Adams Bannister Cox.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., et Howerter, A. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks : A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41 :49–100.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3) :134–140.
- Monsell, S. et Driver, J. (2000). Banishing the control homunculus. *Control of cognitive processes : Attention and performance XVIII*, pages 3–32.
- Montgomery, H. (1983). Decision rules and the search for a dominance structure : Towards a process model of decision making. *Advances in psychology*, 14 :343–369.
- Moray, N. (1967). Where is capacity limited ? : A survey and a model. *Acta psychologica*, 27 :84–92.

- Moray, N. (1969). *Listening and attention*. Penguin Books.
- Morgan, B. et D'Mello, S. (2013). The effect of positive vs. negative emotion on multitasking. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 57(1) :848–852.
- Morrow, D. G., Miller, L. M. S., Ridolfo, H. E., Magnor, C., Fischer, U. M., Kokayeff, N. K., et Stine-Morrow, E. A. (2008). Expertise and age differences in pilot decision making. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 16(1) :33–55.
- Mosier, K. L., Sethi, N., McCauley, S., Khoo, L., et Orasanu, J. M. (2007). What you don't know can hurt you : Factors impacting diagnosis in the automated cockpit. *Human Factors*, 49(2) :300–310.
- Mourant, R. R. et Rockwell, T. H. (1972). Strategies of visual search by novice and experienced drivers. *Human factors*, 14(4) :325–335.
- Mushtaq, F., Bland, A. R., et Schaefer, A. (2011). Uncertainty and cognitive control. *Frontiers in psychology*, 2.
- National Transportation Safety Board (2010). Loss of control on approach colgan air, inc. operating as continental connection flight 3407, bombardier dhc-8-400, n200wq. Rapport d'accident, National Transportation Safety Board, Clarence Center, New York. NTSB/AAR-10/01.
- Navon, D. (1984). Resources—a theoretical soup stone? *Psychological review*, 91(2) :216.
- Navon, D. et Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3) :214.
- Nelson, T. O. (1990). Metamemory : A theoretical framework and new findings. *Psychology of Learning and Motivation*, 26 :125–173.
- Neumann, O., Heuer, H., et Sanders, A. F. (1987). Beyond capacity : A functional view of attention. *Perspectives on perception and action*, 14 :361–394.
- Newell, A. (1973). You can't play 20 questions with nature and win : Projective comments on the papers of this symposium. In *Visual Information Processing : Proceedings of the Eighth Annual Carnegie Symposium on Cognition*. Academic Press.
- Newell, B. R., Lagnado, D. A., et Shanks, D. R. (2007). Challenging the role of implicit processes in probabilistic category learning. *Psychonomic bulletin & review*, 14(3) :505–511.
- Nissen, M. J. et Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning : Evidence from performance measures. *Cognitive psychology*, 19(1) :1–32.
- Nobre, A. C., Gitelman, D. R., Dias, E. C., et Mesulam, M. M. (2000). Covert visual spatial orienting and saccades : overlapping neural systems. *Neuroimage*, 11(3) :210–216.
- Norman, D. A. (1988). *The Psychology Of Everyday Things*. Basic Books.

- Norman, D. A. et Bobrow, D. J. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7 :44–64.
- Norman, D. A. et Shallice, T. (1986). Attention to action. In *Consciousness and Self-Regulation*, pages 1–18. Springer.
- North, R. A. (1977). Task components and demands as factors in dual-task performance. Technical report, DTIC.
- Osman, M. (2010). Controlling uncertainty : a review of human behavior in complex dynamic environments. *Psychological bulletin*, 136(1) :65.
- Ottati, W. L., Hickox, J. C., et Richter, J. (1999). Eye scan patterns of experienced and novice pilots during visual flight rules (vfr) navigation. In Sage, S. P., editor, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 43 of 1, pages 66–70, Los Angeles, CA.
- Owen, A. M., McMillan, K. M., Laird, A. R., et Bullmore, E. (2005). N-back working memory paradigm : A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human brain mapping*, 25(1) :46–59.
- Packard, M. G. et Knowlton, B. J. (2002). Learning and memory functions of the basal ganglia. *Annual review of neuroscience*, 25(1) :563–593.
- Paivio, A. (1990). *Mental representations : A dual coding approach*. Oxford University Press.
- Parasuraman, R. (2003). Neuroergonomics : Research and practice. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4(1-2) :5–20.
- Parasuraman, R., Molloy, R., et Singh, I. L. (1993). Performance consequences of automation-induced 'complacency'. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(1) :1–23.
- Parasuraman, R. et Rizzo, M. (2008). *Neuroergonomics : The brain at work*. Oxford University Press.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., et Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A : Systems and Humans*, 30(3) :286–297.
- Pascual-Marqui, R. D., Esslen, M., Kochi, K., Lehmann, D., et al. (2002). Functional imaging with low-resolution brain electromagnetic tomography (loreta) : a review. *Methods and findings in experimental and clinical pharmacology*, 24(Suppl C) :91–95.
- Pashler, H. (1984). Processing stages in overlapping tasks : Evidence for a central bottleneck. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 10 :358–377.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks : data and theory. *Psychological bulletin*, 116(2) :220.

- Payne, J. W., Bettman, J. R., et Johnson, E. J. (1993). *The adaptive decision maker*. Cambridge University Press.
- Pedrotti, M., Mirzaei, M. A., Tedesco, A., Chardonnet, J.-R., Mérienne, F., Benedetto, S., et Baccino, T. (2014). Automatic stress classification with pupil diameter analysis. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 30(3) :220–236.
- Peirce, J. W. (2009). Generating stimuli for neuroscience using psychopy. *Frontiers in Neuroinformatics*, 2(10).
- Penttinen, A. (1999). Chapter 8—queuing systems. *Lecture Notes : S-38.145-Introduction to Teletraffic Theory*.
- Perry, R. J. et Zeki, S. (2000). The neurology of saccades and covert shifts in spatial attention : an event-related fmri study. *Brain*, 123(11) :2273–2288.
- Peterson, M. S., Kramer, A. F., et Irwin, D. E. (2004). Covert shifts of attention precede involuntary eye movements. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 66(3) :398–405.
- Peysakhovich, V. (2016). *Study of pupil diameter and eye movements to enhance flight safety*. PhD thesis, Université Toulouse 3 Paul Sabatier.
- Piéron, H. (1953). *Vocabulaire de la psychologie*. Presses Universitaires de France.
- Pinet, J. (2011). *Traitement de situations inattendues d'extrême urgence en vol : test d'un modèle cognitif auprès de pilotes experts*. PhD thesis, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II.
- PlaneCrashinfo.com (2017). Causes of fatal accidents by decade. Site web. Consulté le 13 septembre 2017 sur <http://www.planecrashinfo.com/cause>.
- Poldrack, R. A., Clark, J., Pare-Blagoev, E. J., et Shohamy, D. (2001). Interactive memory systems in the human brain. *Nature*, 414(6863) :546.
- Poldrack, R. A., Wagner, A. D., Prull, M. W., Desmond, J. E., Glover, G. H., et Gabrieli, J. D. (1999). Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *Neuroimage*, 10(1) :15–35.
- Popper, K. (1973). *La logique de la découverte scientifique*. Paris Payot.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly journal of experimental psychology*, 32(1) :3–25.
- Posner, M. I., Snyder, C. R., et Solso, R. L. (2004). Attention and cognitive control. *Cognitive psychology : Key readings*, 205.
- Posner, M. I. et Snyder, C. R. R. (1975). Facilitation and inhibition in the processing of signals. *Attention and performance V*, pages 669–682.
- Previc, F. H. (1998). The neuropsychology of 3-d space. *Psychological bulletin*, 124(2) :123.

- Price, A. L. (2009). Distinguishing the contributions of implicit and explicit processes to performance of the weather prediction task. *Memory & cognition*, 37(2) :210–222.
- Prinz, W. (1990). A common coding approach to perception and action. In *Relationships between perception and action*, pages 167–201. Springer.
- Pritchard, R. M. (1961). *Stabilized images on the retina*, volume 511. WH Freeman Company.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Katz, L. C., LaMantia, A.-S., McNamara, J. O., et Williams, S. M. (2001). *Neuroscience*. Sunderland, MA : Sinauer Associates.
- Raby, M. et Wickens, C. D. (1994). Strategic workload management and decision biases in aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 4(3) :211–240.
- Raby, M., Wickens, C. D., et Marsh, R. (1990). Investigation of factors comprising a model of pilot decision making : Part 1. cognitive biases in workload management strategy. Technical report, ARL-90-7/SCEEE-90-1, Aviation Research Laboratory, Institute of Aviation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Rafal, R. D., Calabresi, P. A., Brennan, C. W., et Sciolto, T. K. (1989). Saccade preparation inhibits reorienting to recently attended locations. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 15(4) :673.
- Rasmussen, J., Nixon, P., et Warner, F. (1990). Human error and the problem of causality in analysis of accidents. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, pages 449–462.
- Rasmussen, J., Pejtersen, A., et Goodstein, L. P. (1994). *Cognitive systems engineering*. New York, Wiley.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing : 20 years of research. *Psychological bulletin*, 124(3) :372.
- Rayner, K., McConkie, G. W., et Ehrlich, S. (1978). Eye movements and integrating information across fixations. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 4(4) :529.
- Reason, J. (1990). *Human error*. Cambridge university press.
- Reber, A. S. (1989). Implicit learning and tacit knowledge. *Journal of experimental psychology : General*, 118(3) :219.
- Recarte, M. A. et Nunes, L. M. (2000). Effects of verbal and spatial-imagery tasks on eye fixations while driving. *Journal of experimental psychology : Applied*, 6(1) :31.
- Régis, N., Dehais, F., Rachelson, E., Thooris, C., Pizziol, S., Causse, M., et Tessier, C. (2014). Formal detection of attentional tunneling in human operator–automation interactions. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 44(3) :326–336.
- Rescorla, R. A. (1969). Conditioned inhibition of fear resulting from negative cs-us contingencies. *Journal of comparative and physiological psychology*, 67(4) :504.

- Rey, A. (2011). *Dictionnaire historique de la langue française*. Le Robert.
- Reynal, M., Colineaux, Y., Vernay, A., et Dehais, F. (2016). Pilot flying vs. pilot monitoring during the approach phase : an eye-tracking study. In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace*, page 7.
- Richard, J.-F. (1990). *Les activités mentales : comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Paris : Colin.
- Ricks, W. R., Abbott, K. H., Jonsson, J. E., Boucek, G., et Rogers, W. H. (1991). Information management for commercial aviation – A research perspective. In *Proceedings of the International Symposium on Aviation Psychology*, volume 1, pages 60–65, Columbus, OH, Ohio State University. International Symposium on Aviation Psychology.
- Ricks, W. R., Jonsson, J. E., et Rogers, W. H. (1994). Cognitive representations of flight-deck information attributes. *The International Journal of Aviation Psychology*, 4(1) :65–83.
- Ridderinkhof, K. R., Van Den Wildenberg, W. P., Segalowitz, S. J., et Carter, C. S. (2004). Neurocognitive mechanisms of cognitive control : the role of prefrontal cortex in action selection, response inhibition, performance monitoring, and reward-based learning. *Brain and cognition*, 56(2) :129–140.
- Rogers, W. H. (1996). Flight deck task management : A cognitive engineering analysis. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 40 of 4, pages 239–243.
- Roques, C.-F. (1997). *Pratique de l'électrothérapie : électrophysiothérapie pratique appliquée à la médecine physique et à la masso-kinésithérapie*. Springer Science & Business Media.
- Rosvall, G. et Karlsson, R. (2010). Aeroplane incident to oe-gva on approach to stockholm/bromma airport in stockholm county. Technical report, Swedish Accident Investigation Board. Rapport d'incident.
- Rubinstein, J. S., Meyer, D. E., et Evans, J. E. (2001). Executive control of cognitive processes in task switching. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 27(4) :763–797.
- Russi-Vigoya, M. N. et Patterson, P. (2015). Analysis of pilot eye behavior during glass cockpit simulations. *Procedia Manufacturing*, 3 :5028–5035.
- Sali, A. W., Anderson, B. A., et Yantis, S. (2014). The role of reward prediction in the control of attention. *Journal of experimental psychology : human perception and performance*, 40(4) :1654.
- Salvucci, D. et Bogunovich, P. (2010). Multitasking and monotasking : the effects of mental workload on deferred task interruptions. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pages 85–88.
- Salvucci, D. et Taatgen, N. (2011a). *Metacognition and Task Priorities*, chapter 9. Reflections and Future Directions. Oxford University Press.

- Salvucci, D. et Taatgen, N. (2011b). *The Multitasking Mind*. Oxford University Press.
- Salvucci, D. et Taatgen, N. A. (2008). Threaded cognition : an integrated theory of concurrent multitasking. *Psychological Review*, 115(1) :101–130.
- Samurçay, R. et Hoc, J.-M. (1988). De l'analyse du travail à la spécification d'aides à la décision dans des environnements dynamiques. *Psychologie française*, pages 187–196.
- Sanders, A. F. (1980). 20 stage analysis of reaction processes. *Advances in Psychology*, 1 :331–354.
- Santiago-Espada, Y., Myer, R. R., Latorella, K. A., et Comstock Jr, J. R. (2011). *The Multi-Attribute Task Battery II (MATB-II) Software for Human Performance and Workload Research : A User's Guide*.
- Sarter, N. B., Mumaw, R. J., et Wickens, C. D. (2007). Pilots' monitoring strategies and performance on automated flight decks : An empirical study combining behavioral and eye-tracking data. *Human factors*, 49(3) :347–357.
- Sarter, N. B. et Woods, D. D. (2000). Team play with a powerful and independent agent : a full-mission simulation study. *Human Factors*, 42(3) :390–402.
- Savage, L. J. (1972). *The foundations of statistics*. Courier Corporation.
- Scannella, S., Causse, M., Chauveau, N., Pastor, J., et Dehais, F. (2013). Effects of the audiovisual conflict on auditory early processes. *International Journal of Psychophysiology*, 89(1) :115–122.
- Scannella, S., Pariente, J., De Boissezon, X., Castel-Lacanal, E., Chauveau, N., Causse, M., Dehais, F., et Pastor, J. (2016). N270 sensitivity to conflict strength and working memory : A combined erp and sloreta study. *Behavioural brain research*, 297 :231–240.
- Schneider, W. et Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing : I. detection, search, and attention. *Psychological review*, 84(1) :1.
- Schumacher, E. H., Seymour, T. L., Glass, J. M., Fencsik, D. E., Lauber, E. J., Kieras, D. E., et Meyer, D. E. (2001). Virtually perfect time-sharing in dual-task performance : Uncorking the central cognitive bottleneck. *Psychological Science*, 12(2) :101–108.
- Schunn, C. D. et Reder, L. M. (1998). *The Psychology of Learning and Motivation*, volume 38, chapter Strategy Adaptivity and Individual Differences, pages 115–154. New York : Academic Press.
- Schutte, P. C. et Trujillo, A. C. (1996). Flight crew task management in non-normal situations. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, volume 40, pages 244–248.
- Serences, J. T. et Yantis, S. (2006). Spatially selective representations of voluntary and stimulus-driven attentional priority in human occipital, parietal, and frontal cortex. *Cerebral cortex*, 17(2) :284–293.

- Shah, A. K. et Oppenheimer, D. M. (2008). Heuristics made easy : an effort-reduction framework. *Psychological bulletin*, 134(2) :207.
- Shallice, T. I. M. et Burgess, P. W. (1991). Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. *Brain*, 114(2) :727-741.
- Shapiro, K. L. et Raymond, J. E. (1989). Training of efficient oculomotor strategies enhances skill acquisition. *Acta Psychologica*, 71(1) :217-242.
- Shappell, S. A. et Wiegmann, D. A. (2000). The human factors analysis and classification system-hfacs. Technical report, US Federal Aviation Administration, Office of Aviation Medicine.
- Shappell, S. A. et Wiegmann, D. A. (2003). A human error analysis of general aviation controlled flight into terrain accidents occurring between 1990-1998. Technical report, Federal Aviation Administration, Washington, D.C. DOT/FAA/AM-03/4.
- Sheliga, B. M., Craighero, L., Riggio, L., et Rizzolatti, G. (1997). Effects of spatial attention on directional manual and ocular responses. *Experimental brain research*, 114(2) :339-351.
- Shenhav, A., Botvinick, M. M., et Cohen, J. D. (2013). The expected value of control : an integrative theory of anterior cingulate cortex function. *Neuron*, 79(2) :217-240.
- Shepherd, M., Findlay, J. M., et Hockey, R. J. (1986). The relationship between eye movements and spatial attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 38(3) :475-491.
- Sheridan, T. B. (2016). Human-robot interaction : status and challenges. *Human factors*, 58(4) :525-532.
- Shiffrin, R. M. et Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing : Ii. perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological review*, 84(2) :127.
- Shohamy, D., Myers, C. E., Onlaor, S., et Gluck, M. A. (2004). Role of the basal ganglia in category learning : how do patients with parkinson's disease learn? *Behavioral neuroscience*, 118(4) :676.
- Simon, H. A. (1956). Rational choice and the structure of the environment. *Psychological review*, 63(2) :129.
- Simon, H. A. (1990). Invariants of human behavior. *Annual review of psychology*, 41(1) :1-20.
- Sivak, M. et Flannagan, M. J. (2003). Flying and driving after the september 11 attacks. *American Scientist*, 91(1) :6-8.
- Smith, E. E. et Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283(5408) :1657-1661.
- Smith, V. L. et Walker, J. M. (1993). Monetary rewards and decision cost in experimental economics. *Economic Inquiry*, 31(2) :245-261.



- Spector, A. et Biederman, I. (1976). Mental set and mental shift revisited. *The American Journal of Psychology*, pages 669–679.
- Sperandio, J. C. (1971). Variation of operator's strategies and regulating effects on workload. *Ergonomics*, 14(5) :571–577.
- Sperling, G. et Doshier, B. A. (1986). *Strategy and optimization in human information processing*, chapter 2, pages 1–65. Citeseer.
- Sperling, G. et Melchner, M. J. (1978). The attention operating characteristic : Examples from visual search. *Science*, 202(4365) :315–318.
- Spitz, G. (1988). Flexibility in resource allocation and the performance of time-sharing tasks. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 32 of 19, pages 1466–1470.
- Spitzer, C. R. (2016). *Avionics : Elements, software and functions*. CRC Press.
- Squire, L. R., Stark, C. E., et Clark, R. E. (2004). The medial temporal lobe. *Annu. Rev. Neurosci.*, 27 :279–306.
- Stanton, N. A., Stewart, R., Harris, D., Houghton, R. J., Baber, C., McMaster, R., Salmon, P., Hoyle, G., Walker, G., et Young, M. S. (2006). Distributed situation awareness in dynamic systems : theoretical development and application of an ergonomics methodology. *Ergonomics*, 49(12-13) :1288–1311.
- Strayer, D. L. et Johnston, W. A. (2001). Driven to distraction : Dual-task studies of simulated driving and conversing on a cellular telephone. *Psychological science*, 12(6) :462–466.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of experimental psychology*, 18(6) :643.
- Svensson, E., Angelborg-Thanderez, M., Sjöberg, L., et Olsson, S. (1997). Information complexity-mental workload and performance in combat aircraft. *Ergonomics*, 40(3) :362–380.
- Taatgen, N. A. (2007). *Integrated Models of Cognitive Systems*, chapter The minimal control principle, pages 368–379. New York : Oxford University Press.
- Talleur, D. A. et Wickens, C. D. (2003). The effect of pilot visual scanning strategies on traffic detection accuracy and aircraft control. In *12th International Symposium on Aviation Psychology, 2003 University of Illinois, Urbana-Champaign*.
- Telford, C. W. (1931). The refractory phase of voluntary and associative response. *Journal of Experimental Psychology*, 14 :1–35.
- Tole, J. R., Stephens, A. T., Harris, R. L., et Ephrath, A. R. (1982). Visual scanning behavior and mental workload in aircraft pilots. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*.
- Treisman, A. M. (1960). Contextual cues in selective listening. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 12(4) :242–248.

- Treisman, A. M. et Davies, A. (1973). Divided attention to ear and eye. *Attention and performance IV*, pages 101–117.
- Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. *Organization of memory*, 1 :381–403.
- Turner, M. L. et Engle, R. W. (1989). Is working memory capacity task dependent? *Journal of memory and language*, 28(2) :127–154.
- Tversky, A. et Kahneman, D. (1973). Availability : A heuristic for judging frequency and probability. *Cognitive psychology*, 5(2) :207–232.
- Ullsperger, M. et Von Cramon, D. Y. (2001). Subprocesses of performance monitoring : a dissociation of error processing and response competition revealed by event-related fmri and erps. *Neuroimage*, 14(6) :1387–1401.
- Unsworth, N., Heitz, R. P., Schrock, J. C., et Engle, R. W. (2005). An automated version of the operation span task. *Behavior research methods*, 37(3) :498–505.
- van de Merwe, K., van Dijk, H., et Zon, R. (2012). Eye movements as an indicator of situation awareness in a flight simulator experiment. *The International Journal of Aviation Psychology*, 22(1) :78–95.
- Vine, S. J., Uiga, L., Lavric, A., Moore, L. J., Tsaneva-Atanasova, K., et Wilson, M. R. (2015). Individual reactions to stress predict performance during a critical aviation incident. *Anxiety, Stress, & Coping*, 28(4) :467–477.
- Walker, G. H. et Stanton, N. A. (2017). *Human factors in automotive engineering and technology*. CRC Press.
- Wang, D. Y. D., Proctor, R., et Pick, D. (2009). Allocation of effort as a function of payoffs for individual tasks in a multitasking environment. *Behavior Research Methods*, 41(3) :705–716.
- Wang, D. Y. D., Proctor, R. W., et Pick, D. F. (2007). Acquisition and transfer of attention allocation strategies in a multiple-task work environment. *Human Factors*, 49(6) :995–1004.
- 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 :2–19.
- Welford, A. T. (1967). Single-channel operation in the brain. *Acta psychologica*, 27 :5–22.
- Wickens, C., Hutchins, S., Carolan, T., et Cumming, J. (2011). Investigating the impact of training on transfer : A meta-analytic approach. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 55 of 1, pages 2138–2142.
- Wickens, C. D. (1976). The effects of divided attention on information processing in manual tracking. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 2(1) :1.
- Wickens, C. D. (1980). The structure of attentional resources. *Attention and performance VIII*, 8 :239–257.

- Wickens, C. D. (1987). 2. attention. In Hancock, P. A., editor, *Human Factors Psychology*, chapter Advances in Psychology, pages 29–80. North-Holland.
- Wickens, C. D. (1991). Processing resources and attention. *Multiple-task performance*, 1991 :3–34.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2) :159–177.
- Wickens, C. D. et Alexander, A. L. (2009). Attentional tunneling and task management in synthetic vision displays. *The International Journal of Aviation Psychology*, 19(2) :182–199.
- Wickens, C. D. et Carswell, C. M. (1995). The proximity compatibility principle : its psychological foundation and relevance to display design. *Human factors*, 37(3) :473–494.
- Wickens, C. D., Goh, J., Helleberg, J., Horrey, W. J., et Talleur, D. A. (2003). Attentional models of multitask pilot performance using advanced display technology. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 45(3) :360–380.
- Wickens, C. D. et Gopher, D. (1977). Control theory measures of tracking as indices of attention allocation strategies. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 19(4) :349–365.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., et Santamaria, A. (2015). Discrete task switching in overload : A meta-analyses and a model. *International Journal of Human-Computer Studies*, 79 :79–84.
- Wickens, C. D., Gutzwiller, R. S., Vieane, A., Clegg, B. A., Sebok, A., et Janes, J. (2016). Time sharing between robotics and process control validating a model of attention switching. *Human Factors*, 58(2) :322–343.
- Wickens, C. D., Sandry, D. L., et Vidulich, M. (1983). Compatibility and resource competition between modalities of input, central processing, and output. *Human factors*, 25(2) :227–248.
- Wiener, E. L. (1981). Complacency : Is the term useful for air safety. In *Proceedings of the 26th Corporate Aviation Safety Seminar*, volume 117.
- Wiener, E. L. et Curry, R. E. (1980). Flight-deck automation : Promises and problems. *Ergonomics*, 23(10) :995–1011.
- Wilson, J. R. (1998). *The effect of automation on the frequency of task prioritization errors on commercial aircraft flight decks : an ASRS incident report study*. PhD thesis, Oregon State University.
- Woodhead, M. M. (1966). An effect of noise on the distribution of attention. *Journal of Applied Psychology*, 50(4) :296.
- Woods, D. D. (1988). Coping with complexity : the psychology of human behaviour in complex systems. In *Tasks, errors, and mental models*, pages 128–148.

- Woods, D. D., Johannesen, L. J., Cook, R. I., et Sarter, N. B. (1994). Behind human error : Cognitive systems, computers and hindsight. Technical report, Dayton University Research Institute.
- Yechiam, E., Erev, I., et Gopher, D. (2001). On the potential value and limitations of emphasis change and other exploration-enhancing training methods. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 7(4) :277–285.
- Yeh, Y.-Y. et Wickens, C. D. (1988). Dissociation of performance and subjective measures of workload. *Human Factors*, 30(1) :111–120.
- Zeithamova, D. et Maddox, W. T. (2006). Dual-task interference in perceptual category learning. *Memory & cognition*, 34(2) :387–398.
- Ziv, G. (2016). Gaze behavior and visual attention : A review of eye tracking studies in aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 26(3-4) :75–104.

# APPENDICE



## AUTRE CONTRIBUTION

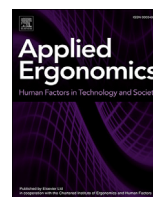
Ci-dessous, nous présentons un travail que nous avons débuté en stage de master, puis terminé et publié durant la thèse, dans la revue *Applied Ergonomics*.

### Résumé

Dans le domaine de l'aéronautique, certains auteurs ont suggéré qu'un dispositif de sonification de l'attitude de l'appareil pourrait être employé pour aider les pilotes à faire face aux situations de désorientation spatiale. De tels systèmes sont déjà utilisés par des pilotes malvoyants pour les aider à contrôler certains paramètres de l'aéronef « à l'oreille ». Toutefois, dans la mesure où ces populations disposent généralement de meilleures capacités attentionnelles auditives, il n'est pas évident que des pilotes voyants puissent utiliser facilement un tel système. Par exemple, son introduction dans l'environnement du cockpit pourrait surcharger leur canal auditif, ce qui, en retour, pourrait altérer leur sensibilité à des alarmes auditives rares. Dans cette étude, deux groupes de pilotes (voyants *et* malvoyants) devaient réaliser des manœuvres de vol, en simulateur, sur la seule base d'indications auditives (sonification). Les manœuvres étaient de difficultés variées, et les performances de vol étaient enregistrées, ainsi que des mesures électroencéphalographiques et subjectives, dans la charge de travail. Les résultats ont montré que les deux groupes de participants sont parvenus à réaliser les manœuvres avec une bonne précision. Toutefois, l'augmentation de la difficulté des manœuvres s'accompagnait d'une augmentation de la charge de travail ressentie, ainsi que d'une diminution des réponses cérébrales spécifiques, relatives au traitement de stimuli auditifs inattendus – ce qui se traduisait par une diminution des potentiels évoqués N1 et P3 pour ces stimuli. Et dépit d'une réorganisation fonctionnelle du cerveau des participants malvoyants (puissance de la bande alpha plus élevée dans le cortex occipital), nous n'avons pas observé de différence des potentiels évoqués entre les deux groupes de participants. Ces résultats suggèrent qu'un dispositif de sonification pourrait fournir une information supplémentaire utile aux pilotes faisant face à des épisodes de désorientation spatiale. Toutefois, cet usage devrait se limiter aux situations les plus critiques, et aux manœuvres de vol les plus simples (p.ex., retour en palier).







## Can an aircraft be piloted via sonification with an acceptable attentional cost? A comparison of blind and sighted pilots



Benoît Valéry <sup>a, b, \*</sup>, Sébastien Scannella <sup>b</sup>, Vsevolod Peysakhovich <sup>b</sup>, Pascal Barone <sup>c</sup>, Mickaël Causse <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Ecole Nationale de l'Aviation Civile, 7, Avenue Edouard-Belin, 31055, Toulouse, France

<sup>b</sup> Institut Supérieur de L'Aéronautique et de L'Espace, DCAS, Human Factors, 10, Avenue Edouard-Belin, 31055 Toulouse Cedex 4, Midi-Pyrénées, France

<sup>c</sup> Centre de Recherche Cerveau & Cognition, UMR 5549, CNRS, Toulouse, France

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 27 July 2016

Received in revised form

22 February 2017

Accepted 2 March 2017

#### Keywords:

Auditory display

Spatial disorientation

Irrelevant-probe technique

### ABSTRACT

In the aeronautics field, some authors have suggested that an aircraft's attitude sonification could be used by pilots to cope with spatial disorientation situations. Such a system is currently used by blind pilots to control the attitude of their aircraft. However, given the suspected higher auditory attentional capacities of blind people, the possibility for sighted individuals to use this system remains an open question. For example, its introduction may overload the auditory channel, which may in turn alter the responsiveness of pilots to infrequent but critical auditory warnings. In this study, two groups of pilots (blind versus sighted) performed a simulated flight experiment consisting of successive aircraft maneuvers, on the sole basis of an aircraft sonification. Maneuver difficulty was varied while we assessed flight performance along with subjective and electroencephalographic (EEG) measures of workload. The results showed that both groups of participants reached target-attitudes with a good accuracy. However, more complex maneuvers increased subjective workload and impaired brain responsiveness toward unexpected auditory stimuli as demonstrated by lower N1 and P3 amplitudes. Despite that the EEG signal showed a clear reorganization of the brain in the blind participants (higher alpha power), the brain responsiveness to unexpected auditory stimuli was not significantly different between the two groups. The results suggest that an auditory display might provide useful additional information to spatially disoriented pilots with normal vision. However, its use should be restricted to critical situations and simple recovery or guidance maneuvers.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Sonification is commonly defined as the systematic, reproducible, and objective data-dependent generation of non-speech sounds (Kramer et al., 1999; Hermann et al., 2011). It aims to provide an auditory representation of data in order to convey meaningful information from a dataset to a listener via an auditory display (or sonic interface). Any sonification system must meet certain criteria: the sound has to reflect properties and/or relations in the input data; interactions between data and sound must be accurately defined; it must be reproducible, i.e. two identical

datasets must produce structurally identical sounds and it must allow the processing of various datasets (Hermann, 2008). Sonification techniques have been employed in various application areas such as exploration of data (Delogu et al., 2010; Degara et al., 2014; Rutz et al., 2015), process monitoring (Neuhoff et al., 2000; Hermann et al., 2003) or assistive technology for the visually impaired (Kay, 1974; Edwards, 1989; Auvray et al., 2007; see Roentgen et al., 2008 for a review). In all these situations, sonification is generally needed since the continuous monitoring of critical visual information might be impossible due to attentional (e.g., vision is necessarily engaged in another direction) or sensory limitations (e.g., visual impairment).

In aeronautics, such a sonification system, namely the sound-flyer, is currently used by visually impaired people. This embedded system operates the sonification of two dimensions of the aircraft attitude, i.e. its pitch and its bank angles. The pitch angle of an aircraft corresponds to the angle between its longitudinal axis

\* Corresponding author. Institut Supérieur de L'Aéronautique et de L'Espace, DCAS, Human Factors, 10, Avenue Edouard-Belin, 31055 Toulouse Cedex 4, Midi-Pyrénées, France

E-mail address: [benoit.valery@isae.fr](mailto:benoit.valery@isae.fr) (B. Valéry).

and the horizontal plane. For instance, when an aircraft's nose is up, its pitch angle value is positive. The bank angle of an aircraft corresponds to the angle between its wings (or its lateral axis) and the horizontal plane, when viewed from the rear. The sound-flyer sonification consist in modulating the features (i.e. frequency, rhythm, inter-aural balance) of a sinusoidal pure tone which is continuously displayed to the pilot via his headphones. The pitch of the aircraft is rendered by the frequency of the pure-tone sound and the bank angle is rendered by the conjunction of the rhythm and the inter-aural balance of the sound (see section 2.2, for more details). The sound-flyer also contains a vocal module: upon request via a customized keyboard, speech synthesis can read aloud important flight parameters such as altitude, speed, vertical speed, and so on. Thanks to this system, visually impaired pilots gain monitoring and decision-making autonomy in the cockpit; they have less need to communicate with their co-pilot to access aircraft parameters. Beside the successful development of this system, used by blind pilots in real situations, laboratory studies have suggested that auditory displays could also be used by sighted pilots to exert some control over the attitude of their aircraft or to follow a given route (DeFlorez, 1936; Lyons et al., 1990; Brungart and Simpson, 2008). In particular, Brungart and Simpson (2008) have proposed that it could favor the orienting of the aircraft during spatial disorientation episodes, which are responsible for numerous fatal aviation accidents (Newman, 2007).

### 1.1. Facing spatial disorientation in the cockpit

Spatial disorientation occurs when a pilot is unable to determine the spatial position of the aircraft relative to the surface of the earth, because incomplete or competing information are coming from his visual, vestibular or proprioceptive systems (Benson, 1999). In the worst case, the compelling dimension of this perceptual conflict can lead pilots to neglect and mistrust their visual instrumentation. As such, it has been proposed that auditory redundancy of the aircraft attitude (e.g., the pitch and the bank values) could represent a valuable safety net against spatial disorientation (Brungart and Simpson, 2008). It would provide additional non-visual cues of the aircraft attitude and could help to overcome such perceptual conflicts. However, given the suspected higher auditory attentional capacities of blind people, the possibility for sighted individuals to use a sonification system remains an open question. One has to ensure that its use would remain acceptable for the auditory attentional capacities of sighted pilots, as highlighted in the Sonification Report (Kramer et al., 1999). In other words, in the context of a usability analysis, it is worth assessing whether the processing of a sonification system can interfere with other critical operations. In particular, it should not alter the ability of the brain to remain distractible (i.e. responsive to stimuli unrelated to the task at hand), especially in the cockpit where rare but possible critical auditory warnings may occur.

### 1.2. Auditory attention and visual impairment

There is a large body of evidence showing that the loss of vision or audition induces compensatory mechanisms in the remaining sensory modalities (Merabet and Pascual-Leone, 2010). Psychophysical and neuroimaging studies in both animal and human subjects have demonstrated that sensory deprivation from early developmental stages leads to functional reorganization of the brain that favors the spared modalities (Rauschecker, 1995). Such crossmodal compensation of perception is accompanied by functional reorganizations (Kujala et al., 2000) expressed as a colonization of the deprived cortical areas by the remaining modalities. In humans, brain imaging studies in blind individuals have revealed

that the deprived visual cortex can be activated by auditory or tactile inputs (Sadato et al., 1996; Cohen et al., 1997; Weeks et al., 2000; Röder et al., 2002; Renier et al., 2013) thus reducing its alpha (8–12 Hz) oscillatory activity (Noebels et al., 1978; Leclerc et al., 2005; Kriegseis et al., 2006), indexing its idling state (Başar et al., 1997). Moreover, cross-modal compensation in blind people is strongly suspected to favor selective or divided auditory attention (Kujala et al., 1997; Collignon et al., 2006). For instance, Kujala et al. (1995), in an auditory-tactile task, showed that cerebral reaction to unexpected auditory events was less attention-dependent in the blind compared with the sighted. Participants in their study were presented with deviant (10%) and standard (90%) stimuli for each sensory modality. Standard and deviant stimuli differed from one another in their spatial locus of origin. They were asked to count the number of deviant stimuli for a specific sensory modality (auditory or tactile) and to ignore the ones in the other modality. Event-related potentials (ERP) for frequent and rare stimuli were recorded for the attended and the unattended sensory modalities. The results showed that the mismatch negativity component (indicative of the automatic cerebral reaction to deviant stimuli) was greater for the blind subjects compared with the sighted—*whether these stimuli were attended to or not*.

These results suggest that in cross-modal situations, blind individuals could exhibit better performance at auditory processing and might be less impaired in their ability to process additional unexpected stimuli. However, in the context of the present study, these results have to be qualified for at least two reasons. First, these studies were carried in very fundamental frameworks and do not allow to predict the effects of cross-modal compensations in more ecological situations. Indeed, many other factors such as task complexity or expertise, might interfere. Then, blind-sighted differences are often observed in response times (Kujala et al., 1997; Collignon et al., 2006) or in mismatch negativity amplitudes (e.g., Kujala et al., 1995), but not in accuracy level (see Collignon et al., 2006, p.177, for instance). Yet, in ecological situations one might find that performance is better defined by response accuracy than by a 100 ms reaction time difference. Thus, although cross-modal compensation in blind subjects is beyond doubt, it remains difficult to draw a straight prediction regarding its consequences on subjects performance, in an ecological piloting situation – which reinforces the importance of the present investigation.

### 1.3. The irrelevant auditory probe technique

In order to evaluate the cognitive demand of a task, one might probe the participant with a secondary task (Wickens, 1991). For instance, the participant can be asked to pay attention to a specific stimulus in a sound stream while performing a primary task (see Giraudet et al., 2015a for a recent example). Generally, performance of the irrelevant secondary task is thought to reflect the amount of resources left by the task of interest, thus indicating its ongoing demand (Wickens et al., 1983). This has been largely corroborated at the cerebral level, where some ERP components were found to be sensitive to the amount of available resources (Giraudet et al., 2015a). In particular, the N1 and the P3 components elicited by primary and secondary tasks stimuli often vary in amplitude, as a function of perceptual and central processing resources respectively (Kok, 2001), thus providing a valuable workload index. However, as the secondary-task method forces the participant to perform an additional irrelevant task, it can penalize mental workload assessment and interpretation. Not only does it increase the overall workload, but it can interfere with the primary task, resulting in an artificial decrease in performance at the task of interest (Ullsperger et al., 2001). Furthermore, in a real flight context, one might want to assess mental workload without disturbing the

natural course of the operator's activity.

To address these limits, Papanicolaou and Johnstone (1984) proposed the “irrelevant-probe technique”. In this paradigm, participants are probed with standard (frequent) and deviant (rare) sounds but do not have to respond to them. Assuming that available resources are automatically devoted to additional stimuli processing, ERP amplitudes reflect the amount of remaining processing resources (Kramer et al., 1995; Ullsperger et al., 2001; Allison and Polich, 2008; Sugimoto and Katayama, 2013). In particular, P3 amplitude for deviant compared to standard sounds is supposed to be related to shifts of attention toward unexpected events, even those not requiring an explicit response (see for example Harmony et al., 2000). Allison and Polich (2008) showed that, during a difficulty-varied video-game, most ERP component amplitudes (P2, N2 and P3) for rare tones decreased as the difficulty of the video-game increased, whether this rare tone had to be focused on or not. Interestingly, not only ERP amplitudes give indication on available attentional resources, but a recent study suggests that they can predict the participant's awareness of an auditory stimulus. For example, Giraudet et al. (2015a,b) showed that the amplitude of the P3 was correlated with the ability of participants to respond to rare target sounds during a simulated piloting task. This inability to perceive auditory stimuli has been called “inattentional deafness” (Dehais et al., 2014; Giraudet et al., 2015b).

#### 1.4. Experimental objectives and hypotheses

The present study aimed to assess the possibility of extending the use of the sound-flyer, initially designed to help blind pilots keep their aircraft in a neutral attitude (wings flat), to sighted pilots who might be helped by the system to perform maneuvers during spatial disorientation episodes. Given the suspected higher auditory attentional capacities of blind people, we examined if the use of the sound-flyer by sighted individuals did not overload the auditory channel, which may in turn alter their responsiveness to rare but possible critical auditory warnings, especially when maneuvers are more complex. Two groups of pilots (blind and sighted) were recruited and had to perform precise maneuvers (e.g., “turn left 5°”) that varied in difficulty, on the sole basis of the auditory information provided by the sound-flyer. We conducted behavioral measurements of the flight performance along with subjective (NASA-TLX) assessment. Following a neuroergonomic approach (Parasuraman, 2003), we also evaluated the potential deleterious impact of the sound-flyer on the brain responsiveness to task-unrelated auditory stimuli using the irrelevant auditory-probe technique, presented hereafter.

We hypothesized that increased difficulty maneuvers may decrease maneuver precision and increase the subjective difficulty. We also hypothesized that difficult maneuvers may reduce the responsiveness of the brain to the task-unrelated auditory stimuli. Finally, we hypothesized that the blind group should also demonstrate a higher alpha power, indexing the functional reorganization of their brain. This functional reorganization may result in higher maneuver precision and a higher responsiveness to the sounds.

## 2. Methods

### 2.1. Participants

Two groups consisting of 9 visually impaired (mean age  $44.3 \pm 12.5$  years) and 8 sighted pilots (mean age  $35.8 \pm 15.6$  years) were recruited from French aeroclubs. Before the experiment, all pilots signed a consent form. This consent form was read to the blind participants. To prevent any use or interference from the visual sense, even with residual capacities, all participants were

blindfolded. The research was carried out fulfilling ethical requirements in accordance with the standard procedures of the University of Toulouse. Before the experiment, we tested participants for their auditory acuity using AudioConsole software and Silento Supermax headphones. All of them showed normal hearing thresholds (between 0 and 10 dB).

### 2.2. The sound-flyer

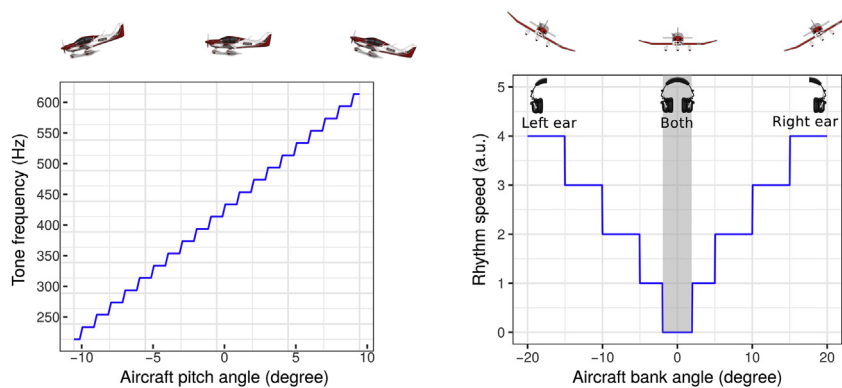
Aircraft sonification was supported by a simplified version of the sound-flyer developed by Thales (France). The sonification consisted in modulating a sinusoidal pure-tone as a function of the aircraft attitude that was a combination of the roll pitch angles of the aircraft. The roll angle (or bank) corresponded to the aircraft position about the longitudinal axis, positive with the right wing down. The pitch angle corresponded to the aircraft position about the lateral axis, positive with nose up. The aircraft pitch angle was positively correlated with the pure-tone frequency. An increase of one degree of the aircraft pitch angle engendered an increase of 20 Hz of the frequency of the pure-tone, and conversely for a decrease. The aircraft roll angle was transposed by the inter-aural balance and the rhythm of the tone. As the aircraft turned left/right, the pure-tone moved progressively from the center ( $0^\circ$ ) to the left/right ( $2^\circ$ ) of the auditory scene. Moreover, the rhythm of repetition of the pure-tone got faster every  $5^\circ$ . This setup did not allow the monitoring of bank in-between values since a particular rhythm was applied for a range of  $5^\circ$ . As a consequence, in-between values (e.g. a bank of seven degrees) were excluded from instructions, to avoid artificial decrease in performance (Fig. 1).

An added RB-530 Cedrus response box allowed participants to request vocal indication on the real pitch and bank current values. It was placed on the right-hand of the participant (Fig. 2). This device was used to help the participant during the training session. Its use was not allowed during the test session, except between two maneuvers, in order to help to recover a straight and level flight.

### 2.3. The aviation task

The experiment took place aboard the 3-axis motion (roll, pitch, and height) PEGASE flight simulator (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, France; Fig. 2). The task consisted in performing successive precise maneuvers on the sole basis of the sound-flyer information. Each maneuver consisted in attaining a precise aircraft attitude starting from a neutral position (pitch and bank angles  $\approx 0^\circ$ ). Three levels of difficulty were created, according to the number of parameters to apply. In the low-difficulty condition, the subject had to maintain a neutral attitude (baseline condition). In the medium-difficulty condition, the target-attitude was defined by either a pitch or a bank value; in this condition, the irrelevant parameter had to be ignored. In the high-difficulty condition, the target-attitude was defined by a pitch and a bank value. Irrelevant sound features were not removed from the auditory scene so that the auditory information remained equivalent across the three difficulty levels.

Target attitudes were presented to the participant at the onset of each trial by means of a synthetic voice. Pitch-target values were selected among  $\pm 3^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$  or  $\pm 10^\circ$ . Bank-target values were chosen among  $\pm 5^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$ ,  $\pm 20^\circ$ , negative values being left-side maneuvers. Each instruction had the structure of the following example: “Next maneuver. Make a turn of five degrees to the left”. On average, participants had 41 s to apply the instruction and reach the target attitude as best as they could. This duration varied slightly because of the time jitter ( $800 \pm 400$  m) between two irrelevant-probe stimulations. Once the synthetic voice had indicated the end of the maneuver, participants had 20 s to recover to a straight and



**Fig. 1.** The sound-flyer functioning. (A) Relationship between the aircraft pitch angle and tone frequency. (B) Relationship between the aircraft bank angle and the tone rhythm; as the aircraft turns left/right, the tone moves progressively from the center ( $0^\circ$ ) to the left/right ( $2^\circ$ ) of the auditory scene.

level flight and wait for the following maneuver. During this recovering phase, they were allowed to use vocal information if they wanted to, in order to reach the neutral attitude faster and more accurately. The performance of the participants was not recorded during this recovering phase.

#### 2.4. Irrelevant auditory probe stimuli

Irrelevant-probe stimulation consisted in frequent (90%) and rare (10%) syllables (/Ta/or/Ti/) of 189 ms. We used syllables instead of sinusoidal tones to avoid frequency masking between the sound-flyer and the irrelevant probes. Given the passive paradigm, the a priori proportions (90-10) of the syllables were selected to maximize the probability of eliciting components of larger amplitude (Duncan-Johnson and Donchin, 1977). Each difficulty condition included a total of 27 rare and 143 frequent probes, as the averaging of more than 20 trials is often needed to elicit a component precisely (see Cohen et al., 1997 for an example with the P3). Time interval between two syllables ranged between 800 and 1200 ms (time jitter). Each probe sequence was randomly generated on a trial-to-trial basis, with two successive rare probes being separated by at least two frequent probes. Frequency-syllables mapping (e.g. rare-/Ti/or rare-/Ta/) was counterbalanced across subjects. Instructions and irrelevant auditory-probes stimuli were mixed with the sound-flyer sonification via a Gemini PS-540i mixing table. The resulting auditory scene was delivered to the participant in intra-auricular headphones.

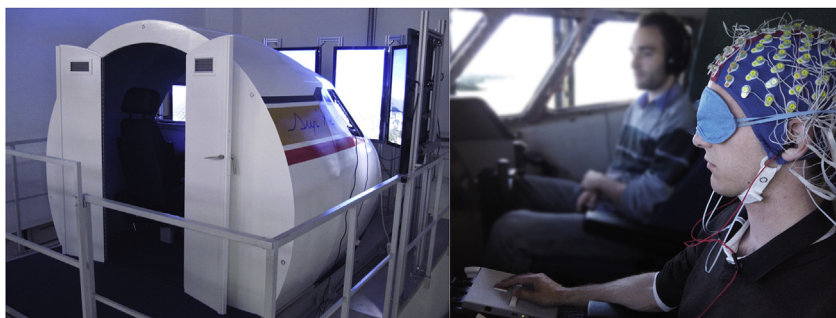
#### 2.5. EEG recording and processing

Electroencephalographic (EEG) data was recorded with a 128-

channel Active Two Biosemi system, at a 2048 Hz sampling rate and decimated at 512 Hz before further processing using EEGLAB (version 13.4.4.b, Delorme and Makeig, 2004). The signal was re-referenced to the average of the left and right mastoids, and filtered with a band-pass of 0.2–40 Hz. For each subject, noisy channels were removed and interpolated ( $M = 4.31$ ,  $SD = 2.5$ ). We then rejected noisy portion of data by visual inspection of the continuous signal. This led to rejecting an average of 10.9% ( $se = 0.02$ ) of deviant events and 10.5% ( $se = 0.02$ ) of standard events. An independent component analysis (ICA) was performed on each dataset to identify and reject ocular artefacts (Vigário, 1997; Jung et al., 1998). This technique is commonly accepted as a reliable tool to extract ocular artefacts from EEG signal (Jutten and Hérault, 1991), even in the blind who are known for presenting much higher quantity of eye movements and more variability across subjects (Flexer et al., 2005). Cleaned data was then segmented in 900 ms epochs with a 100 ms pre-stimulus baseline.

#### 2.6. Procedure

After having signed a consent form, participants were given instructions for the experiment while we equipped them with the 128-channel EEG. They were equipped with the blindfold and the intra-auricular headphones. Participants were told they would have to reach precise aircraft attitudes, on the sole basis of auditory non-speech information. They were then explained the sound-flyer mechanics, i.e. the relationship between the aircraft attitude and the variation of the sound. After that, all the participants were given two training sessions. During the first session, they were instructed to use the sound-flyer freely and to focus on the relationships between the aircraft attitude and the sonification. Since the pilot



**Fig. 2.** The experimental setup. On the left, the flight simulator. On the right, a participant with the electroencephalographic installation, the intra-auricular earphones and the Cedrus response box.



could not rely on visual input, they had to use the vocal module if they wished to obtain accurate information on the aircraft attitude. In the second training session, the pilots had to achieve sixteen maneuvers of the three difficulty levels. During this session, instructions were provided in the same form as in the following test session. The use of the vocal module was allowed only during these two training sessions. Participants were then informed that the test session would be similar, apart from a few different details. First, they were told that irrelevant sounds would be added to the auditory scene and that they must ignore them and focus on the piloting task. They were also reminded that any use of the vocal module during a test maneuver would automatically discard the trial and that they were only allowed to use it during the recovering phase, i.e. between two trials. For the medium-difficulty level, participants were instructed to ignore the irrelevant parameter. For instance, if the maneuver was to attain a certain bank value, participants had to ignore the pitch parameter, as their performance would be computed on the sole basis of the bank parameter.

The test session was divided into twenty blocks. The first and last blocks were low-difficulty (baseline). The other 18 blocks alternated between medium and high-difficulty conditions. For the low difficulty condition, as the participants had nothing to do but maintain a level flight, we assumed that two repetitions (see Fig. 3) of this condition were sufficient to provide an accurate measure of the participant's behavior. Over the whole test session, each difficulty condition (low, medium, high) included a total of 27 deviant and 243 standard syllables. During the medium and high difficulty blocks, participants were given a break for 15 s after each of the six blocks. At the end of the test session, the EEG and the blindfold were removed from the participants and they were submitted to a French paper and pencil version (Cegarra and Morgado, 2009) of the NASA-TLX (Hart and Staveland, 1988) to evaluate subjective workload for each difficulty level. On average, a session lasted 2 h and a half (Fig. 3).

### 2.7. Data analyses

Statistical analyses were performed using R (3.2.4). The significance level was set at 0.05. When needed, statistical outputs were corrected for violation of sphericity with the Greenhouse Geiser method. The overall subjective workload consisted of the average of all dimension scores. A mixed analysis of variance (ANOVA) was carried out on this score, with difficulty as the repeated measure (low vs medium vs high) and group as the between factor (blind vs sighted). Error was computed as the mean difference between the aircraft and the target positions for the relevant parameters. For instance, when the target position was defined only by a bank value, the pitch was not included in the error computation, as the participants were explicitly allowed to ignore it. This error computation only concerned the five last seconds of each maneuver to discard some strategical effects. For instance, in the high-difficulty condition, some participants considered the two sound features sequentially, processing the two parameters one after the other. Therefore the performance corresponded to the ability to

have reached a given parameter value at the end of the trial, whatever the participant strategy. The resulting values were submitted to a mixed ANOVA with difficulty as a repeated measure (low vs medium vs high), the error dimensions as a repeated measure (pitch vs bank) and group as the between factor (blind vs sighted).

For each subject, a maximum peak amplitude ( $\mu\text{V}$ ) was computed for the N1, the P2 and the P3 components, from the three midlines sites (Fz, Cz and Pz). Fz, Cz and Pz were chosen for analysis because N1, P2 and P3 responses are typically largest on the midline locations, probably due to the fact that midline electrodes pick up both left and right hemisphere activity. This is in line with several studies which have presented recordings of midline electrodes only when examining the N1 (Kramer et al., 1995; Ullsperger et al., 2001), the P2 (Miller et al., 2011) or the P3 components (Polich, 2007). Peak amplitude was defined as the maximum negative/positive value in a given time window, the size of which was large enough to ensure correct peak detection for all subjects. Time windows were defined by visual inspection of grand averages, following the procedure given by (Handy, 2005). The N1 time-window ranged from 80 to 140 ms; the P2 time-window ranged from 200 to 260 ms and the P3 time-window ranged from 340 to 410 ms. The 30 data points ( $\approx 60$  ms) surrounding the maximum peak amplitude point were averaged, resulting in a mean peak amplitude for each component. The mean peak amplitudes were submitted to a mixed ANOVA, with electrode (Fz vs Cz vs Pz), difficulty (low vs medium vs high), frequency (standard vs deviant) as the repeated measures and group (blind vs sighted) as the between factor. When needed, analyses were completed with a Tukey's HSD post-hoc. Alpha spectral power was computed as the mean spectral power for the common alpha band frequency (8–12 Hz), from O1 and O2 leads electrodes of the occipital area, where the alpha spectral-power is typically highest (Williamson et al., 1997). The resulting variable was submitted to a mixed ANOVA, with electrode (O1 vs O2), difficulty (low vs medium vs high) and frequency (standard vs deviant) as the repeated measures, and group (blind vs sighted) as the between factor.

## 3. Results

### 3.1. Spectral alpha-band power

There was a main effect of the group over the alpha spectral power ( $10 \times \log_{10}(\mu\text{V}^2)$ ),  $F(1,15) = 9.84$ ,  $p = 0.007$ ,  $\eta_p^2 = 0.40$ , meaning that the sighted group presented greater spectral power ( $M = 58.83$ ,  $SEM = 0.57$ ) than the blind group ( $M = 52.12$ ,  $SEM = 0.26$ ; Fig. 4). Likewise, there was a main effect of the difficulty over the alpha spectral power,  $F(2,30) = 3.43$ ,  $p = 0.041$ ,  $\eta_p^2 = 0.005$ , such that the low difficulty condition triggered a greater spectral power ( $M = 55.65$ ,  $SEM = 0.63$ ) than the medium ( $M = 55.27$ ,  $SEM = 0.68$ ) and the high ( $M = 54.92$ ,  $SEM = 0.68$ ) difficulty conditions. Notably, only the low-high difference was significant ( $d = 0.73$ ,  $p = 0.014$ ).

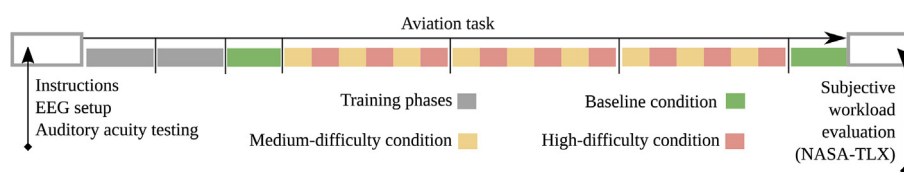


Fig. 3. The experiment timeline. Each solid vertical line represents a break given to the participant.

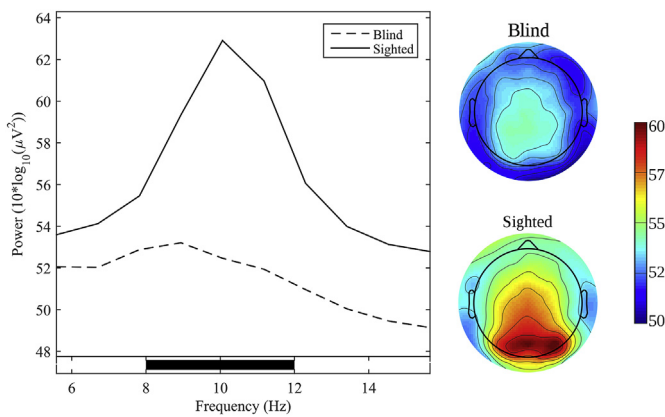


Fig. 4. Alpha spectral power topography as a function of the group. Blind–sighted difference was significant over the 8–12 Hz range.

### 3.2. Behavioral results

#### 3.2.1. Performance

For the error index, we obtained a two-way interaction between the type of axis (bank vs pitch) and the difficulty level,  $F(2,30) = 26.58$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.16$ , such that the pitch-bank difference was smaller in the low-difficulty condition ( $d = 0.96$ ,  $p = 0.19$ ) than in the medium ( $d = 1.58$ ,  $p = 0.003$ ) and the high-difficulty condition ( $d = 2.58$ ,  $p < 0.001$ ). This was mainly due to an error increase for the bank parameter in the medium ( $M = 3.66$ ,  $SEM = 0.60$ ) and the high ( $M = 4.60$ ,  $SEM = 0.45$ ) conditions, compared to the low difficulty condition ( $M = 0.32$ ,  $SEM = 0.14$ ). In contrast, the error for the pitch parameter remained somewhat constant across the three difficulty conditions (Fig. 5). Notably, there was no significant difference between the medium and the high-difficulty conditions both for the pitch ( $d = 0.06$ ,  $p = 0.99$ ) and the bank ( $d = 0.94$ ,  $p = 0.21$ ) parameters. Finally, there was no main effect of the group ( $p = 0.42$ ,  $\eta_p^2 = 0.03$ ) nor interaction effect between the group and the type of axis ( $p = 0.61$ ,  $\eta_p^2 = 0.002$ ).

#### 3.2.2. Subjective workload

The interaction between the difficulty and the group to explain the NASA-TLX scoring variance did not exceed the significance threshold,  $F(2,30) = 3.07$ ,  $p = 0.061$ ,  $\eta_p^2 = 0.06$ . In other words the

difficulty effect, whose size was large ( $\eta_p^2 = 0.60$ ), seems not to have been affected by the group factor. However, this  $p$  value indicates a trend toward significance, that can be due either to the small size of the two samples or the unequal  $N$  per group. Furthermore, pairwise comparisons revealed that the sighted group was more sensitive to the medium-high difference than the blind group. More precisely, the sighted group gave a significantly higher score to the high compared to the medium condition ( $p = 0.006$ ), while the blind group scorings were considered equivalent for these two conditions ( $p = 0.078$ ). Regardless of the group, the low-medium comparisons always triggered a significant difference ( $p = 0.011$ ), with the low condition triggering a lower score than the medium condition (Fig. 6).

### 3.3. Event-related potentials

#### 3.3.1. N1 peak amplitude

Event-related grand averages are presented in (Fig. 7). A two-way interaction was obtained between the difficulty level, the syllable frequency and the electrode location,  $F(4,60) = 3.85$ ,  $p = 0.017$ ,  $\eta_p^2 = 0.20$  (Fig. S2). At the Fz location, the N1 peak amplitude remained equivalent across the three difficulty levels for the standard syllables ( $p > 0.99$  for the 3 pairwise comparisons) whereas the deviant syllables elicited significantly smaller amplitudes in the high than in the low-difficulty conditions ( $p = 0.025$ ). Low-medium and medium-high differences for the deviant syllables were not significant ( $p > 0.34$  for the two pairwise comparisons).

At the Cz location, where the N1 amplitudes were the largest, the N1 amplitude for the standard syllables ( $M = -1.70$ ,  $SEM = 0.22$ ) did not significantly vary across the three difficulty conditions ( $p > 0.99$  for the 3 pairwise comparisons). Seemingly, it did not vary for the deviant syllables ( $M = -3.01$ ,  $SEM = 0.37$ ,  $p > 0.79$  for the 3 pairwise comparisons). Plus the standard-deviant differences were not significant for any difficulty level ( $p > 0.13$  for the 3 pairwise comparisons). There were no significant difference to report at the Pz location site. Notably, the N1 component was centrally distributed over the scalp. Finally, there was no main nor interaction effect of the group over the N1 amplitude.

#### 3.3.2. P2 peak amplitude

No two-way nor one-way interactions were obtained for the P2 peak amplitude. Only the electrode location had a main effect over

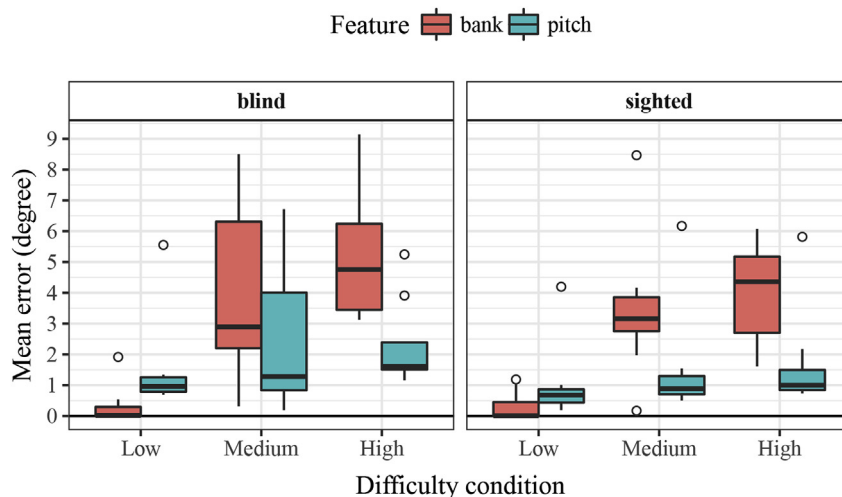


Fig. 5. Mean error (in degree) as a function of the difficulty level and the considered parameter (pitch vs bank).

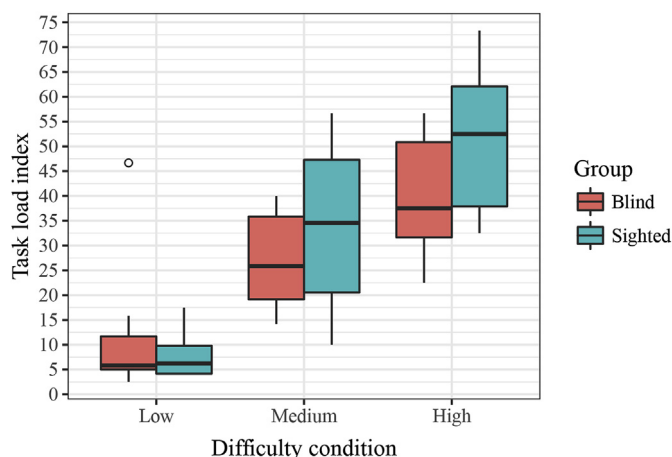


Fig. 6. Task Load scorings as a function of the group and the difficulty level.

the component maximum amplitude,  $F(2,30) = 20.64$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.58$ , with the Fz ( $M = 3.23$ ,  $SEM = 0.25$ ) and the Cz ( $M = 3.17$ ,  $SEM = 0.27$ ) eliciting larger peak amplitudes than the Pz location ( $M = 1.58$ ,  $SEM = 0.21$ ). The Pz-Fz difference was significant ( $d = 1.65$ ,  $p < 0.001$ ), like the Pz-Cz difference ( $d = 1.59$ ,  $p < 0.001$ ). Conversely, there was no significant difference between the Fz and the Cz locations ( $d = 0.06$ ,  $p = 0.97$ ). This resulted in a fronto-central distribution of the positivity illustrated by a scalp map topography. There was no main nor interactional effect of the group over the P2 peak amplitude.

### 3.3.3. P3 peak amplitude

For the P3 we obtained two distinct two-way interactions. First, there was an interaction between the difficulty level and the syllable frequency,  $F(2,30) = 3.79$ ,  $p = 0.034$ ,  $\eta_p^2 = 0.20$ , such that globally, the standard-deviant difference was significant in the low-difficulty condition ( $d = 2.85$ ,  $p < 0.001$ ) but not in the medium ( $d = 1.19$ ,  $p = 0.10$ ) nor in the high-difficulty ( $d = 1.03$ ,  $p = 0.22$ ) conditions. This was due to a global decrease of the P3 peak amplitude for the deviant syllables in the medium and the high-difficulty conditions (Fig. S2). Secondly, there was an interaction between the difficulty level and the electrode location,  $F(4,60) = 4.92$ ,  $p = 0.008$ ,  $\eta_p^2 = 0.25$ , such that as the difficulty increased, the P3 peak amplitude tended to increase at the Fz location but not at the Cz nor the Pz locations where it tended to decrease. However, post-hoc analysis revealed that none of the low-medium, low-high or medium-high differences was significant, at any location site ( $p > 0.36$  for the 9 pairwise comparisons). Finally there was no significant three-way interaction to report, plus the group had no main nor interactional effect.

## 4. Discussion

The present study aimed to assess the usability of sonification in the cockpit, especially in sighted pilots who might suffer from spatial disorientation. First, we evaluated the ability of the pilots to use this auditory display to perform flight maneuvers that varied in difficulty. In order to index the cerebral functional reorganization ensuing the visual deprivation in the blind group, we measured the alpha spectral power related to the occipital area. Then, we tested if the use of such an auditory display impaired auditory attention toward other auditory rare events, i.e. preservation of brain distractibility toward unexpected sounds (e.g. alarms), especially when task load was high.

The results showed that more challenging maneuvers decreased

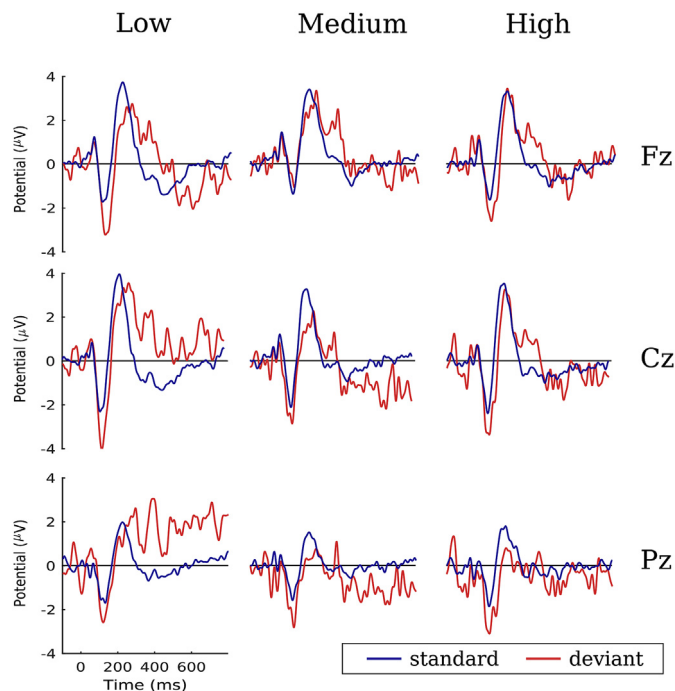


Fig. 7. ERP grand averages for Fz, Cz and Pz as a function of the difficulty level and the syllable frequency.

maneuver precision and increased the subjective difficulty. The increased difficulty maneuver reduced the responsiveness of the brain to the task-unrelated auditory stimuli. Despite the fact that the blind group demonstrated a higher alpha power, indexing the functional reorganization of their brain, we find neither better performance nor a higher responsiveness to the irrelevant probes in this group in comparison to the sighted pilots.

### 4.1. Usability under various difficulty levels

We evaluated how the level of difficulty of the manipulation would impact the usability of the sound-flyer in terms of performance and responsiveness to irrelevant auditory probes. Performance for the low-difficulty condition differed significantly from the other two difficulty conditions, especially for the bank parameters the error of which increased along with the demand. On the other hand, there were no differences in performance between the medium and the high difficulty conditions, although participants reported a greater subjective workload for the high than for the medium difficulty condition. This is not surprising since during resource-limited tasks, performance and subjective measures of workload can be dissociated, especially when resource demand is much less than the total resources available (“underload” situation, Yeh and Wickens, 1988). Furthermore, it is commonly assumed that subjective workload is strongly related to the amount of resources that are invested in the task, in particular the amount of information held in working memory (Navon and Gopher, 1979; Yeh and Wickens, 1988). Thus, we assume that in our high-difficulty condition, participants invested more (available) resources to prevent performance decrement, hence reporting a greater subjective workload for this condition while maintaining equivalent performance. The decrease in performance for the bank parameter can be attributed to a difference in the resolution provided by the sound-flyer. As explained in the introduction, the same rhythm is applied for a range of five bank degrees (e.g., from  $5^\circ$  to  $10^\circ$ ), making it difficult to have the same accuracy as for the pitch parameter. Thus,

we can advance that this decrease in performance was partly due to the sonification itself.

Then, it was found that, under the irrelevant-probe stimulation (Papanicolaou and Johnstone, 1984) both the N1 and the P3 components were sensitive to the difficulty manipulations. The N1 amplitude was mainly impacted by the syllable frequency, and was affected by the difficulty level at the sole Fz location. For instance, at Fz, there was almost no difference in the N1 amplitude between the deviant and the standard syllables for the most difficult condition. Regarding the P3, increasing the difficulty led to a decreased amplitude solely for the deviant syllables. The P3 component is commonly decomposed into a P3a and a P3b subcomponents. The P3a (or novelty P3) has generally a frontocentral distribution and is elicited by novel, non-target stimuli, reflecting involuntary orientation of attention toward stimulus novelty. The P3b is associated with the potential further processing of the attention-driven stimulus, in the temporal and parietal structures (Squires et al., 1975; Polich, 2007). During the aviation task, participants did not have to overtly respond to the syllables. Thus, it is likely that the P3 amplitude modulation that we observed here was attributable to its P3a subcomponent. Finally, the P2 component was not affected by the difficulty level nor by the syllable frequency such that, following Kenemans et al. (1992), we suggest that P2 and P3 reflect distinct stages of attention orienting to deviant irrelevant probes in which only the latter P3 process is capacity-limited. These results suggest that automatic auditory change detection can be affected by the auditory demand of the task at hand (Berti and Schröger, 2003; Harmony et al., 2000) and come to complete previous evidence that an increase in mental workload can affect information processing, at early and late stages (Parasuraman, 1980; Kramer et al., 1995; Ullsperger et al., 2001). This was reflected by a decreased P3 amplitude for the deviant tones for the more difficult conditions. As for the N1, it is possible that, as the syllables were totally irrelevant to the task, an increase in the primary task load led to a diminishing of the sensory gating for the non-focal irrelevant sounds, then leading to deplete the change detection process. In more general terms, the increase in auditory load of the relevant task led to dimming the perception of irrelevant-probes, resulting in a weaker standard/deviant comparison process. Incidentally, the presents results are a good demonstration of the efficiency of the irrelevant-probe technique to assess mental distractibility without interfering with the task at hand (Ullsperger et al., 2001).

#### 4.2. No major impact of blindness

A main finding of this study was that both groups of pilots performed maneuvers with a good precision ( $\approx 2$  degrees of error). Plus we found that the blind group showed a lower alpha spectral power than the sighted group at the O1 and the O2 electrode locations. As previously shown (Renier et al., 2013), it suggests an extra-recruitment of the brain occipital areas for non-visual processing in the blind group. More precisely, it brings to light the specificity of the blind group at a cerebral level and strengthens the idea that alpha activity can actually index the idling state of a specific brain area and be a reliable indicator of the cerebral functional reorganization following visual deprivation (Kriegseis et al., 2006). In spite of this cerebral specificity and their high familiarity level with the sound-flyer system, blind people showed equivalent flight performance as the sighted pilots. In other words, performance to the task with this simplified version of the sound-flyer was not determined by the level of expertise. These behavioral results constitute evidence that pilots processed accurately auditory information to exert control over the aircraft attitude. This complements previous evidence that, in absence of reliable visual information, auditory displays can be used either to fly an aircraft in

a stable manner (DeFlorez, 1936) or to rapidly recover a level flight from a hazardous position (Simpson et al., 2008). Here, the pilots were able to attain various flight attitudes starting from a straight and level flight, and with quite a good precision. To our knowledge, this is the first experiment demonstrating that pilots can process auditory information, in order to identify and reach a non-neutral aircraft attitude.

Moreover, the workload induced by the use of the sound-flyer was not mainly affected by visual impairment. Though we observed little differences in the way the two groups evaluated subjective workload for the various level of difficulty. More precisely, the sighted group gave a significantly higher score to the high compared to the medium condition, while the blind group rated these two difficulty levels as triggering equivalent workload levels. Yet this difference was marginal as subjective ratings were predominantly affected by the number of sound features to process and by the technical limitations of the sonification itself (resolution). These technical constraints should be corrected in the future to ensure a better overall usability of the sound-flyer. In particular, as pointed out by Brungart and Simpson (2008), an auditory attitude indicator like the sound-flyer should provide an intuitive anchor point for a straight and level flight. So far the sound-flyer does not meet this criteria since the pilots have to memorize an arbitrary frequency that corresponds to a null pitch angle value. Notably, we did not notice any group impact over ERPs peak amplitude in spite of their presupposed auditory attentional advantage. This suggests that cortical reorganization of the “blind brain”, as indexed by the alpha spectral power, did not significantly favor auditory processing of irrelevant syllables in the present situation.

#### 4.3. Limits

There are several limitations to this study. First of all, the piloting task as well as the auditory display were simplified. Piloting was focused on the monitoring of only two aircraft parameters (pitch and bank) in the most complex conditions, the other parameters (vertical speed, cap ...) being managed by the auto-pilot.

Then we were forced to constitute two small samples ( $N \leq 9$ ) due to the scarcity of the blind pilot population which may have affected the statistical power of our results. Moreover, sound-flyer experts were necessarily blind people, so that it was impossible to conclude about the relative role of expertise vs the auditory attentional skills of the pilots. In the future, it is worthwhile to control expertise as well as auditory skills more accurately, to help disentangle these two factors.

During this experiment, all the participants were blindfolded so that it is impossible to come to any final conclusion about the possibility of using the sound-flyer in an operational situation to orient one's aircraft. However the possibility to use the sound-flyer effectively when it is the only source of information available, gives hope about the possibility to use it in conjunction with other inputs such as visual information. More experiments are needed to ensure that auditory information could support a better orienting of the aircraft in real situations, where pilots have many other (visual, auditory) inputs to process.

#### 4.4. Conclusion

We assessed the usability of a sonification system in the cockpit and its relevance to cope with spatial orientation within an aircraft. We found that both pilot groups (sighted and blind) showed an acceptable maneuver precision. Nevertheless, the sonification processing led to a mitigated responsiveness to other additional auditory stimuli at early ( $\approx 110$  ms) and late ( $\approx 340$  ms) stages,



especially as task difficulty increased.

Despite clear evidence of a functional reorganization of the brain in the blind group, as indexed by higher alpha power in the occipital regions, flight performance and brain responsiveness to the additional auditory stimuli did not significantly differ between the two groups. However, we noted a near significant difference in the way the two groups assessed subjective workload. While the sighted group assigned a higher average score to the high-difficulty condition compared to the medium-difficulty condition, the group of blind pilots considered that both levels of difficulty triggered equivalent workload levels.

Finally, auditory displays – such as the sound-flyer – may provide usable auditory information even with little training, which could help pilots during spatial disorientation episodes. However, attenuated capacity to process unexpected auditory stimuli must be taken into account, particularly if the sonification system is deployed in more complex applications, where unexpected auditory events (e.g., alarms) might occur and should not be missed (Dehais et al., 2014).

## Acknowledgments

We would like to thank all the participants who came and participated in this experiment, especially the members of the Mirauds-Volants association who sometimes came from very far to contribute to this study. We also express our gratitude to Patrice Radiguet for his help and his precious advice.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data related to this article can be found at <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2017.03.001>.

## References

- Allison, B.Z., Polich, J., 2008. Workload assessment of computer gaming using a single-stimulus event-related potential paradigm. *Biol. Psychol.* 77 (3), 277–283.
- Auvray, M., Hanneton, S., O Regan, J.K., 2007. Learning to perceive with a visuo-auditory substitution system: localisation and object recognition with the vOICe. *Perception* 36 (3), 416.
- Başar, E., Schürmann, M., Başar-Eroglu, C., Karakaş, S., 1997. Alpha oscillations in brain functioning: an integrative theory. *Int. J. Psychophysiol.* ISSN: 0167-8760 26 (1–3), 5–29. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8760\(97\)00753-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8760(97)00753-8).
- Benson, A.J., 1999. *Aviation Medicine*, Chapter Spatial Disorientation—General Aspects. Butterworth Heinemann, Oxford, England, pp. 419–436.
- Berti, S., Schröger, E., 2003. Working memory controls involuntary attention switching: evidence from an auditory distraction paradigm. *Eur. J. Neurosci.* ISSN: 1460-9568 17 (5), 1119–1122.
- Brungart, D.S., Simpson, B.D., June 2008. Design, validation, and in-flight evaluation of an auditory attitude indicator based on pilot-selected music. In: Proceedings of the 14th International Conference on Auditor Display, pp. 24–27.
- Cegarra, J., Morgado, N., 2009. Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX (Symposium).
- Cohen, L.G., Celnik, P., Pascual-Leone, A., Corwell, B., Faiz, L., Dambrosia, J., Honda, M., Sadato, N., Gerloff, C., Catala, M.D., et al., 1997. Functional relevance of cross-modal plasticity in blind humans. *Nature* 389 (6647), 180–183.
- Collignon, O., Renier, L., Bruyer, R., Tranduy, D., Veraart, C., 2006. Improved selective and divided spatial attention in early blind subjects. *Brain Res.* 1075, 175–182.
- DeFlorez, L., 1936. True blind flight. *J. Aeronaut. Sci.* 3, 168–170.
- Degara, N., Kuppanda, T., Neate, T., Yang, J., Torres, A.V., 2014. Reproducible sonification for virtual navigation. In: *VR Workshop: Sonic Interaction in Virtual Environments (SIVE)*, 2014 IEEE. IEEE, pp. 35–40.
- Dehais, F., Causse, M., Régis, N., Menant, E., Tremblay, S., June 2014. Failure to detect critical auditory alerts in the cockpit : evidence for inattentive deafness. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 56, 631–644.
- Delogu, F., Palmiero, M., Federici, S., Plaisant, C., Zhao, H., Belardinelli, O., 2010. Non-visual exploration of geographic maps: does sonification help? *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.* 5 (3), 164–174.
- Delorme, A., Makeig, S., 2004. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics. *J. Neurosci. Methods* 134, 9–21.
- Duncan-Johnson, C.C., Donchin, E., 1977. On quantifying surprise: the variation of event-related potentials with subjective probability. *Psychophysiology* 14 (5), 456–467.
- Edwards, A.D., 1989. Soundtrack: an auditory interface for blind users. *Hum.-Comput. Interact.* 4 (1), 45–66.
- Flexer, A., Bauer, H., Pripfl, J., Dorffnes, G., september 2005. Using ICA for removal of ocular artifacts in EEG recorded from blind subjects. *Neural Netw.* 18 (7), 998–1005.
- Giraudet, L., Imbert, J.-P., Bérenger, M., Tremblay, S., Causse, M., 2015a. The neuro-ergonomic evaluation of human machine interface design in air traffic control using behavioral and EEG/ERP measures. *Behav. Brain Res.* ISSN: 0166-4328 294, 246–253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbr.2015.07.041>.
- Giraudet, L., St-Louis, M.-E., Scannella, S., Causse, M., 2015b. P300 event-related potential as an indicator of inattentive deafness? *PLoS ONE* 10 (2), 02. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0118556>.
- Handy, T.C., 2005. *Event-related Potentials: a Methods Handbook*. MIT press.
- Harmony, T., Bernal, J., Fernández, T., Silva-Pereyra, J., Fernandez-Bouzas, A., Marosi, E., Rodríguez, M., Reyes, A., 2000. Primary task demands modulate P3a amplitude. *Cogn. Brain Res.* 9 (1), 53–60.
- Hart, S., Staveland, L., 1988. *Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research*. North Holland Press.
- Hermann, T., 2008. *Taxonomy and Definitions for Sonification and Auditory Display*.
- Hermann, T., Drees, J.M., Ritter, H., 2003. *Broadcasting Auditory Weather Reports—a Pilot Project*.
- Hermann, T., Hunt, A., Neuhoff, J.G., 2011. *The Sonification Handbook*. Logos Verlag, Berlin.
- Jung, T.-P., Humphries, C., Lee, T.-W., Makeig, S., McKeown, M.J., Iragui, V., Sejnowski, T.J., et al., 1998. Extended ICA removes artifacts from electroencephalographic recordings. *Adv. neural Inf. Process. Syst.* 894–900.
- Jutten, C., Herault, J., 1991. Blind separation of sources, Part I: an adaptive algorithm based on neuromimetic architecture. *Signal Process.* 21, 1–10.
- Kay, L., 1974. A sonar aid to enhance spatial perception of the blind: engineering design and evaluation. *Radio Electron. Eng.* 44 (11), 605–627.
- Kenemans, J., Verbaten, M., Melis, C., Slangen, J., 1992. Visual stimulus change and the orienting reaction: event-related potential evidence for a two-stage process. *Biol. Psychol.* 33 (2–3), 97–114.
- Kok, A., 2001. On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology* 38, 557–577.
- Kramer A.F., Trejo, L.J., Humphrey, D., 1995. Assessment of mental workload with task-irrelevant auditory probes. *Biol. Psychol.* 40, 83–100.
- Kramer, G., Walker, B., Bonebright, T., Cook, P., Flowers, J.H., Miner, N., Neuhoff, J., 1999. *Sonification Report: Status of the Field and Research Agenda*.
- Krieges, A., Hennighausen, E., Rösler, F., Röder, B., 2006. Reduced {EEG} alpha activity over parieto-occipital brain areas in congenitally blind adults. *Clin. Neurophysiol.* ISSN: 1388-2457 117 (7), 1560–1573. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinph.2006.03.030>.
- Kujala, T., Alho, K., Kekoni, J., Hämäläinen, H., Reinikainen, K., Salonen, O., Standertskjöld-Nordenstam, C.-G., Näätänen, R., 1995. Auditory and somatosensory event-related brain potentials in early blind humans. *Exp. Brain Res.* 104, 519–526.
- Kujala, T., Lehtokoski, A., Alho, K., Kekoni, J., Näätänen, R., 1997. Faster reaction times in the blind than sighted during bimodal divided attention. *Acta Psychol.* 75–82.
- Kujala, T., Alho, K., Näätänen, R., 2000. Cross-modal reorganization of human cortical functions. *Trends Neurosci.* 23 (3), 115–120.
- Leclerc, C., Segalowitz, S.J., Desjardins, J., Lassonde, M., Lepore, F., 2005. EEG coherence in early-blind humans during sound localization. *Neurosci. Lett.* ISSN: 0304-3940 376 (3), 154–159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neulet.2004.11.046>.
- Lyons, T.J., Gillingham, K.K., Teas, D.C., Ercoline, W.R., Oakley, C., 1990. The effects of acoustic orientation cues on instrument flight performance in a flight simulator. *Aviat. Space, Environ. Med.* 61, 699–706.
- Merabet, L.B., Pascual-Leone, A., 2010. Neural reorganization following sensory loss: the opportunity of change. *Nat. Rev. Neurosci.* 11 (1), 44–52.
- Miller, M.W., Rietschel, J.C., McDonald, C.G., Hatfield, B.D., 2011. A novel approach to the physiological measurement of mental workload. *Int. J. Psychophysiol.* 80, 75–78.
- Navon, D., Gopher, D., 1979. On the economy of the human-processing system. *Psychol. Rev.* 86 (3), 214–255.
- Neuhoff, J.G., Kramer, G., Wayand, J., 2000. Sonification and the Interaction of Perceptual Dimensions: Can the Data Get Lost in the Map?.
- Newman, D.G., 2007. *An Overview of Spatial Disorientation as a Factor in Aviation Accidents and Incidents*. Technical Report. Australian Transport Safety Bureau. Aviation Research and Analysis Report – B2007/0063.
- Noebels, J.L., Roth, W.T., Kopell, B.S., 1978. Cortical slow potentials and the occipital EEG in congenital blindness. *J. Neurol. Sci.* ISSN: 0022-510X 37 (1–2), 51–58. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-510X\(78\)90227-7](http://dx.doi.org/10.1016/0022-510X(78)90227-7).
- Papanicolaou, A., Johnstone, J., October 1984. Probe evoked potentials: theory, method and applications. *Int. J. Neurosci.* 24 (2), 107–131.
- Parasuraman, R., 1980. Effects of information processing demands on slow negative shift latencies and N100 amplitude in selective and divided attention. *Biol. Psychol.* ISSN: 0301-0511 11 (3), 217–233. [http://dx.doi.org/10.1016/0301-0511\(80\)90057-5](http://dx.doi.org/10.1016/0301-0511(80)90057-5).
- Parasuraman, R., 2003. Neuroergonomics: research and practice. *Theor. issues Ergon. Sci.* 4 (1–2), 5–20.
- Polich, J., 2007. Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clin. Neurophysiol.* 118, 2128–2148.
- Rauschecker, J.P., 1995. Compensatory plasticity and sensory substitution in the

- cerebral cortex. *Trends Neurosci.* 18 (1), 36–43.
- Renier, L., De Volder, A.G., Rauschecker, J.P., Févriér 2013. Cortical plasticity and preserved function in early blindness. *Neurosci. Biobehav. Rev.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.01.025> (Epub ahead of print).
- Röder, B., Stock, O., Bien, S., Neville, H., Röslér, F., 2002. Speech processing activates visual cortex in congenitally blind humans. *Eur. J. Neurosci.* 16 (5), 930–936.
- Roentgen, E., Gelderblom, G., Soede, M., de Witte, L., 2008. Inventory of electronic mobility aids for persons with visual impairment & blindness: a literature review. *J. Vis. Impair. Blind.* 102 (11), 702–724.
- Rutz, H.H., Vogt, K., Höldrich, R., 2015. The SysSon platform: a computer music perspective of sonification. In: *Proceedings of the 21st International Conference on Auditory Display (ICAD 2015)*.
- Sadato, N., Pascual-Leone, A., Grafman, J., Ibañez, V., Deiber, M.-P., Dold, G., Hallett, M., 1996. Activation of the primary visual cortex by braille reading in blind subjects. *Nature* 380 (6574), 526–528.
- Simpson, B.D., Brungart, D.D., Dallman, R.C., Yasky, R.J., Romigh, G.D., 2008. Flying by Ear: Blind Flight with a Music-based Artificial Horizon, vol. 52, pp. 6–10. <http://dx.doi.org/10.1177/154193120805200103>.
- Squires, N.K., Squires, K.C., Hillyard, S.A., 1975. Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 38, 387–401.
- Sugimoto, F., Katayama, J., 2013. Somatosensory P2 reflects resource allocation in a game task: assessment with an irrelevant probe technique using electrical probe stimuli to shoulders. *Int. J. Psychophysiol.* 87, 200–204.
- Ullsperger, P., Freude, G., Erdmann, 2001. Auditory probe sensitivity to mental workload change – an event-related potential study. *Int. J. Psychophysiol.* 40, 201–209.
- Vigário, R.N., 1997. Extraction of ocular artefacts from EEG using independent component analysis. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 103, 395–404.
- Weeks, R., Horwitz, B., Aziz-Sultan, A., Tian, B., Wessinger, C.M., Cohen, L.G., Hallett, M., Rauschecker, J.P., 2000. A positron emission tomographic study of auditory localization in the congenitally blind. *J. Neurosci.* 20 (7), 2664–2672.
- Wickens, C.D., Kramer, A., Vanasse, L., Donchin, E., 1983. Performance of concurrent tasks: a psychophysiological analysis of the reciprocity of information-processing resources. *Science*. ISSN: 0036-8075 221 (4615), 1080–1082.
- Wickens, C.D., 1991. Processing resources and attention. *Multiple-task Perform.* 3–34.
- Williamson, S., Kaufman, L., Lu, Z.-L., Wang, J.-Z., Karron, D., 1997. Study of human occipital alpha rhythm: the alphon hypothesis and alpha suppression. *Int. J. Psychophysiol.* ISSN: 0167-8760 26 (1–3), 63–76.
- Yeh, Y.-Y., Wickens, C., 1988. Dissociation of performance and subjective measures of workload. *Hum. Factors* 30 (1), 111–120.

## RÉPONSES À LA QUESTION OUVERTE (TROISIÈME CONTRIBUTION)

Participant	Groupe	<i>Pouvez-vous décrire la stratégie que vous avez employée pour répondre à la sous-tâche de détection de panne ?</i>
INC01	AUCUNE	« Les voyants rond et carré prédisaient plutôt une panne, quelque soit l'état des autres voyants »
INC02	FPT	« Je repérais les voyants qui prédisaient plutôt une panne ou pas, et quand il y en avait plusieurs d'allumés, j'essayais de trouver un niveau de priorité pour chacun »
INC03	PFD	« J'ai associé progressivement les événements PANNE et CLEAR, d'abord aux voyants, ensuite aux combinaisons de deux voyants, et enfin de trois. J'ai essayé de voir si la survenue de trois voyants pouvait laisser présager de l'occurrence d'un changement de règles, afin de pouvoir modifier les associations, mais sans succès »
INC04	AUCUNE	« Triangle = CLEAR; rond = PANNE; croix = PANNE; carré = ALEATOIRE. J'ai ensuite appris certaines combinaisons. Par exemple triangle + croix = CLEAR. Les règles changeaient parfois mais j'ai essayé de continuer à utiliser celles que j'avais apprises »
INC05	FPT	« Lorsqu'un seul symbole s'allumait, j'essayais d'apprendre le résultat, avec une certaine probabilité. Je faisais au hasard dès lors que plusieurs symboles étaient allumés »
INC06	PFD	« La croix et le rond étaient plutôt associés à une panne. Le triangle et le carré plutôt à une absence de panne. J'essayais aussi d'apprendre les combinaisons »
INC07	AUCUNE	« Triangle = CLEAR; croix = CLEAR; rond = PANNE; carré = PANNE. Pour les combinaisons, s'il y avait plus d'icônes prédisant une panne, je répondais panne, et vice versa. Lorsque leur nombre était égal, j'essayais de juger en mode essai-erreur, mais ça ne semblait pas fonctionner »

Participant	Groupe	Pouvez-vous décrire la stratégie que vous avez employée pour répondre à la sous-tâche de détection de panne ?
INC08	FPT	« J'ai essayé de mémoriser les patterns qui me donnaient le plus souvent une réponse juste, en changeant de réponse au début, puis en figeant ma réponse pour un pattern donné. Car j'ai vu que, parfois, le résultat variait pour une réponse donnée »
INC09	PFD	« Les voyants de droite [le rond et le carré], prédisaient le plus souvent une panne, alors que les voyants de gauche [le triangle et la croix] prédisaient le plus souvent une absence de panne. Lorsque il y avait des combinaisons de trois voyants, je répondais en fonction du nombre de voyants allumés plutôt pour une panne ou une absence de panne »
INC10	AUCUNE	« J'ai remarqué que deux voyants seuls, ou avec d'autres, indiquaient plutôt une panne. Si l'un de ces voyants était combiné avec un autre voyant indiquant une non-panne, alors j'essayais de me souvenir du résultat le plus fréquent pour cette combinaison. Ou sinon, lorsque deux voyants rentraient en conflit, j'essaierais de deviner lequel avait le plus de poids. »
INC11	FPT	« J'ai essayé de mémoriser le lien entre les combinaisons et le résultat »
INC12	PFD	« J'ai essayé de mémoriser l'évènement le plus fréquent pour un symbole donné. Parfois, j'ai aussi essayé de mémoriser certaines combinaisons de voyants »
INC13	PFD	« Au début, je répondais au hasard pour essayer de déterminer le rôle de chaque symbole individuel. Puis j'ai essayé de trouver la loi lorsque plusieurs symboles s'allument »
INC14	AUCUNE	« Certains voyants indiquent une panne de façon séparée (le rond et la croix). J'ai aussi essayé de deviner les combinaisons qui étaient associées à une panne »
INC15	FPT	« Je répondais panne lorsqu'il y avait deux voyants allumés, avec au moins le rond ou le carré. Quand il y avait trois voyants allumés, je répondais très favorablement [absence de panne]. Je répondais aussi favorablement lorsqu'on passait d'un cas à N signes, à un cas avec N+1 signes [voyants] »

Participant	Groupe	<i>Pouvez-vous décrire la stratégie que vous avez employée pour répondre à la sous-tâche de détection de panne ?</i>
INC16	AUCUNE	<i>« J'ai repéré quels signes étaient associés à une panne. De plus, j'ai utilisé la complémentarité. Par exemple, lorsque trois voyants étaient allumés, je considérais surtout le voyant qui était éteint pour deviner »</i>
INC17	PFD	<i>« J'ai associé le rond à un risque de panne. Le carré à une non-panne. La croix et le triangle étaient soit panne, soit non-panne. Lorsque plusieurs voyants étaient allumés, je supposais que certains l'emportaient sur d'autres. »</i>
INC18	FPT	<i>« J'ai supposé qu'à chaque symbole était assignée une probabilité d'être une alarme [panne] »</i>



# Consignes

<b>5</b>	<b>Codage de la double-tâche de <i>N-BACK</i></b> .....	306
5.1	Définition des variables .....	306
5.2	Exécution de la tâche .....	308
<b>6</b>	<b>Codage de la double-tâche de surveillance</b> .....	329
6.1	Définition des variables et exécution de la tâche .....	329
<b>7</b>	<b>Codage de la double-tâche de surveillance/prédiction</b> .....	340
7.1	Sous-tâche PFD .....	340
7.2	Sous-tâche FPT .....	372

## 1. Formulaire de consentement éclairé

Investigateur principal : Benoît VALÉRY, *doctorant*

Je soussigné(e) (Nom, Prénom) : .....

Né le : .....

déclare accepter participer à la recherche intitulée :

*Etude neurophysiologique de l'attention soutenue, chez l'homme*

organisée par Benoît VALÉRY, M.Sc., (ISAE, ENAC, tél : +33 5 61 33 96 42)  
dans les conditions précisées ci-dessous.

- Je suis libre d'accepter ou de refuser ainsi que d'arrêter à tout moment ma participation
- J'atteste être affilié ou bénéficiaire d'un régime français de sécurité sociale, condition obligatoire pour pouvoir participer à cette recherche
- Les données qui me concernent resteront strictement confidentielles. Je n'autorise leur consultation que par des personnes qui collaborent avec Benoît VALÉRY à qui je pourrai à tout moment demander des informations
- La publication des résultats de la recherche ne comportera aucun élément susceptible de permettre mon identification
- J'accepte de façon libre et volontaire de participer à la présente recherche, dans les conditions énoncées ci-dessus

Fait à .....

le .....

Signature du sujet  
précédée de la mention "*Lu et  
approuvé*"

Signature de l'expérimentateur  
précédée de la mention "*Lu et  
approuvé*"



## 2. Consignes de la double-tâche de N-BACK

### 2.1. Entraînement à la tâche de N-BACK

#### 2.1.1. Explication de la tâche

Vous allez participer à un test de mémoire durant lequel des chiffres vont vous être présentés les uns après les autres. Vous devrez comparer chaque chiffre au chiffre apparu un certain nombre de *rangs* avant lui (0,1,2 ou 3). Par exemple, lorsque la consigne sera de rang 1, vous devrez comparer chaque chiffre au chiffre apparu 1 rang avant lui. Lorsque ces deux chiffres seront identiques, vous devrez le signaler en appuyant sur la touche du milieu (touche B du boîtier de réponse).

Par exemple, dans la séquence de chiffres suivante :

0 2 5 6 6

si la consigne est de rang 1, vous devrez répondre à l'apparition du deuxième 6 puisqu'il est identique au chiffre apparu 1 rang auparavant (6). Ici, on dit que le chiffre est une *cible* que vous devez détecter.

Prenons un autre exemple. Dans la séquence de chiffres suivante :

1 2 1 3 0 0

si la consigne est de rang 2, vous devrez répondre à l'apparition du deuxième 1 puisqu'il est identique au chiffre apparu 2 rangs auparavant(1). Dans cette séquence, aucun autre chiffre n'est une cible. Le deuxième 0 n'est pas une cible puisque le rang 2 implique de le comparer au chiffre apparu 2 rangs auparavant (ici le numéro 3). Les chiffres seront présentés les uns après les autres, et vous devrez donc les mémoriser pour les comparer entre eux. Bien sur, plus le rang sera élevé, plus vous devrez mémoriser de chiffres pour effectuer la comparaison.

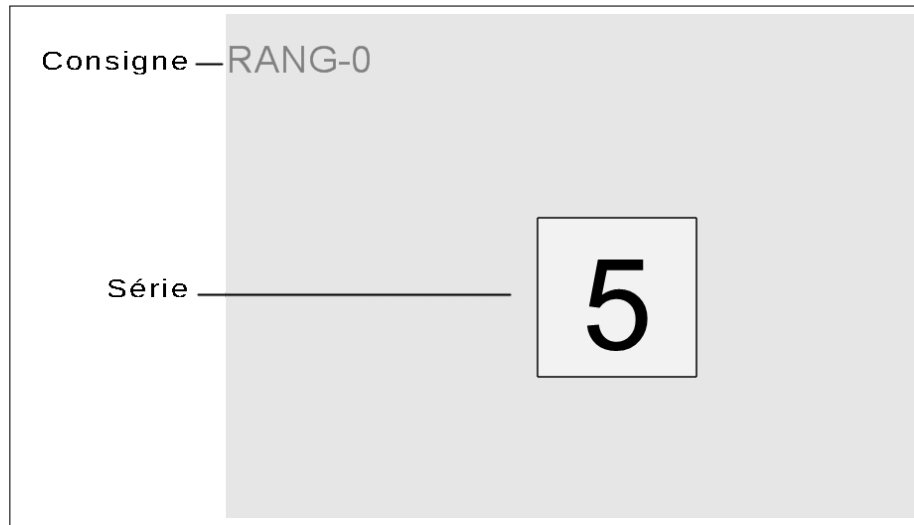
#### Cas particulier du rang 0

Attention, lorsque le rang sera 0, vous devrez répondre à chaque fois que le chiffre 0 apparaîtra. Par exemple, dans la séquence suivante :

5 6 6 0 1 0

vous devriez répondre deux fois, à chaque apparition d'un 0, quels que soient les chiffres qui le précèdent.

Le rang à appliquer vous sera indiqué en haut à gauche de l'écran, en gris (voir figure 1, page 292). Par exemple, lorsque vous devrez appliquer une règle de rang 1, la consigne "RANG-1" sera tout simplement affichée en haut à gauche de l'écran.



**Figure 1** – Environnement de la tâche d'entraînement à tâche de N-BACK

### **Augmentation de la difficulté**

Plus votre performance à un certain rang sera bonne, et plus celui-ci augmentera (0,1,2,3...).

Dans toutes les conditions, n'oubliez pas d'appuyer sur la touche du milieu (touche B) de votre boîtier de réponse lorsque le chiffre correspond (chiffre-cible).

### **Erreurs**

Après chacune de vos réponses, un rond rouge apparaîtra si vous avez fait une erreur. Il existe deux façons de se tromper : oublier de signaler un chiffre-cible, signaler un chiffre qui n'est pas une cible. Par exemple, dans la série suivante :

5 6 0 1 3 3 1

si la règle de réponse est rang 1, oublier de répondre à l'apparition du deuxième 3 est une erreur *et* répondre à l'apparition du dernier 1 est aussi une erreur (puisque le chiffre qui le précède d'1 rang est 3 et non pas 1).

La tâche commencera par une règle de "RANG-0". Le rang augmentera progressivement en fonction de votre performance.

Si vous avez la moindre question n'hésitez pas à la poser maintenant.

\_\_\_\_\_Merci de prévenir l'expérimentateur maintenant \_\_\_\_\_

## 2.2. Tâche de double N-BACK avec récompenses

### 2.2.1. Explication de la tâche

Dans la tâche suivante, vous allez voir deux séquences de chiffres qui défilent simultanément. Comme dans la tâche précédente, vous allez devoir appliquer une règle de N-BACK à chacune de ces deux tâches. Mais cette fois-ci, il y aura quelques nouveautés.

#### Double-tâche

Tout d'abord, les deux tâches vont se dérouler **simultanément** : à chaque tâche correspond sa propre touche de réponse. Vous devrez utiliser la touche de gauche (touche A de votre boîtier de réponse) pour répondre à la série gauche, et la touche de droite (touche C) pour répondre à la série droite (voir figure 2, page 293). Les rangs à appliquer à chaque tâche seront indépendants et seront indiqués sous chaque série par un simple numéro. Par exemple vous pourrez avoir à appliquer une règle de rang 0 sur la séquence de gauche en une règle de rang 1 sur la séquence de droite.

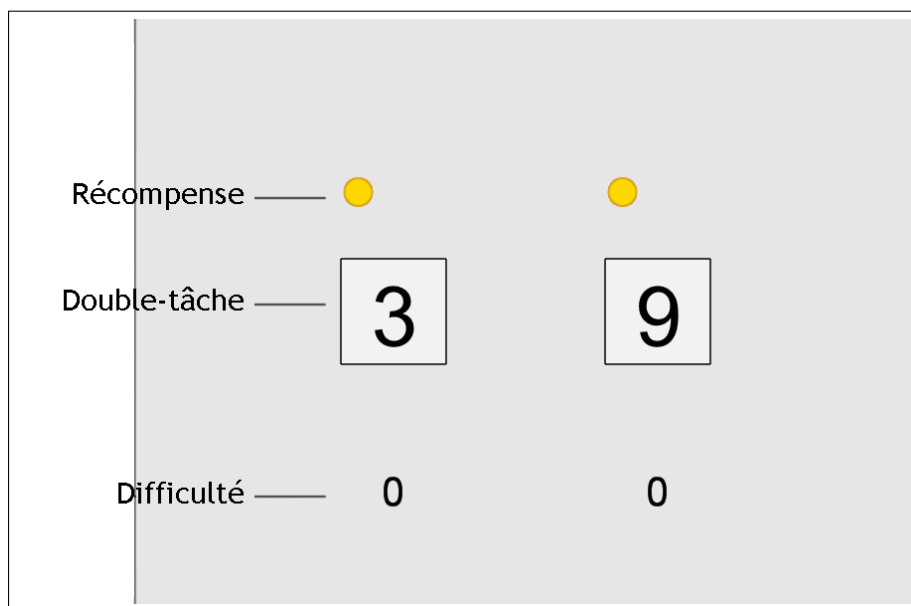


Figure 2 – Environnement de la tâche de double N-BACK avec utilités

### Récompense de chaque série

Au-dessus de chaque série, un certain nombre de pièces d'or (1 ou 3) vous indiquera le nombre de points que vous pouvez gagner/perdre en cas de bonne/mauvaise réponse à la série en question. Par exemple, si la série de droite vaut 3 points, chaque bonne réponse vous rapportera 3 points de plus, et chaque erreur à cette série vous coûtera 3 points. Autrement dit le nombre de points gagnés/perdus est égal au nombre de pièces de la série. Durant la tâche, vous devrez tenir compte de l'utilité de chaque série pour engranger le plus de points possibles.

Pour chaque nouvel essai, votre score initial est de 0 points. VOTRE OBJECTIF PRINCIPAL consiste à faire le score LE PLUS ELEVE possible.

La tâche est constituée de plusieurs essais. D'un essai à l'autre, la difficulté (règle de N-BACK) ou la valeur (nombre de pièces) de chaque série pourront varier, vous devrez donc les surveiller régulièrement pour vous y adapter. Entre deux essais, vous bénéficierez systématiquement d'une pause.

### Rappel : les erreurs

Pour rappel, il existe deux façons de faire une erreur. Vous pouvez (1) ne pas signaler un chiffre-cible (2), signaler comme cible un chiffre qui ne l'est pas.

Si vous avez la moindre question, n'hésitez pas à la poser maintenant.

### Entraînement

Dans un premier temps, vous allez vous entraîner à cette nouvelle tâche en effectuant un court entraînement. N'OUBLIEZ PAS : votre objectif consiste à faire le score le plus élevé possible.

\_\_\_\_\_Merci de prévenir l'expérimentateur maintenant \_\_\_\_\_

### 2.2.2. Rappels avant le test

Vous allez maintenant passer à la phase test. Cette phase sera strictement identique aux quelques essais que vous venez de réaliser à la différence qu'elle comportera plus d'essais et sera donc plus longue. Entre deux essais, un écran de pause s'affichera pour vous permettre de vous reposer. Vous devrez alors appuyer sur la touche OK pour passer à l'essai suivant.

N'oubliez pas que votre objectif principal consiste à réaliser le score le plus élevé possible. Si vous avez la moindre question, merci de la poser maintenant.



Figure 3 – Eye-tracker fixé à l'écran

### Précaution liée à l'eye-tracker

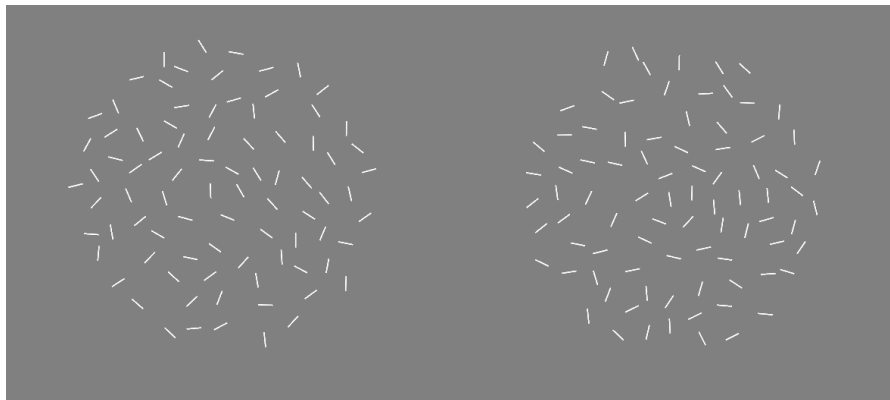
Durant cette expérience, votre activité oculaire sera enregistrée par le dispositif fixé au-dessous de l'écran (voir figure ci-dessous). L'utilisation de cet appareil requiert de votre part que vous restiez le plus statique possible tout au long de l'expérience, et notamment que vous limitiez le plus possible les grands mouvements de tête ou du buste. Nous vous recommandons de profiter des écrans de pause pour vous détendre. Avant de passer à la phase suivante, nous allons calibrer l'eye-tracker. Vous allez devoir suivre du regard un point noir, qui va se balader sur l'écran. Il est important, pour que la calibration soit bonne, que vous suiviez ce point avec votre seul regard, sans effectuer de mouvement de tête.

\_\_\_\_\_Merci de prévenir l'expérimentateur maintenant \_\_\_\_\_

### 3. Consignes de la double-tâche de surveillance

#### 3.1. Phase de familiarisation

Deux groupes de traits vont apparaître à l'écran. Un groupe à gauche, et un groupe à droite, comme montré ci-dessous. Votre tâche consistera à surveiller et à signaler toute rotation de l'un des traits à l'aide du clavier. Ces rotations dureront 4 secondes chacune et pourront survenir à n'importe quel moment.



Si la rotation survient dans le groupe de gauche, vous devez la signaler avec la touche Ctrl gauche du boîtier de réponse. Si elle est dans le groupe de droite, signalez-la avec la touche Ctrl droit. Dès que vous détectez une rotation, vous devez la signaler le plus rapidement possible grâce à la touche correspondante. Chaque réponse correcte aura pour effet de stopper la rotation du trait. Vous devez faire votre maximum pour éviter de commettre des erreurs. Il existe deux façons d'en faire :

1. Ne pas signaler une rotation (oubli)
2. Signaler une rotation lorsqu'il n'y en a pas (fausse alarme)

Vous devrez détecter le plus de rotations possible. Si vous n'avez pas de questions, un entraînement va vous être proposé.

La durée de cette phase est estimée à moins de cinq minutes. N'oubliez pas : la tâche consiste à détecter toute rotation et à la signaler grâce aux touches du boîtier correspondantes.

**RAPPEL :** Vos réponses doivent être les plus rapides possibles.

Au prochain écran, les deux ensembles de traits vont apparaître et vous pourrez commencer l'entraînement. Cette phase comporte plusieurs essais. Au début de chaque essai, vous serez invité à appuyer sur la touche Espace pour démarrer.

Bon courage !

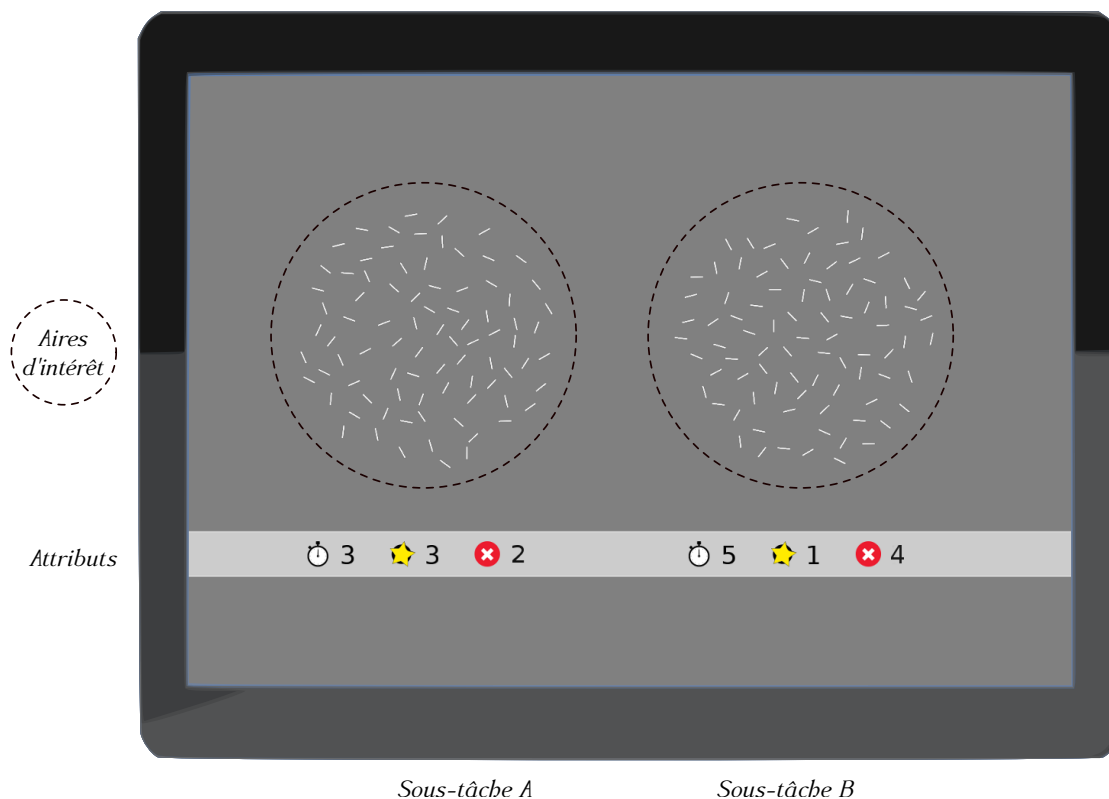
### 3.2. Phase d'augmentation de la demande

A partir de maintenant, les traits vont tourner de moins en moins rapidement. Plus la vitesse de rotation des traits diminuera, plus il vous sera difficile de les détecter. Mise à part la vitesse de rotation, la tâche sera strictement identique à la phase précédente. Le but de cette phase est de mesurer votre capacité à détecter un maximum de rotations malgré la réduction de leur vitesse.

Cette phase durera une dizaine de minutes. Comme dans la phase précédente, vous devez détecter le plus de rotations possibles, le plus rapidement possible. Si vous avez la moindre question avant de commencer, n'hésitez pas à la poser.

### 3.3. Phase de familiarisation aux attributs

Dans la prochaine phase de l'expérimentation, vous allez devoir tenir compte d'informations supplémentaires pour réaliser la tâche. Ces informations seront affichées sous chaque groupe de traits, avec des icônes pour les représenter (voir l'image).



Voici une description des différentes informations supplémentaires dont vous allez disposer :

1. Le **temps de rotation** des traits (horloge) : 3 ou 5 secondes
2. La **récompense** en jeu (étoile) : indique le nombre de points gagnés pour chaque bonne réponse : 1 ou 3 points
3. Le **nombre d'erreurs tolérées** (croix) : indique le nombre d'erreurs tolérées : 2 ou 4. En cas de dépassement de ce seuil, votre score pour le groupe sera nul (0 point). Par exemple, si le seuil de tolérance est de 2, votre score sera nul si vous faites 3 erreurs ou plus.

Les deux groupes sont indépendants l'un de l'autre. Par exemple, le groupe de gauche pourra présenter un temps de rotation, une récompense, et un nombre d'erreurs tolérées, différents que le groupe de droite. De la même façon le nombre de bonnes réponses, le nombre d'erreurs, le nombre de points gagnés, évoluent indépendamment pour chaque groupe.

**OBJECTIF PRINCIPAL** : Lors de la phase qui va suivre, VOTRE OBJECTIF consistera à faire le MEILLEURE SCORE possible. Si vous n'avez pas de questions, un entraînement va vous être proposé.

---

PAUSE

---

Vous allez maintenant pouvoir vous entraîner à réaliser cette tâche avec ces informations supplémentaires. N'oubliez pas :

1. Votre objectif pour chaque essai consiste à obtenir le MEILLEUR SCORE possible
2. Des nouvelles informations caractérisent maintenant chaque groupe (gauche et droite)
3. Les deux groupes sont INDÉPENDANTS l'un de l'autre : le nombre de bonnes réponses, le nombre d'erreurs, le nombre de points gagnés, évoluent indépendamment pour chaque groupe

Enfin, il existe deux façons de faire une erreur :

1. Ne pas signaler une rotation (oubli)
2. Signaler une rotation lorsqu'il n'y en a pas (fausse alarme)

La vitesse de rotation des traits restera constante à partir de maintenant. Prenez le temps de bien comprendre les informations de chaque groupe avant de démarrer chaque essai.

### 3.4. Phase de test

Nous allons maintenant passer à la phase de test. Celle-ci sera identique à la phase de familiarisation que vous venez d'effectuer, à ceci près qu'elle comportera plus d'essais (27 essais), de cinquante secondes chacun.



Utilisez les pauses si vous ressentez le besoin de vous détendre tout en veillant à limiter au plus possible vos mouvements de tête, ceci afin de favoriser un bon enregistrement de votre comportement oculaire.

N'oubliez pas :

- Votre objectif pour chaque essai consiste à réaliser le score global le plus élevé possible
- Des nouvelles informations caractérisent maintenant chaque groupe (gauche et droite)
- Les deux groupes sont indépendants l'un de l'autre : le nombre de bonnes réponses, le nombre d'erreurs, le nombre de points gagnés, évoluent indépendamment pour chaque groupe

Enfin, il existe deux façons de faire une erreur :

1. Ne pas signaler une rotation (oubli)
2. Signaler une rotation lorsqu'il n'y en a pas (fausse alarme)

Si vous avez la moindre question avant le début du test, merci de la poser maintenant. Sinon, vous pouvez commencer.

Bon courage !

## 4. Consignes de la double-tâche surveillance et apprentissage probabiliste

### 4.1. Phase d'entraînement à la tâche de surveillance du PFD

Durant la tâche qui va suivre, vous devez **surveiller** un PFD (Primary Flight Display, voir Figure 4), et vous assurer que certaines des valeurs qu'il affiche restent correctes. Vous devrez signaler toute valeur erronée à l'aide des boutons de réponse qui vont vous être présentés. Les valeurs que vous devez surveiller sont les suivantes :

**Mode de navigation** Vous devez vous assurer que le mode de navigation normal est engagé. Ce mode de navigation est indiqué par l'inscription **NAV**, de **couleur verte**, dans la troisième colonne du FMA (Flight Mode Annunciator : voir Figure 4). Vous devrez signaler toute anomalie (modification de l'indicateur) en appuyant sur le bouton **NAV** du clavier. Vous devrez ignorer les autres colonnes du FMA.

**L'altitude** Vous devez vous assurer que l'altitude indiquée demeure **entre 1800 et 2200 pieds**. Vous devrez signaler toute anomalie (l'altitude indiquée n'est pas correcte) en appuyant sur le bouton **ALT** du clavier. Pour rappel : l'altitude de l'appareil est indiquée en centaines, à droite du PFD (voir Figure 4). « *En centaines* » signifie que la dizaine et l'unité ne sont pas indiquées. Par exemple, une altitude de 1000 pieds sera indiqué par la valeur **10-**. Ici, vous devez donc veiller à ce que l'indicateur d'altitude demeure bien entre **18-** et **22-**.

**La vitesse** Vous devez vous assurer que la vitesse affichée reste bien **entre 180 et 220 nœuds**. Vous devrez signaler toute anomalie (la vitesse indiquée n'est pas correcte) en appuyant sur le bouton **SPD** du clavier. Pour rappel : la vitesse de l'appareil est indiquée à gauche du PFD (voir Figure 4).

Durant cette phase, toutes les réponses devront être données **avec la main gauche**. *Retenez bien ces trois consignes, car durant la tâche, votre objectif consistera à déceler le maximum d'anomalies, par rapport à ces indications, et à les signaler le plus rapidement possible.*

Toute bonne prédiction engendrera le rétablissement de la valeur correcte (retour du PFD à son état normal). Durant la phase qui va suivre, vous allez pouvoir vous entraîner à cette tâche pendant cinq minutes.

Pendant cet entraînement, vous devrez ignorer les voyants du bas (carré, rond, croix et triangle), ils correspondent à une autre tâche.

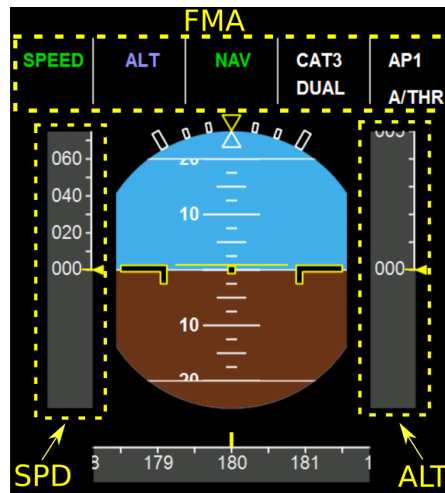


Figure 4 – Le Primary Flight Display

## 4.2. Phase d'entraînement à la tâche de prédiction d'une panne

Durant la prochaine tâche, vous allez devoir prédire la survenue d'une panne moteur, en vous fiant à quatre voyants lumineux (Figure 5). **Chaque voyant sera plus ou moins prédictif d'une panne.**



Figure 5 – Les quatre voyants lumineux de la tâche. Ici le voyant triangle est allumé.

Pour chaque combinaison lumineuse qui apparaîtra (une toutes les quatre secondes), vous devrez dire si elle prédit plutôt une **panne** ou plutôt une **absence de panne**, en appuyant sur le bouton correspondant.

- **CLR** pour signaler une absence de panne
- **ENG** pour signaler une panne

À chaque fois, vous aurez quatre secondes pour prendre votre décision, avant que les voyants ne s'éteignent et que le résultat de votre réponse ne vous soit donné.

Au départ, vous aurez l'impression de répondre au hasard, mais petit à petit, vous apprendrez le lien entre les voyants et la survenue ou non d'une panne, et vous répondrez mieux.

Durant l'entraînement qui va suivre, vous allez devoir répondre à 200 essais successifs. Cette séquence durera environ 18 minutes. Si vous avez la moindre question, merci de la poser maintenant.

### 4.3. Phase d'entraînement à la double-tâche

À partir de maintenant, vous allez devoir effectuer les deux tâches vues (tâche Panne et tâche PFD, en parallèle. Les consignes pour chaque tâche restent inchangées, aussi n'hésitez pas à les consulter à nouveau en cas de doute.

Vous devez faire votre possible pour réaliser la meilleure performance possible.

---

Groupe 1 : **Notez que les deux sous-tâches sont aussi importantes l'une que l'autre et auront le même poids dans le calcul de votre performance.**

Groupe 2 : **Notez que, des deux sous-tâches, la tâche de surveillance du PFD est prioritaire et aura un poids plus élevé que la tâche de prédiction de Panne, dans le calcul de votre score de performance.**

Groupe 3 : **Notez que, des deux sous-tâches, la tâche de prédiction de Panne est prioritaire et aura un poids plus élevé que la tâche de surveillance du PFD, dans le calcul de votre score de performance.**

Vous allez maintenant pouvoir vous entraîner à la double-tâche, pendant cinq minutes. Si vous avez la moindre question, merci de la poser maintenant.

### 4.4. Phase d'évaluation : double-tâche

Nous allons maintenant passer à la phase d'évaluation. Pendant cette phase, vous devrez réaliser les deux tâches que vous avez apprises, simultanément – comme dans la phase précédente.

---

Groupe 1 : **Notez que les deux sous-tâches sont aussi importantes l'une que l'autre et auront le même poids dans le calcul de votre performance.**

Groupe 2 : **Notez que, des deux sous-tâches, la tâche de surveillance du PFD est prioritaire et aura un poids plus élevé que la tâche de prédiction de Panne, dans le calcul de votre score de performance.**

Groupe 3 : **Notez que, des deux sous-tâches, la tâche de prédiction de Panne est prioritaire et aura un poids plus élevé que la tâche de surveillance du PFD, dans le calcul de votre score de performance.**

---

Votre score de performance vous sera donné à la fin de cette séquence.

Bon courage !

## 4.5. Questionnaire d'évaluation des stratégies individuelles

### Questionnaire post-test

*Merci de répondre à ces questions dans l'ordre*

1) *Décrivez la stratégie que vous avez employée pour prédire une panne (tâche du bas).*

2) *Pensez-vous que la stratégie que vous avez employée était satisfaisante ?*

Oui  Non

2) *Pensez-vous que vous avez employé la meilleure stratégie possible ?*

Oui  Non

3) *Comment évaluez-vous le niveau de performance que vous pensez avoir atteint pour la tâche de prédiction de panne ? Merci de l'indiquer sur l'échelle ci-dessous (placez une croix à l'endroit qui vous semble approprié).*

|-----|  
*minimal* *maximal*

4) *Parmi les réponses ci-dessous, cochez la ou les réponses qui décrivent le mieux la stratégie que vous avez utilisée pour prédire vos réponses :*

Deviner

Remarquer que certains voyants prédisaient plutôt une panne, et d'autres plutôt une absence de panne

Si oui, pouvez-vous indiquer lesquels (entourez) :

**Panne**  ×  △  ○

**Absence de panne**  ×  △  ○

Mémoriser les combinaisons de cartes qui étaient associées à une panne ou une absence de panne

5) *Si seulement le voyant en forme de carré (□) s'affichait, quel serait le pourcentage de fois où la réponse à donner serait une panne ? (Répondez par un nombre compris entre 0 et 100) : .....*

6) Si seulement le voyant en forme de triangle ( $\triangle$ ) s'affichait, quel serait le pourcentage de fois où la réponse à donner serait une panne? (Répondez par un nombre compris entre 0 et 100) : .....

7) Si seulement le voyant en forme de rond s'affichait, quel serait le pourcentage de fois où la réponse à donner serait une panne? (Répondez par un nombre compris entre 0 et 100) : .....

8) Si seulement le voyant en forme de croix ( $\times$ ) s'affichait, quel serait le pourcentage de fois où la réponse à donner serait une panne? (Répondez par un nombre compris entre 0 et 100) : .....

9) Si vous saviez qu'une panne moteur allait survenir, et qu'un seul voyant devait s'allumer pour vous prévenir, quel voyant aurait le plus de chance de s'allumer? (Entourez) :

$\times$    $\triangle$

10) Si vous saviez qu'il n'y avait pas de panne moteur, et qu'un seul voyant devait s'allumer pour vous en informer, quel voyant aurait le plus de chance de s'allumer? (Entourez) :

$\times$    $\triangle$

*Codage expérimental*

## 5. Codage de la double-tâche de *N-BACK*

### 5.1. Définition des variables

```

class setVariables:
    def __init__(self, task, phase):
        self.task = task
        self.phase = phase

        self.sizeLimit = 250 #pix
        # self.timeForResponse = 0.8 #sec
        self.timeForFeedback = 1 #sec
        self.stimuli = [str(x) for x in range(10)]
        self.initScore = 0
        self.proportionOfTargets = 0.3
        self.fullscreen = 0
        self.timeBeforePause = 10 #Minutes

    if self.task in ['s']: #Single-N-Back
        self.nbackDiff = [x for x in range(10)] #N-back difficulties
        self.howManySeries = 1
        self.keys = ['r']
        self.uniqueDifficulty = True #If False, each serie has its
own independant difficulty
        self.displayUtility = False
        self.displayPerf = False
        self.numericFeedback = True
        self.displayFeedback = True
        self.displayCost = False
        self.displayCostForEachSerie = False
        self.perfCriterion = True #Match performance criterium to go
next block
        self.inBlockVariation = 0 #Variation of utility in block
        self.trialPerBloc = 30 #Must allow correct fNirs
recording
        self.serieUtil = [1] #Amount of points that are lost in
case of error
        self.taskLabel = 'N-Back_simple'
        self.smi = False
        self.numberOfSuccessiveBlocks = 2
        self.clockForPause = True

    elif self.task in ['v']: #Varied-Utilites
        self.nbackDiff = [0,1,2,3] #N-back difficulties
        self.uniqueDifficulty = True #If False, each serie has its
own independant difficulty
        self.displayUtility = False
        self.displayPerf = True

```



```

self.displayFeedback = False
self.displayCost = True
self.displayCostForEachSerie = True
self.numericFeedback = False
self.inBlockVariation = 1
self.perfCriterium = False
self.isTheBlockVaried = [0,1]           #Block utilities can be either
varied or not
self.serieUtil = [1,3,5]                #Amount of points that are
lost in case of error
self.howManySeries = 3
self.trialPerBloc = 30                  #Must allow correct fNirs
recording
self.voa = 3                            #Variation Onset Asynchrony.
self.keys = ['left','up','right'] # Define keys for response
self.taskLabel = 'Triple_N-Back'
self.smi = True
self.clockForPause = False

elif self.task in ['w']: #WhatBack
self.nbackDiff = [0,1,2]                #N-back difficulties
self.uniqueDifficulty = False           #If False, each serie has its
own independant difficulty
self.displayUtility = True
self.displayPerf = False
self.displayFeedback = True
self.displayCost = True
self.displayCostForEachSerie = False
self.numericFeedback = True
self.inBlockVariation = 0
self.perfCriterium = False
self.nbackDiffString = ['L','M','H']
self.serieUtil = [1,3]                 #Amount of points that are lost in
case of error
self.proportionOfRepetitiveEvents = 1/2.
self.nbackUtilString = ['L','H']
self.howManySeries = 2
self.keys = ['z', 'e'] #Must match howManySeries
self.trialPerBloc = 15                  #Must allow correct fNirs
recording
self.taskLabel = 'Double_N-Back'
self.smi = True
self.clockForPause = False

if self.phase in ['d']:
self.fullscreen = 0
self.timeForResponse = 0.1
self.timeForFeedback = 0.1
self.phaseLabel = 'Debug'

```

```

        self.trialPerBloc = 5
        self.smi = False

    elif self.phase in ['tr']:
        self.phaseLabel = 'Entrainement'
        self.smi = False
        self.timeForResponse = self.howManySeries*0.8    #Time for response
is 800ms by serie

    elif self.phase in ['te']:
        self.smi = False
        self.phaseLabel = 'Test'
        self.timeForResponse = self.howManySeries*0.8    #Time for response
is 800ms by serie

```

## 5.2. Exécution de la tâche

```

#Import modules
#Import modules
from os import path, remove
from psychopy import visual, event, core
from psychopy.iohub import launchHubServer
from random import shuffle
import time
import pdb

from taskVariables import setVariables

#TODO      #   Define training for varied-utilities
#          #

class polygon:
    def __init__(self,numberOfPoints=2,rotation=0,radius=1,translation=0):
        '''Computes angles positions of a polygon'''
        from math import pi,sin,cos
        if numberOfPoints == 1:
            radius = 0
        if numberOfPoints > 2:
            rotation = -pi / 6.
            translation = -0.25
        interval = (pi * 2.) / numberOfPoints

        self.coordinates = [(cos(-pi-rotation-interval*i)*radius,sin(-pi-
rotation-interval*i)*radius+translation) for i in range(numberOfPoints)]

        allX = [x[0] for x in self.coordinates]
        allY = [x[1] for x in self.coordinates]

```

```

        self.center = [sum(allX)/float(numberOfPoints),sum(allY)/float(
numberOfPoints)]

def returnCenter(self):
    return self.center

class display(setVariables):
    '''Assumes displaying of any visual event of the experiment (trial, pauses,
instructions...'''
def __init__(self,task,phase):
    self.task = task
    self.phase = phase

    setVariables.__init__(self, self.task, self.phase)
    self.backgroundColor = [0.8,0.8,0.8]
    self.instructionSize = 20
    self.pleasePressKey = 'Appuyez sur OK pour continuer'
    self.newBlock = "PAUSE: appuyez sur OK pour commencer l'essai suivant"
    self.showSample = "Appuyez sur OK pour afficher l'environnement"
    self.rectColor = [0.9,0.9,0.9]
    self.textColor = 'black'
    self.lightText = 'gray'
    self.coinColor = 'Gold'
    self.coinBorder = 'GoldenRod'
    self.main = visual.Window(fullscr=self.fullscreen, size=(1680, 1050),
color=self.backgroundColor,monitor="testMonitor", waitBlanking=True)
    self.screenWidth = self.main.size[0]
    self.screenHeight = self.main.size[1]
    screenMiddle = int(self.screenWidth/2.)
    self.screenRatio = self.screenHeight / float(self.screenWidth)
    # self.triggerLabel =

    serieInterWidth = int(self.screenWidth/(self.howManySeries+1))
    rectSize = int(serieInterWidth*(2/5.))

    if rectSize > self.sizeLimit: #Limit rectangle width to...
        rectSize = self.sizeLimit

    diffRectSize = int(rectSize/2.)
    digitSize = int(0.8*rectSize)
    diffSize = int(0.8*diffRectSize)
    self.scoreSize = diffSize
    self.scorePos = [0,0.4*self.screenHeight]

    resRectSize = int(0.90*rectSize)
    coinWidth = int(0.8*(rectSize/max(self.serieUtil)))
    coinInterWidth = int(rectSize/max(self.serieUtil))

    self.nbackDiffPos = []

```

```

self.coinPos = []
self.seriePos = []

points = polygon(self.howManySeries)
self.centerPoint = points.returnCenter()

for s in range(self.howManySeries):
    self.seriePos.append([int(points.coordinates[s][0]*0.3*self.
screenRatio*self.screenWidth),int(points.coordinates[s][1]*0.3*self.
screenHeight)])

for thisPos in self.seriePos:
    self.nbackDiffPos.append([thisPos[0],thisPos[1]-rectSize])
    for coin in range(max(self.serieUtil)):
        self.coinPos.append([thisPos[0]-(rectSize/2.)+(coinInterWidth
/2.)+(coin*coinInterWidth), thisPos[1]+0.8*rectSize])

#Define three main rectangles
self.rect = []
for position in self.seriePos:
    thisRect = visual.Rect(self.main,units='pix',width=rectSize,height=
rectSize, pos=position, lineColor=self.textColor, fillColor = self.
rectColor)
    self.rect.append(thisRect)

#Define three response rectangles
self.resRect = []
for position in self.seriePos:
    thisRect = visual.Rect(self.main,units='pix',width=resRectSize,
height=resRectSize, lineColor = 'black', pos=position, opacity=0.5)
    self.resRect.append(thisRect)

#Define ten numbers [0..9]
self.num = []
for stimulus in self.stimuli:
    thisNum = visual.TextStim(self.main,units='pix',text=stimulus,
color=self.textColor, height=digitSize)
    self.num.append(thisNum)

self.diffRect = []
for position in self.nbackDiffPos:
    thisRect = visual.Rect(self.main,units='pix',width=diffRectSize,
height=diffRectSize, pos=position, lineColor=self.textColor, fillColor =
self.rectColor)
    self.diffRect.append(thisRect)

#Define three digits for nback instruction (0,1,2,3)
self.nbackNum = []
self.nbackRemember = []

```

```

    if self.uniqueDifficulty:
        for thisBack in self.nbackDiff:
            thisNbackNum = visual.TextStim(self.main,units="pix", text='
RANG-'+str(thisBack), color=self.textColor, pos = [0,-0.3*self.screenHeight
], height=diffSize*0.8)
            self.nbackNum.append(thisNbackNum)
            thisRemember = visual.TextStim(self.main,units="pix", text='
RANG-'+str(thisBack), color=self.lightText, pos = [-0.4*self.screenWidth
,+0.4*self.screenHeight], height=diffSize*0.6)
            self.nbackRemember.append(thisRemember)
        else:
            for thisBack in self.nbackDiff:
                thisNbackNum = visual.TextStim(self.main, units="pix",text=str(
thisBack), color=self.textColor, height=diffSize)
                self.nbackNum.append(thisNbackNum)

#Define visual stimuli for utility information
self.coins = [] #Amount of gold
for position in self.coinPos:
    thisUtil = visual.Circle(self.main, units='pix', radius=coinWidth
/2, fillColor=self.coinColor, lineColor=self.coinBorder, pos=position,
edges=20)
    self.coins.append(thisUtil)

#Define two colored rectangles for performance displaying. Only width
and position to be redefined
self.maxPoints = sum((stru.trialPerBloc*stru.proportionOfTargets)*x for
x in stru.serieUtil)
self.perfBarWidth = 0.15*self.screenHeight
# self.perfBarWidth = 0.5*self.screenWidth
perfWidth = 0.03*self.screenWidth
self.redPerf = visual.Rect(self.main,units="pix",width=perfWidth,
height=0, pos=self.centerPoint, fillColor = 'red')
self.greenPerf = visual.Rect(self.main,units="pix", width=perfWidth,
height=0, pos=self.centerPoint, fillColor='green')

#Define a red circle for error feedback
self.redFeedback = []
for position in self.seriePos:
    thisFeed = visual.Circle(self.main, units="pix", radius = int(0.15*
rectSize), edges = 32 , pos=position, fillColor='red')
    self.redFeedback.append(thisFeed)

self.roi = [] #Log ROI
for i in range(self.howManySeries):
    thisROI = [[self.seriePos[i][0]-int(rectSize/2)+int(self.
screenWidth/2),self.seriePos[i][0]+int(rectSize/2)+int(self.screenWidth/2)
],[self.seriePos[i][1]-int(rectSize/2)+int(self.screenHeight/2),self.

```

```

seriePos[i][1]+int(rectSize/2)+int(self.screenHeight/2))]
    self.roi.append(thisROI)

    self.pRoi = []
    #Log priority ROIs
    for i in range(self.howManySeries):
        thisROI = [[int(self.seriePos[i][0]-rectSize/2+self.screenWidth/2),
int(self.seriePos[i][0]+rectSize/2+self.screenWidth/2)], [int(self.seriePos[
i][1]+self.screenHeight/2+0.8*rectSize-1.2*coinWidth/2), int(self.seriePos[i
][1]+self.screenHeight/2+0.8*rectSize+1.2*coinWidth/2)]]
        self.pRoi.append(thisROI)

    self.dRoi = []
    #Log difficulty ROIs
    for i in range(self.howManySeries):
        thisROI = [[int(self.seriePos[i][0]+self.screenWidth/2-diffRectSize
/2), int(self.seriePos[i][0]+self.screenWidth/2+diffRectSize/2)], [int(self.
seriePos[i][1]-rectSize+self.screenHeight/2-diffRectSize/2), int(self.
seriePos[i][1]-rectSize+self.screenHeight/2+diffRectSize/2)]]
        self.dRoi.append(thisROI)

    print self.dRoi, self.pRoi

def drawInstructions(self, instructions):
    '''Draw lines of instructions, until the <end> signal. Clear buffer at
the <clear> signal'''
    lineY = 200
    self.main.winHandle.activate()
    for thisLine in instructions:
        if '<blank>' in thisLine:
            lineY -= 35
        elif '<clear>' in thisLine or '<end>' in thisLine:
            pressReturn = visual.TextStim(self.main, units = "pix", text=self
.pleasePressKey, color=self.textColor, height=self.instructionSize, pos
=(0, -0.4*self.screenHeight), wrapWidth=0.6*self.screenWidth)
            pressReturn.draw()
            self.main.flip(clearBuffer=False)
            #cedrus.waitKeyPress()
            keyboard.waitForPresses(maxWait=None, keys=['a'])
            lineY = 200
            self.main.flip()
        elif '<sample>' in thisLine:
            pressReturn = visual.TextStim(self.main, units = "pix", text=self
.showSample, color=self.textColor, height=self.instructionSize, pos=(0, -0.4*
self.screenHeight), wrapWidth=0.6*self.screenWidth)
            pressReturn.draw()
            self.main.flip(clearBuffer=False)
            keyboard.waitForPresses(maxWait=None, keys=['a'])
            self.main.flip()

```

```

        self.showEmptyEnvironment()
        lineY = 200
    else:
        thisText = visual.TextStim(self.main, units='pix',text=thisLine
, color=self.textColor, height=self.instructionSize,pos = (0, lineY),
alignHoriz='center', wrapWidth=0.8*self.screenWidth)
        thisText.draw()
        self.main.flip(clearBuffer=False)
        lineY -= 30

def showEmptyEnvironment(self):
    if self.uniqueDifficulty:
        self.nbackNum[0].draw() #0-BACK
    else:
        for i in range(self.howManySeries):
            self.diffRect[i].draw()
            self.nbackNum[0].setPos(self.nbackDiffPos[i])
            self.nbackNum[0].draw()

    if self.displayUtility:
        self.drawCoins([max(self.serieUtil)]*self.howManySeries)

    for i in range(self.howManySeries):
        self.rect[i].draw() # empty rectangles
    for i in range(self.howManySeries):
        thisNumber = self.num[0]
        thisNumber.setPos(self.seriePos[i])
        thisNumber.draw()

    backToInstructions = 'Appuyez sur ESPACE pour retourner aux
instructions'

    pressSpace = visual.TextStim(self.main,units = "pix",text=
backToInstructions,color=self.textColor,height=self.instructionSize,pos
=(0,-0.4*self.screenHeight),wrapWidth=0.6*self.screenWidth)

    pressSpace.draw()
    self.main.flip(clearBuffer=True)
    keyboard.waitForPresses(maxWait=None, keys=['a'])
    self.main.flip()
    core.wait(1)

def waitKeypress(self,trialText):
    """Display a wait for keypress prompt"""
    stimulus = visual.TextStim(self.main, text = trialText, color = self.
textColor, alignHoriz='center', pos=(0,0))
    pressReturn = visual.TextStim(self.main,units = "pix",text=self.
pleasePressKey,color=self.textColor,height=self.instructionSize,pos
=(0,-0.4*self.screenHeight),wrapWidth=0.6*self.screenWidth)

```

```

stimulus.draw() # automatically draw every frame
pressReturn.draw()
self.main.flip(clearBuffer=True)
keyboard.waitForPresses(maxWait=None, keys=['a'])
self.main.flip()
core.wait(1)

def displayPreviousScore(self,previousScore):
    """Display score of the previous block at the top of the screen"""
    string = 'Score_□=□'+ str(previousScore)+'_□points'
    dispScore = visual.TextStim(self.main,units = "pix",text=string,color=
self.textColor,height=self.instructionSize*1.5,pos=self.scorePos,wrapWidth
=0.6*self.screenWidth)
    dispScore.draw()

def newBlockPause(self, difficulties, score, previousScore, utilities,
displayPreviousScore):
    """Display a wait for key press at the bottom of the screen"""
    pressReturn = visual.TextStim(self.main,units = "pix",text=self.
newBlock,color=self.textColor,height=self.instructionSize*1.1,pos=(0,-0.4*
self.screenHeight),wrapWidth=0.6*self.screenWidth) ###
    self.drawEnvironment(difficulties, 0, utilities)
    if displayPreviousScore:
        self.displayPreviousScore(previousScore)
    pressReturn.draw()

# if stru.smi:
#     self.sendTriggerToSMI(self.triggerLabel,'pause')

self.main.flip()
keyboard.waitForPresses(maxWait=None, keys=['a'])
self.drawEnvironment(difficulties, score, utilities)
self.main.flip()
core.wait(0.5)

def drawCoins(self,utilities,color,border):
    utilities = [abs(x) for x in utilities]
    for i,u in enumerate(utilities):
        for c in range(u):
            self.coins[max(self.serieUtil)*i+c].fillColor = color[i]
            self.coins[max(self.serieUtil)*i+c].lineColor = border[i]
            self.coins[max(self.serieUtil)*i+c].draw()

def drawEnvironment(self, difficulties, score, utilities):
    '''Refresh the complete environment in the buffer'''
    if self.uniqueDifficulty:
        self.nbackRemember[difficulties[0]].draw()
    else:
        for i,thisDiff in enumerate(difficulties):

```



```

        # self.diffRect[i].draw() #Difficulties rectangles
        self.nbackNum[thisDiff].setPos(self.nbackDiffPos[i])
        self.nbackNum[thisDiff].draw()
    for i,thisDiff in enumerate(difficulties):
        self.rect[i].draw() #Empty rectangles
        if self.displayUtility:
            self.drawCoins(utilities,['Gold']*self.howManySeries,['
GoldenRod']*self.howManySeries)
        if self.displayPerf:
            self.drawPerf()

def drawNumbers(self,numbers):
    """Put number into the buffer, don't forget to (re)draw rectangle"""
    for i,number in enumerate(numbers):
        thisNumber = self.num[number]
        thisNumber.setPos(self.seriePos[i])
        thisNumber.draw()

def drawResponse(self,responses):
    """Change rectangle color for a response"""
    for i,res in enumerate(responses):
        if res:
            self.resRect[i].draw()

def computePerfBar(self,currentScore):
    '''Display a red|green bar with red and green proportion as a function
of current score'''
    if abs(currentScore) > self.maxPoints:
        if currentScore < 0:
            currentScore = -self.maxPoints
        else:
            currentScore = self.maxPoints
    redHeight = int(((self.maxPoints - currentScore)/(self.maxPoints*2))*
self.perfBarWidth)
    greenHeight = int(((self.maxPoints + currentScore)/(self.maxPoints*2))*
self.perfBarWidth)

    yGreen = self.centerPoint[1] - self.perfBarWidth/2. + greenHeight/2.
    yRed = yGreen + greenHeight/2. + redHeight/2.
    self.redPerf.height = redHeight
    self.greenPerf.height = greenHeight
    self.redPerf.pos = (self.centerPoint[0],yRed)
    self.greenPerf.pos = (self.centerPoint[0],yGreen)

def drawPerf(self):
    self.redPerf.draw()
    self.greenPerf.draw()

def drawFeedback(self,cost,multipleCost,numeric):

```

```

feedbacks = []
if not multipleCost:
    cost = sum(cost)
    if cost > 0:
        feedbackColor = 'Green'
        sign = '+'
    elif cost == 0:
        feedbackColor = 'Black'
        cost = '='
        sign = ''
    else:
        feedbackColor = 'Red'
        sign = ''
    if numeric:
        feedback = visual.TextStim(self.main, units = "pix", text =
sign+str(cost), pos = self.centerPoint, height = self.scoreSize,color =
feedbackColor)
        feedback.draw()
    else:
        if not numeric:
            coinColor = []
        for c,thisCost in enumerate(cost):
            if thisCost > 0:
                feedbackColor = 'Green'
                sign = '+'
            elif thisCost == 0:
                feedbackColor = 'Black'
                thisCost = '='
                sign = ''
            else:
                feedbackColor = 'Red'
                sign = ''
            if numeric:
                feedback = visual.TextStim(self.main, units = "pix", text =
sign+str(thisCost), pos = (self.seriePos[c][0],self.seriePos[c][1]+0.15*
self.screenHeight), height = self.scoreSize,color = feedbackColor)
                feedback.draw()
            elif not numeric:
                coinColor.append(feedbackColor)

        if not numeric:
            self.drawCoins(cost,coinColor,coinColor)

def feedback(self,targets,responses,difficulties,currentScore, utilities):
    feedbackPolitic = [0,-1,+1]
    targResp = [x+y for x,y in zip(targets,responses)]
    weights = []
    for x in range(len(targResp)):
        weights.append(feedbackPolitic[targResp[x]])

```

```

points = [x*y for x,y in zip(weights,utilities)]

cost = sum(points)
currentScore += cost

self.drawEnvironment(difficulties, currentScore, utilities)

if stru.smi:
    self.sendTriggerToSMI('feed')
self.main.flip()
core.wait(0.2)

self.drawEnvironment(difficulties, currentScore, utilities)
if self.displayFeedback:
    for i,thisPoint in enumerate(points):
        if thisPoint<0:
            self.redFeedback[i].draw()
if self.displayCost:
    self.drawFeedback(points,self.displayCostForEachSerie,self.
numericFeedback)

self.main.flip()

core.wait(self.timeForFeedback)

self.drawEnvironment(difficulties, currentScore, utilities)
self.main.flip()
core.wait(0.2)

return currentScore, cost

def trial(self, numbers, targets, difficulties, score, utilities):
    """Display trial"""
    timer = core.Clock() #Timer of trial begins
    rt = [None]*self.howManySeries #Response times
    dispRect = [0]*self.howManySeries # Control displaying of color when
responding
    allRes = []

    if stru.smi:
        self.sendTriggerToSMI('onset')

    #Draw numbers and score in buffer
    self.computePerfBar(score)
    self.drawEnvironment(difficulties, score, utilities)
    self.drawNumbers(numbers)

    self.main.flip() #And display it (do not remove numbers and score from
buffer)

```

```

begin = timer.getTime()

responses = []

rt = [None]*stru.howManySeries

keyboard.getKeys(clear=True)
while timer.getTime() < stru.timeForResponse:
    #~ key = cedrus.getResponse() #Response is response string
    keys = keyboard.getPresses(clear=False)
    key = [k.char for k in keys]

    if len(key):
        key = key[0]
        if key in stru.keys and key not in [x[0] for x in responses]: #
If new allowed response key
            thisTime = timer.getTime()
            thisRt = thisTime - begin
            serieIdx = stru.keys.index(key)
            rt[serieIdx] = thisRt
            response = [key,serieIdx]
            responses.append(response)
            for i,thisResp in enumerate(responses):
                dispRect[thisResp[1]] = 1
                win.drawEnvironment(difficulties, score, utilities)
                win.drawNumbers(numbers)
                win.drawResponse(dispRect)
                win.main.flip()
            keyboard.getKeys(clear=True)

    score, cost = self.feedback(targets,dispRect,difficulties,score,
utilities)
    return score, rt, cost

def buildTrigger(self,independentVariables):
    '''Return a string sequence for triggering SMI'''
    string = ''
    for i,thisVar in enumerate(independentVariables):
        varLabel = thisVar[0]
        varValues = thisVar[1]
        if len([varValues]) < 2:
            varValues = [varValues]
        string += varLabel + ':'
        for thisValue in varValues: #Is a function of HowManySeries
            string += str(thisValue)
        if i+1 < len(independentVariables):
            string += '*'
    self.triggerLabel = string

```

```

def sendTriggerToSMI(self,phase):
    '''Send a trigger of the following form : vi1*vi2*...*viN_trialPhase'''
    string = self.triggerLabel + '_' + phase
    triggerSMI(string)

class struct(setVariables):
    '''Computes the whole task structure (blocks and trials) as a function of
    task critic variables'''
    def __init__(self, task,phase):
        from itertools import product, combinations_with_replacement
        from random import shuffle
        self.task = task
        self.phase = phase

        setVariables.__init__(self, self.task, self.phase)

        self.sequence = [] #A member of sequence is a n-tuple of difficulty/
        utility values
        self.utilitiesChanged = []
        self.difficultiesChanged = []
        self.inBlockVariation = []
        self.successiveBlocks = None

        #Compute BLOCKS
        if self.task in ['w']: #For WhatBack

            if self.phase in ['tr', 'd']: #Training or Debug
                toShuffle = [[(0,0),(1,3)],[(1,0),(3,1)],[(1,2),(1,3)],[(1,0)
,(3,3)],[(2,1),(3,3)],[(2,2),(1,3)],[(2,2),(3,3)]]

                self.sequence = [[(0,0),(1,1)]]
                shuffle(toShuffle)
                for i in toShuffle:
                    self.sequence.append(i)

            if self.phase in ['te']: #Test

                nbackDiffCombi = [x for x in (product(self.nbackDiff,repeat=
self.howManySeries))] # Symetric configurations are not repeated
                nbackUtilCombi = [x for x in (product(self.serieUtil,repeat=
self.howManySeries))]

                availableCombinations = [[x,y] for x in nbackDiffCombi for y in
nbackUtilCombi] #All possible combinations (order matters)

                self.sequence.append(availableCombinations[0]) #First block
is always (0,1)-(0,1)
                del availableCombinations[0]

```

```

maxIterations = 500
for i in range(len(availableCombinations)):
    iter = 0

    #Randomization. Blocs must vary for at least one dimension.
    No repetition of identicals blocks
    loopThis = True
    while loopThis and iter<maxIterations:
        changedDiff = 0
        changedUtil = 0

        shuffle(availableCombinations)

        difficultyDiff = [abs(x-y) for (x,y) in zip(
availableCombinations[0][0],self.sequence[i][0])]
        utilityDiff = [abs(x-y) for (x,y) in zip(
availableCombinations[0][1],self.sequence[i][1])]

        if sum(difficultyDiff):
            changedDiff = 1
        if sum(utilityDiff):
            changedUtil = 1

        if (changedDiff+changedUtil)>0: #only one variable must
change
            loopThis = False
            iter += 1

        self.sequence.append(availableCombinations[0])
        del availableCombinations[0]

    if self.task in ['v']: #For Varied-Priorities

        if self.phase in ['tr', 'd']: #For Training or Debug
            repeatCombination = 1
        if self.phase in ['te']:
            repeatCombination = 2

        utilDiffCombi = [(x,y) for x in self.nbackDiff for y in self.
isTheBlockVaried]
        allCombinationsLength = len(utilDiffCombi)

        config = []
        difficulties = []
        utilities = []

        lastUtilities = False
        diffUtil = [0,0,0]

```

```

    for i in range(repeatCombination):
        combiCopy = list(utilDiffCombi)
        shuffle(combiCopy)
        while combiCopy[0][0]>0: #Test must begin with 0-BACK
            shuffle(combiCopy)
        config.extend(combiCopy) #Extend to merge the two lists into
one

    for i,serie in enumerate(config):
        difficulties = [serie[0]]*self.howManySeries #Makes the three
difficulties the same

        self.inBlockVariation.extend([serie[1]])

        utilities = list(self.serieUtil)

        shuffle(utilities)
        if lastUtilities:
            while sum(diffUtil)<6: #Check that utility is varied enough
                diffUtil = [abs(x-y) for x in lastUtilities for y in
utilities]

                utilities = list(self.serieUtil)
                shuffle(utilities)

            lastUtilities = utilities #Remember lastUtilities

        self.sequence.append([tuple(difficulties), tuple(utilities)])

        # self.successiveBlocks = int(len(self.sequence)/(self.
numberOfPauses+1.))

    if self.task in ['s']: #For single-N-Back
        self.maxOfBlocks = 40
        if self.phase in ['te', 'd']: #For test and debug
            for i in range(self.maxOfBlocks):
                self.sequence.append([[0],[1]])

    if not self.inBlockVariation:
        self.inBlockVariation = [0]*len(self.sequence)

def setTrials(self,thisBlock, isVaried, blockNumber):
    '''Set trials values as a function of a block member (diff/util) and of
inBlockVariation, utilities and difficulties variations, performance
criterium'''
    global numberList
    from random import choice, randint

    difficulties = thisBlock[0]

```

```

utilities = thisBlock[1]
numberLists = []
targetLists = []
utilityLists = []
difficultyLists = []

for d,thisDiff in enumerate(difficulties):
    #Generate list of 0,1 (non-target, target), please avoid target on
n first trial
    binarySequence = self.writeBinarySequence()
    if not self.uniqueDifficulty: #If multiple difficulties levels
        targets = [0]*max(difficulties) + binarySequence #Number of
additional trial is max of n-back difficulty
    else:
        targets = [0]*(difficulties[0])+binarySequence

    numbers = [None] * len(targets)

    for i,target in enumerate(targets):
        numberToAvoid = []
        if target and thisDiff==0:
            thisNum = 0
        if target and thisDiff !=0:
            thisNum = numbers[i-thisDiff]
        if not target:
            if thisDiff==0:
                numberToAvoid.append(0)
            else:
                numberToAvoid.append(numbers[i-thisDiff])
        if i<thisDiff and blockNumber!=0: #If trial can be a
illusory target
            try:
                numberToAvoid.append(numberList[blockNumber-1][len(
targets)-thisDiff+i][d])
            except:
                pass
            thisNum = int(choice(self.stimuli))
            while thisNum in numberToAvoid: #Assure number is different
from target
                thisNum = int(choice(self.stimuli))
            numbers[i] = thisNum
        numberLists.append(numbers)
        targetLists.append(targets)

numberLists = [tuple(i) for i in zip(*numberLists)]
targetLists = [tuple(i) for i in zip(*targetLists)]

for u,tr in enumerate(numbers):
    difficultyLists.append(difficulties)

```



```

    if isVaried:
        variationTrial = int(self.trialPerBloc/2.0)+((-1)**(randint(1,100))
)*randint(0,self.voa) #Middle of blocks plus/minus a number between 0 and
voa
        newUtilities = self.varyUtilities(utilities)

    for u,tr in enumerate(numbers):
        if u<variationTrial:
            utilityLists.append(utilities)
        else:
            utilityLists.append(newUtilities)
    else:
        for u,tr in enumerate(numbers):
            utilityLists.append(utilities)

    #Convert variables to lists
    numberLists = [list(x) for x in numberLists]
    targetLists= [list(x) for x in targetLists]
    utilityLists= [list(x) for x in utilityLists]
    difficultyLists= [list(x) for x in difficultyLists]

    # print numberLists, targetLists, utilityLists, difficultyLists
    return numberLists, targetLists, utilityLists, difficultyLists

def writeBinarySequence(self):
    '''Write a random sequence of 0 and 1, with a specific proportion of 1
    ...
    ones = [1 for i in range(int(self.trialPerBloc*self.proportionOfTargets
))]
    zeros = [0 for i in range(int(self.trialPerBloc-len(ones)))]
    onesAndZeros = ones + zeros
    shuffle(onesAndZeros)
    return onesAndZeros

def varyUtilities(self,utilities):
    newUtilities = list(utilities)
    shuffle(newUtilities)
    self.diffUtil = [abs(x-y) for x in utilities for y in newUtilities]
    while min(self.diffUtil)!=0:
        shuffle(newUtilities)
        self.diffUtil = [abs(x-y) for x,y in zip(utilities,newUtilities)]

    newUtilities = tuple(newUtilities)
    return newUtilities

class logger:
    '''Log any information either in a .txt or a .csv file'''

```

```

def __init__(self):
    pass

def writeCsv(self,fileName, row):
    import csv
    outfile = open("log/"+fileName, "ab")
    writer = csv.writer(outfile, lineterminator='\n', delimiter=",")
    writer.writerow(row)
    outfile.close()

class engine:
    '''Realize various operations on data'''
    def __init__(self):
        pass

    def readInstructions(self,filename):
        '''Return instructions lines in a list'''
        import codecs
        instructions = []
        with codecs.open('instructions/'+filename,'r',encoding='utf-8') as f:
            for line in f.readlines():
                instructions.append(line)
        return instructions

    def getNextBlock(self,errors,rank):
        '''Compute average performance for some last blocks and return a
        continue/stop experiment signal'''
        targetNumber = (trialPerBloc*proportionOfTargets)
        targetRate = 1 - sum(errors)/targetNumber

        if targetRate > 0.7:
            rank += 1
        elif targetRate < 0.5:
            rank -= 1
        if rank < 0:
            rank = 0
        print 'Target_rate:',targetRate
        return rank, targetRate

    def clockForPause(self,initTime,maxTime):
        '''Clock that initiate a pause each 15 minutes'''
        from datetime import datetime, timedelta
        displayPause = False
        thisTime = datetime.now()
        elapsedTime = thisTime - initTime

        if elapsedTime > timedelta(minutes=maxTime):
            displayPause = True
            initTime = datetime.now() #Re-initialize time

```

```

        return displayPause, initTime

def returnDatetime(self):
    from datetime import datetime
    time = datetime.now()

    return time

if __name__ == "__main__": #Do not execute when imported in other module

    varToLog = {} #This dict filled with variables to be logged

### PREAMBLE ###

# create the process that will run in the background polling devices
io=launchHubServer()
keyboard = io.devices.keyboard

print('Welcome. Choose your task. ')

taskAtHand = raw_input('[S]ingle-back, [V]aried-priority, [W]hatBack?').lower()
taskPhase = raw_input('[T]raining, [T]esting or [D]ebug?').lower()

if taskPhase not in ['d']:
    partID = raw_input('Participant ID: ')
else:
    partID = '0'

fileName = partID+'_'+taskAtHand+'_'+taskPhase+'.csv' #Build fileName

if path.isfile('log/'+fileName):
    print(fileName+' already exists')
    whatToDo = raw_input("[0]verwrite? [A]ppend?").lower()
    if whatToDo in ['o']:
        remove('log/'+fileName)

### DEFINITIONS ###
stru = struct(taskAtHand,taskPhase) #Define task structure

### SMI CALIBRATION ###
if stru.smi:
    from smiFunctions import *
    from iViewXAPI import *
    #SMI only for test phase
    initializeSMI()

win = display(taskAtHand,taskPhase) #Define task variables
eng = engine()

```

```

log = logger()

### START SESSION ###
win.waitKeypress('Tache:␣'+win.taskLabel+'\nSession:␣'+win.phaseLabel)

# Log Regions of Interest (once)
coord = ['x','y']
letters = ['a','b']
for j in range(stru.howManySeries):
    for r in range(2):
        for s in range(2):
            coor = coord[r]
            varLabel = coor+str(j+1)+letters[s]
            varToLog[varLabel] = win.roi[j][r][s]

## BLOCK LEVEL ##
getNextBlock = True
scorePerBlock = []
numberList = []

if stru.smi: #SMI only for test phase
    recordSMI()

initTime = eng.returnDatetime()

for bloc,thisBlock in enumerate(stru.sequence):
    if getNextBlock:
        varToLog['bloc'] = bloc

        print ('\n\nBloc'+str(bloc+1)+' UtilVaried:␣'+str(stru.
inBlockVariation[bloc])), thisBlock

        score = stru.initScore

        numbers, targets, utilities, difficulties = stru.setTrials(
thisBlock,stru.inBlockVariation[bloc], bloc)
        numberList.append(numbers)

        if bloc==0:
            win.newBlockPause(difficulties[0],score,0,utilities[0],False)
        else:
            if stru.clockForPause:
                displayPause, initTime = eng.clockForPause(initTime, stru.
timeBeforePause)
            if displayPause:
                win.newBlockPause(difficulties[0],score,0,utilities[0],
False)

        if sum(stru.inBlockVariation) or stru.task in ['w']:

```

```

        win.newBlockPause(difficulties[0],score, scorePerBlock[bloc
-1], utilities[0], True)

        if stru.perfCriterium and (bloc)%stru.numberOfSuccessiveBlocks
==0: #In case of performance criterium
            win.newBlockPause(difficulties[0],score, sum(scorePerBlock
[(bloc-3):bloc]), utilities[0], False) #Score not displayed

        win.drawEnvironment(difficulties[0],score,utilities[0])

        ## TRIAL LEVEL ##
        for tr in range(len(numbers)):

            independantVariables = []
            for i,thisDiff in enumerate(difficulties[tr]):
                varLabel = 'diff'+str(i+1)
                varToLog[varLabel] = thisDiff
                independantVariables.append([varLabel,thisDiff])
            for i,thisUtil in enumerate(utilities[tr]):
                varLabel = 'util'+str(i+1)
                varToLog[varLabel] = thisUtil
                independantVariables.append([varLabel,thisUtil])
            for i,thisTar in enumerate(targets[tr]):
                varLabel = 'targ'+str(i+1)
                varToLog[varLabel] = thisTar
                independantVariables.append([varLabel,thisTar])

            if sum(stru.inBlockVariation) and tr>0:
                if sum([abs(x-y) for x,y in zip(utilities[tr], utilities[tr
-1])]): #If utilities differ from precedent trial
                    stru.inBlockVariation[bloc] = 2
                    varToLog['utilVariatied'] = stru.inBlockVariation[bloc]

                independantVariables.append(['utilVariatied',varToLog['
utilVariatied']])

            win.buildTrigger(independantVariables)

            if tr==0 and stru.smi:
                win.sendTriggerToSMI('begin')

            varToLog['trial'] = tr

            tsBegin = time.time()
            score, rt, cost = win.trial(numbers[tr], targets[tr],
difficulties[tr], score, utilities[tr])
            tsEnd = time.time()

```

```

        for r,res in enumerate(rt): #Convert eventual response time in
float (better precision for rounding)
            if res!=None:
                res = float(res)
                res = "{0:.4g}".format(res)
            else:
                res = 'NaN'
            varLabel = 'rt'+str(r+1)
            varToLog[varLabel] = res

varToLog['cost'] = cost
varToLog['score'] = score
varToLog['tsBegin'] = tsBegin
varToLog['tsEnd'] = tsEnd

if bloc==0 and tr==0:
    log.writeCsv(fileName, sorted(varToLog.keys()))

    thisRow = [value for (key, value) in sorted(varToLog.items())]
    log.writeCsv(fileName, thisRow)

if stru.smi:
    win.sendTriggerToSMI('end')
    scorePerBlock.append(score)

if stru.perfCriterium and (bloc+1)%stru.numberOfSuccessiveBlocks
==0: #In case of performance criterium
    thisPerf = float(sum(scorePerBlock[(bloc+1-stru.
numberOfSuccessiveBlocks):bloc]))/stru.numberOfSuccessiveBlocks #Evaluate
score on 4 last blocks
    if thisPerf < 0:
        getNextBlock = False
    elif thisPerf > 0:
        for i in range(stru.numberOfSuccessiveBlocks):
            stru.sequence[bloc+i+1][0] = [x+1 for x in stru.
sequence[bloc+i+1-stru.numberOfSuccessiveBlocks][0]]
            print 'Scores_:', scorePerBlock

instruction = 'Fin_de_cette_session._Merci_!'
win.waitKeyPress(instruction)

if stru.smi:
    closeSMI()

win.main.close()

```

## 6. Codage de la double-tâche de surveillance

### 6.1. Définition des variables et exécution de la tâche

```
# -*- coding: utf-8 -*-
from __future__ import division
import os, sys, inspect
from shutil import move
from psychopy import visual, core, event
from random import randint, random, shuffle, choice
from itertools import product
import time
import pdb

currentDir = os.path.dirname(os.path.abspath(inspect.getfile(inspect.
    currentframe()))))
parentDir = os.path.dirname(currentDir)
sys.path.insert(0,parentDir)
import functions as fun

# RECORDING DATA #
partID = raw_input('Participant_ID:_')

csvTrial = {
    'ExpName': 'dualMonitoring',
    'Subject': partID
}

if partID != '99': # Not a test
    csvTrial['language'] = raw_input('(F)rench,(E)nglish:_')
    csvTrial['age'] = int(raw_input('Age_du_sujet:_'))
    csvTrial['sexe'] = raw_input('Sexe_du_sujet_(M,F):_')
    csvTrial['oeil'] = raw_input('Oeil_directeur_(G,D):_')
    csvTrial['lunettes'] = raw_input('Lunettes_(1,0):_')
else:
    csvTrial['age'] = 'nan'
    csvTrial['sexe'] = 'nan'
    csvTrial['oeil'] = 'nan'
    csvTrial['lunettes'] = 'nan'
    csvTrial['language'] = 'f'
useSmi = False

if useSmi:
    import smiFunctions as smi
    smi.initializeSMI()

# VARIABLES
```

```

language = 'French' if csvTrial['language'].upper() == 'F' else 'English'
imagePath = '../img/'
targetDuration = 4
minimalISI = 1 # sec (between off and onset)
targetPerTrial = 5
howManyBlocs = 1
desiredRefreshingRate = 20 # Hz
frameInterval = desiredRefreshingRate/1000.
letterPerTask = 85
feedbackDuration = 0.5
feedbackFrames = int(feedbackDuration/frameInterval)
rotationSpeed = 6
letter = '|'

attributes = {
'time' : {'values' : [targetDuration-1, targetDuration+1]},
'error' : {'values' : [2,4]},
'points' : {'values' : [1,3]}
}

task = {
# Task A
'A' : {
'x_task' : -300,
'y_task' : 100,
'responseKey' : ['lctrl'],
'attributes' : {'error' : {}, 'time' : {}, 'points' : {}}
},

# Task B
'B' : {
'x_task' : 300,
'y_task' : 100,
'responseKey' : ['rctrl'],
'attributes' : {'error' : {}, 'time' : {}, 'points' : {}}
}
}

### Test sequencing

sequence = [list(x) for x in product('<>=',repeat=len(attributes))]
conditionNumbers = range(len(sequence))
shuffle(conditionNumbers)

sequence = [sequence[i] for i in conditionNumbers]

for t,trial in enumerate(sequence):
    for i,thisAttrib in enumerate(attributes):
        x1, x2 = 0, 0

```



```

while x1 >= x2:
    x1 = choice(attributes[thisAttrib]['values'])
    x2 = choice(attributes[thisAttrib]['values'])

if trial[i] == '<':
    task['A']['attributes'][thisAttrib][str(t)] = x1
    task['B']['attributes'][thisAttrib][str(t)] = x2
elif trial[i] == '=':
    if random()<0.5:
        task['A']['attributes'][thisAttrib][str(t)] = x1
        task['B']['attributes'][thisAttrib][str(t)] = x1
    else:
        task['A']['attributes'][thisAttrib][str(t)] = x2
        task['B']['attributes'][thisAttrib][str(t)] = x2
elif trial[i] == '>':
    task['A']['attributes'][thisAttrib][str(t)] = x2
    task['B']['attributes'][thisAttrib][str(t)] = x1

### Training sequencing

atrain_conditionNumbers = [3, 5, 7, 10, 19]
shuffle(atrain_conditionNumbers)

atrain_conditions = [sequence[conditionNumbers.index(i)] for i in
    atrain_conditionNumbers]

for t,trial in enumerate(atrain_conditions):
    for i,thisAttrib in enumerate(attributes):
        x1, x2 = 0, 0
        while x1 >= x2:
            x1 = choice(attributes[thisAttrib]['values'])
            x2 = choice(attributes[thisAttrib]['values'])

        if trial[i] == '<':
            task['A']['attributes'][thisAttrib]['tr'+str(t)] = x1
            task['B']['attributes'][thisAttrib]['tr'+str(t)] = x2
        elif trial[i] == '=':
            if random()<0.5:
                task['A']['attributes'][thisAttrib]['tr'+str(t)] = x1
                task['B']['attributes'][thisAttrib]['tr'+str(t)] = x1
            else:
                task['A']['attributes'][thisAttrib]['tr'+str(t)] = x2
                task['B']['attributes'][thisAttrib]['tr'+str(t)] = x2
        elif trial[i] == '>':
            task['A']['attributes'][thisAttrib]['tr'+str(t)] = x2
            task['B']['attributes'][thisAttrib]['tr'+str(t)] = x1

### VISUAL STUFF
y_attributes = -400

```

```

center_distance = 300
task_radius = 200
csvTrial['taskRadius'] = task_radius
interval = task_radius*2/6

win = visual.Window(fullscr=False, size=[1680,1050], waitBlanking=True)

csvTrial['screenWidth'] = win.size[0]
csvTrial['screenHeight'] = win.size[1]

whiteBand = visual.Rect(win,units='pix',width=win.size[0],height=70, pos=(0,
    y_attributes), fillColorSpace = 'rgb', fillColor = [0.6,0.6,0.6])

msg = u"Appuyez sur la touche ESPACE pour édmettre l'essai"
pressKey = visual.TextStim(win, units="pix", text=msg, pos=(0, y_attributes
    +100), color='white', height=20, alignHoriz='center', wrapWidth=0.8*win.
    size[0])

# TaSK #
# 'training', 'learning', 'attributes',
phases = ['test']

if useSmi:
    smi.recordSMI()

for thisPhase in phases:

    csvTrial['Phase'] = thisPhase

    ### Instructions display
    langFolder = language.lower()+ '/'
    instructions = fun.readInstructions('dualMonitoring_'+csvTrial['Phase']+'.
    txt', folder='doc/'+langFolder)
    fun.drawInstructions(win, instructions)

    ## TaSK ITSELF ##

    blocNumber = 0
    goToNextBloc = True

    while goToNextBloc:

        csvTrial['block'] = blocNumber
        csvTrial['letterPerTask'] = letterPerTask
        csvTrial['targetPerTrial'] = targetPerTrial
        csvTrial['letter'] = letter

```

```

trialTimer = core.Clock()
event.clearEvents()

trialNumber = 0
goToNextTrial = True

while goToNextTrial: # 27 is 3x3x3 attributes conditions

    runTrial = False
    targetDetected = False
    csvTrial['trial'] = trialNumber
    csvTrial['dayTime'] = fun.getTimeStamp()
    csvTrial['trialDuration'] = int(targetPerTrial*2*(targetDuration+1)
) # rotation volume is half total trial duration

    #print 'Trial #'+str(trialNumber)+' : ',

    string = str(trialNumber)

    for t,thisTask in enumerate(task):
        task[thisTask]['targetDuration'] = targetDuration

        for thisCoord in ['x','y']:
            csvTrial['taskCenter_'+thisCoord+'_'+thisTask] = task[
thisTask][thisCoord+'_task']

            # Generate icons for attributes, assign attributes to tasks

            if thisPhase in ['attributes','test']:
                if thisPhase == 'attributes': string = 'tr'+str(trialNumber
)

                    task[thisTask]['targetDuration'] = task[thisTask]['
attributes']['time'][string]

                    for a,thisAttribute in enumerate(task[thisTask]['attributes
']):
                        icon_x = task[thisTask]['x_task'] - task_radius+
interval/2+interval*2*a
                        task[thisTask]['attributes'][thisAttribute]['icon'] =
visual.ImageStim(win,image=imagePath+'exp_'+thisAttribute+'.png', units='
pix', pos=(icon_x, y_attributes))

                        value_x = task[thisTask]['x_task'] - task_radius+
interval*3/2+interval*2*a - 20
                        task[thisTask]['attributes'][thisAttribute]['stimValue'
] = visual.TextStim(win, units='pix',pos=(value_x, y_attributes), text=str(
task[thisTask]['attributes'][thisAttribute][string]), height=40, color='

```

```

black')

        task[thisTask]['score'] = 0
        task[thisTask]['canevas'] = fun.getStimCanevas(win,
letterPerTask, [csvTrial['taskCenter_x_'+thisTask],csvTrial['taskCenter_y_'
+thisTask]], stimShape=letter, stimSize=20, font = 'Hack-Regular')
        #task[thisTask]['error'] = visual.TextStim(win, units="pix",
text="FAUX", pos=[task[thisTask]['x_task'],-250], height=25)
        task[thisTask]['feedbackOnset'] = []
        task[thisTask]['rtList'] = []
        task[thisTask]['responseList'] = []
        task[thisTask]['onsets'] = fun.spreadTargets([minimalISI,
csvTrial['trialDuration']-minimalISI], targetPerTrial, minimumSeparation=
targetDuration+minimalISI)
        task[thisTask]['onsets'].sort()
        task[thisTask]['targetRanks'] = [randint(0,letterPerTask-1) for
i in range(targetPerTrial)]
        task[thisTask]['targetDetected'] = False
        #task[thisTask]['nextRank'] = False
        #task[thisTask]['r'] = 0
        csvTrial['targetDuration_'+thisTask] = task[thisTask]['
targetDuration']

        ## TRIAL TIMING ##

        trialTimer.reset()

        event.clearEvents()
        while trialTimer.getTime() < csvTrial['trialDuration']:
            key = event.getKeys(timeStamped=trialTimer)

            # Signal training sessions to the participant

            if thisPhase in ['training','attributes']:
                msg = u"iEntraînement" if language.lower()=="french" else u"
Training"
                trainingLabel = visual.TextStim(win, units='pix', pos=(0,
task_radius+250), text=msg, height=40, color='white', opacity=0.8)
                trainingLabel.draw()

            # Draw a white band for attributes displaying

            if thisPhase in ['test', 'attributes']:
                whiteBand.draw()

            if not runTrial:
                pressKey.draw()

```

```

for thisTask in task:

    ### Rotation routines
    cond = [trialTimer.getTime() < onset for onset in task[
thisTask]['onsets']]
    if any(cond):
        rank = cond.index(True)-1
    else:
        rank = len(cond)-1

    if any(onset < trialTimer.getTime() < onset + task[thisTask
]['targetDuration'] \
        for onset in task[thisTask]['onsets']) and not task[
thisTask]['targetDetected']:

        fun.putTargetInCanevas(task[thisTask]['canevas'],
newOrientation=rotationSpeed, rank=task[thisTask]['targetRanks'][rank])

        if len(key) and key[0][0].lower() in task[thisTask]['
responseKey']:

            task[thisTask]['responseList'].append('H')
            task[thisTask]['rtList'].append(round(key[0][1],2))
            task[thisTask]['targetDetected'] = True
            event.clearEvents()

        elif any(onset < trialTimer.getTime() < onset + task[
thisTask]['targetDuration'] \
            for onset in task[thisTask]['onsets']) and task[thisTask]['
targetDetected']:

            #fun.cleanTarget(task[thisTask]['canevas']) #Do not
            reset letter orientation

            if len(key)>0 and key[0][0].lower() in task[thisTask]['
responseKey']:

                task[thisTask]['responseList'].append('FA')
                #task[thisTask]['feedbackOnset'] = round(key
[0][1],2)

                event.clearEvents()

            else:
                task[thisTask]['targetDetected'] = False
                #fun.cleanTarget(task[thisTask]['canevas']) #Do not
                reset letter orientation

            if len(key)>0 and key[0][0].lower() in task[thisTask]['
responseKey']:

                task[thisTask]['responseList'].append('FA')

```

```

                                #task[thisTask]['feedbackOnset'] = round(key
[0][1],2)
                                event.clearEvents()

                                fun.drawCanevas(task[thisTask]['canevas'])

                                ### Feedback, ONLY FOR TRAINING
                                #if task[thisTask]['feedbackOnset'] < trialTimer.getTime
() < task[thisTask]['feedbackOnset'] + feedbackDuration and runTrial and
thisPhase == 'training':
                                    #task[thisTask]['error'].draw()
                                #else:
                                    #task[thisTask]['feedbackOnset'] = []

                                # Attributes display

                                if thisPhase in ['test','attributes']:
                                    for a,thisAttribute in enumerate(task[thisTask]['
attributes']):
                                        task[thisTask]['attributes'][thisAttribute]['icon'
].draw()
                                        task[thisTask]['attributes'][thisAttribute]['
stimValue'].draw()

                                win.flip()
                                core.wait(desiredRefreshingRate/1000)

                                if not runTrial:
                                    event.waitKeys(keyList = ['space'])
                                    trialTimer.reset()
                                    runTrial = True
                                    csvTrial['onset'] = smi.getTimeStampSMI() if useSmi else '
nan'

                                # Exit trial and record data

                                runTrial = False
                                csvTrial['offset'] = smi.getTimeStampSMI() if useSmi else 'nan'

                                for t,thisTask in enumerate(task):
                                    temp = [] # Compute mean response time
                                    if len(task[thisTask]['rtList']):
                                        for thisRT in task[thisTask]['rtList']:
                                            correspondingOnset = [onset for onset in task[thisTask
][['onsets']] if onset < thisRT < onset + task[thisTask]['targetDuration']]
                                            temp.append(abs(correspondingOnset[0]-thisRT))

```

```

        csvTrial['hitTime'+ '_' + thisTask] = round(sum(temp)/len(temp),3)
    if len(temp) else 'nan'
    csvTrial['H_'+thisTask] = task[thisTask]['responseList'].count(
'H')
    csvTrial['FA_'+thisTask] = task[thisTask]['responseList'].count
('FA')
    csvTrial['M_'+thisTask] = targetPerTrial - csvTrial['H_'+
thisTask]
    csvTrial['rotation_speed'] = rotationSpeed

    if thisPhase in ['attributes','test']:
        for thisAttribute in task[thisTask]['attributes'].keys(): #
log attribute
            csvTrial[thisAttribute+'_'+thisTask] = task[thisTask]['
attributes'][thisAttribute][string]
            csvTrial['condition'] = conditionNumbers[trialNumber]
        else:
            for thisAttribute in task[thisTask]['attributes'].keys(): #
log attribute
                csvTrial[thisAttribute+'_'+thisTask] = 'nan'
                csvTrial['condition'] = 'nan'

        # Compute scores for the two subtasks

        if (csvTrial['FA_'+thisTask] + csvTrial['M_'+thisTask]) > task[
thisTask]['attributes']['error'][string]:
            task[thisTask]['score'] = 0
        else:
            task[thisTask]['score'] = csvTrial['H_'+thisTask]*task[
thisTask]['attributes']['points'][string]

        csvTrial['score_'+thisTask] = task[thisTask]['score']

    # Trial STOP rules (BAD INDENTATION ! NOT NECESSARY TO COMPUTE
IT TWICE)

    trialPerformance = (task['A']['responseList'].count('H') + task
['B']['responseList'].count('H')) / (targetPerTrial*2) # Hits/target

    if thisPhase == 'training':
        if (trialNumber > 1 and trialPerformance > 0.8) or (
trialNumber > 9) : # Two training trials, skip other trials if good perf
            goToNextBloc = goToNextTrial = False

    elif thisPhase == 'learning':
        if trialPerformance < 0.5 and trialNumber!=0:
            goToNextBloc = goToNextTrial = False

```

```

        else: rotationSpeed -= 0.5

        if rotationSpeed == 0:
            rotationSpeed = 0.5

        elif thisPhase == 'attributes' and trialNumber+1 == len(
atrain_conditions):
            goToNextBloc = goToNextTrial = False

        elif thisPhase == 'test' and trialNumber+1 == len(sequence):
#elif thisPhase == 'test' and trialNumber+1 > 0:
            goToNextTrial = False

# RECORD DATA
fileName = 'dualMonitoring_' + csvTrial['Subject'] + '.csv'
fun.writeToCSV(csvTrial,fileName=fileName, directory='.././data/
dualMonitoring/behavior/')

# DISPLAY SCORES

if thisPhase in ['attributes','test']:
    msg = u'Score_global: ' if language.lower()=='french' else u'
Global_score: '
    info = visual.TextStim(win, units='pix', pos=(0, task['A']['
y_task']+100), text=msg+str(task['A']['score']+task['B']['score'])+ '
points', height=40, color='white')
    info.draw()
    pressKey.draw()

    for thisTask in task:
        msg = u'âTche ' if language.lower() == 'french' else u"Task
"

        score = visual.TextStim(win, units='pix', pos=(task[
thisTask]['x_task'], task[thisTask]['y_task']), text=msg+thisTask+' : '+str
(task[thisTask]['score'])+' points', height=40, color='white')
        score.draw()

    win.flip()
    event.waitKeys(keyList = ['space'])
    win.flip()
    core.wait(0.3)

    trialNumber += 1

# BLOCK STOP rules

```



```
    if thisPhase == 'test' and blocNumber+1 == howManyBlocs:
        goToNextBloc = False
        blocNumber += 1

    msg = u"Fin de cette phase" if language.lower() == "french" else "End of
    this phase"
    info = visual.TextStim(win, units='pix', pos=(0, 0),
                           text=msg, height=60,
                           color='white')

    info.draw()
    win.flip()
    core.wait(2)

    msg = u"Fin de l'expérience" if language.lower() == "french" else "End of
    the experiment"
    info = visual.TextStim(win, units='pix', pos=(0, 0),
                           text=msg, height=60,
                           color='white')

    info.draw()
    win.flip()
    core.wait(2)

    if useSmi:
        smi.stopSMI()
        fileName = 'dualMonitoring_'+csvTrial['Subject']+'.idf'
        smi.recordDataSMI(fileName)
        move('C:/Program Files/SMI/iViewX/'+fileName, 'D:/brainPriority/data/
        dualMonitoring/idf/'+fileName)
        smi.closeSMI()
```

## 7. Codage de la double-tâche de surveillance/prédiction

Programme par Antoine Perrichi

*(En raison du volume de ce programme, seules deux parties sont présentées)*

### 7.1. Sous-tâche PFD

```
from PyQt5 import QtCore, QtWidgets, QtGui
import model
import math
import random
import datetime
import log

class RandomValueGenerator() :

    def __init__( self , valueMin , valueMax , initialValue ) :
        self.valueMin      = valueMin
        self.valueMax      = valueMax
        self.previousValue = initialValue
        self.nextValue     = initialValue

        self.previousRegenerationTime = 0
        self.nextRegenerationTime     = 1000
        self.cutoffValue              = 0

        # pour log et debug
        self.notifyCutoff              = False
        self.isCutoffUpper             = False

        self.eventTAG = ""

        self.lastValueComputed = initialValue

    def setRange( self , valueMin , valueMax ) :
        self.valueMin = valueMin
        self.valueMax = valueMax

    def defineCutoffValueAtTime( self , cutoffValue , currentTime , futurTime ,
        newValueMin , newValueMax ) :
        self.cutoffValue      = cutoffValue
        self.currentValue     = self.computeValue( currentTime )
```

```

self.valueMin          = newValueMin
self.valueMax          = newValueMax
self.previousValue     = currentValue
self.previousRegenerationTime = currentTime
self.nextRegenerationTime = ( currentTime + 2 * ( futurTime -
currentTime ) )
self.nextValue         = ( self.nextRegenerationTime -
currentTime ) * ( cutoffValue - currentValue ) / ( futurTime - currentTime
) + currentValue
self.nextValue         = max( min( newValueMax , self.nextValue
) , newValueMin )
self.notifyCutoff      = True
self.isCutoffUpper     = True if self.nextValue - currentValue >
0 else False

def computeValue( self , time ) :
    interpolationCoefficient = ( time - self.previousRegenerationTime ) / (
self.nextRegenerationTime - self.previousRegenerationTime )
    return self.easyInOutSin( interpolationCoefficient , self.previousValue
, self.nextValue )

def lerp( self , c , a , b ) :
    return (1.0-c)*a + c*b

def easyInOutSin( self , c , a , b ) :
    return 0.5 * ( a-b ) * ( math.cos( 3.14*c ) -1.0 ) + a

def __call__( self , time ) :

    if 0 < time - self.nextRegenerationTime and time - self.
nextRegenerationTime < 100 :
        self.previousRegenerationTime = self.nextRegenerationTime
        self.nextRegenerationTime     += 4000
        self.previousValue             = self.nextValue
        self.nextValue                 = ( random.random() - 0.5 ) * ( self.
valueMax - self.valueMin ) + ( self.valueMax + self.valueMin ) / 2.0

        value = self.computeValue( time )
        if self.notifyCutoff :
            if self.isCutoffUpper and value > self.cutoffValue :
                log.logger.log( "PFD_EVENT_" + self.eventTAG + "_" + str( self.
cutoffValue ) )
                print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f") , "_" +
cutoffValue_" : " , self.cutoffValue , value )
                self.notifyCutoff = False

            elif not self.isCutoffUpper and value < self.cutoffValue :

```

```

        log.logger.log( "PFD_EVENT_" + self.eventTAG + "_" + str( self.
cutoffValue ) )
        print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f") , "_" +
cutoffValue_" , self.cutoffValue , value )
        self.notifyCutoff = False

```

```

        self.lastValueComputed = value

```

```

        return value

```

```

class PfdModel( model.Model ) :

```

```

    endOfBlocSignal      = QtCore.pyqtSignal( )

```

```

    def __init__( self ) :
        model.Model.__init__( self )

```

```

        self.altitude      = 0
        self.vitesse       = 0
        self.isModeSafe    = True
        self.cap           = 0
        self.pitch         = 0
        self.roll          = 0
        self.timeInMs      = datetime.datetime.now().timestamp() * 1000 # en ms

```

```

        self.speedValueGenerator = RandomValueGenerator( valueMin = 180 ,
valueMax = 220 , initialValue = 200 )

```

```

        self.altitudeValueGenerator = RandomValueGenerator( valueMin = 19 ,
valueMax = 21 , initialValue = 20 )

```

```

        self._blocDurationInMilliSec = 50 * 5.5 * 1000 # 275 secondes
        self._eventDuration          = 6000 # en ms

```

```

        self._lastStartOfBlocDatetime = 0
        self._lastEventDatetime       = 0
        self.lastEventType             = None

```

```

        self.currentBlocEvenementSequence = [] # de la forme [ { "time" : 1000
, "type" : "speedUpperDanger" } , ... ]

```

```

        self.initNewSequenceOfEvents()

```

```

        # debug
        self.debugTest      = False

```

```

self.nextDebugTime = 0
self.timerDebug    = 0

self.debugSpeedFactor = 1.0

self.recordAnswers = False
self.keyPressed = [] # de type [ ("SPEED",True) , ... ]

def setRecordAnswers( self , on ) :
    if self.recordAnswers == False and on : self.keyPressed = []
    self.recordAnswers = on

def isInSpeedDangerZone( self ) :
    currentValue = self.speedValueGenerator.lastValueComputed
    res = False if 180 <= currentValue and currentValue <= 220 else True
    return res

def isInAltitudeDangerZone( self ) :
    currentValue = self.altitudeValueGenerator.lastValueComputed
    res = False if 18 <= currentValue and currentValue <= 22 else True
    return res

def isInModeDangerZone( self ) :
    return not self.isModeSafe

def recordKeyPressed( self , keyPressed ) :
    isEventDetected = False

    if keyPressed == "SPEED" : isEventDetected = self.
isInSpeedDangerZone()
    elif keyPressed == "MODE" : isEventDetected = self.
isInModeDangerZone()
    elif keyPressed == "ALTITUDE" : isEventDetected = self.
isInAltitudeDangerZone()

    msg = "PFD_USER_KEYBOARD_" + keyPressed + "_"
    msg += "TRUE" if isEventDetected else "FALSE"
    log.logger.log( msg )

# revenir a la normale pour mode
if keyPressed == "MODE" and isEventDetected :
    self.isModeSafe = True
    self.notifyViews()
elif keyPressed == "SPEED" and isEventDetected :
    print("go_back_speed" )
    self.goBackToSpeedSafeUser()

elif keyPressed == "ALTITUDE" and isEventDetected :

```

```

        print("go_back_altitude" )
        self.goBackToAltitudeSafeUser()

    if self.recordAnswers :
        self.keyPressed.append( ( keyPressed , isEventDetected ) )

def startSafeSpeedZoneAt( self , currentTime , futurTime , fromUpper ) :
    self.speedValueGenerator.eventTAG = "SPEED_SAFE"
    self.speedValueGenerator.defineCutoffValueAtTime(
        cutoffValue = 220 if fromUpper else 180 ,
        currentTime = currentTime ,
        futurTime = futurTime ,
        newValueMin = 180 , # [180 - 220 ]
        newValueMax = 220
    )

def startUpperSpeedDangerZoneAt( self , currentTime , futurTime ) :
    self.speedValueGenerator.eventTAG = "SPEED_DANGER_UPPER"
    self.speedValueGenerator.defineCutoffValueAtTime(
        cutoffValue = 220 ,
        currentTime = currentTime ,
        futurTime = futurTime ,
        newValueMin = 220 ,
        newValueMax = 260
    )

def startLowerSpeedDangerZoneAt( self , currentTime , futurTime ) :
    self.speedValueGenerator.eventTAG = "SPEED_DANGER_LOWER"
    self.speedValueGenerator.defineCutoffValueAtTime(
        cutoffValue = 180 ,
        currentTime = currentTime ,
        futurTime = futurTime ,
        newValueMin = 140 ,
        newValueMax = 180
    )

def startSafeAltZoneAt( self , currentTime , futurTime , fromUpper ) :
    self.altitudeValueGenerator.eventTAG = "ALT_SAFE"
    self.altitudeValueGenerator.defineCutoffValueAtTime(
        cutoffValue = 22 if fromUpper else 18 ,
        currentTime = currentTime ,
        futurTime = futurTime ,
        newValueMin = 18 , # [180 - 220 ]
        newValueMax = 22
    )

def startUpperAltDangerZoneAt( self , currentTime , futurTime ) :

```

```

self.altitudeValueGenerator.eventTAG = "ALT_DANGER_UPPER"
self.altitudeValueGenerator.defineCutoffValueAtTime(
    cutoffValue = 22          ,
    currentTime = currentTime ,
    futurTime   = futurTime   ,
    newValueMin = 22          ,
    newValueMax = 24
)

def startLowerAltDangerZoneAt( self , currentTime , futurTime ) :
self.altitudeValueGenerator.eventTAG = "ALT_DANGER_LOWER"
self.altitudeValueGenerator.defineCutoffValueAtTime(
    cutoffValue = 18          ,
    currentTime = currentTime ,
    futurTime   = futurTime   ,
    newValueMin = 16          ,
    newValueMax = 18
)

def startModeDanger( self ) :
log.logger.log("PFD_EVENT┘MODE_DANGER")
self.isModeSafe = False

def startModeSafe( self ) :
log.logger.log("PFD_EVENT┘MODE_SAFE")
self.isModeSafe = True

def initNewSequenceOfEvents( self ) :

# tirer au hasard la sequence des evenements cibles de ce prochain bloc
self.currentBlocEvenementSequence = [
    { "time" : 0 , "type" : "upperSpeedDanger" } ,
    { "time" : 0 , "type" : "upperSpeedDanger" } ,
    { "time" : 0 , "type" : "lowerSpeedDanger" } ,
    { "time" : 0 , "type" : "lowerSpeedDanger" } ,
    { "time" : 0 , "type" : "upperAltDanger" } ,
    { "time" : 0 , "type" : "upperAltDanger" } ,
    { "time" : 0 , "type" : "lowerAltDanger" } ,
    { "time" : 0 , "type" : "lowerAltDanger" } ,
    { "time" : 0 , "type" : "modeDanger" } ,
    { "time" : 0 , "type" : "modeDanger" } ,
    { "time" : 0 , "type" : "modeDanger" } ,
    { "time" : 0 , "type" : "modeDanger" }
]

random.shuffle( self.currentBlocEvenementSequence )

```

```

#     def testSequence( seq ) :
#         for i in range(0,len( seq )-1) :
#             currentType = None
#             if "Alt" in seq[i]["type"] : currentType = "alt"
#             elif "Speed" in seq[i]["type"] : currentType = "speed"
#             elif "Mode" in seq[i]["type"] : currentType = "mode"
#
#             nextType = None
#             if "Alt" in seq[i+1]["type"] : nextType = "alt"
#             elif "Speed" in seq[i+1]["type"] : nextType = "speed"
#             elif "Mode" in seq[i+1]["type"] : nextType = "mode"
#
#             if currentType == nextType :
#                 return False
#
#         return True
#
#     while not testSequence( self.currentBlocEvenementSequence ) :
#         random.shuffle( self.currentBlocEvenementSequence )
#
#     print( [ elem["type"] for elem in self.currentBlocEvenementSequence ] )
#
#     medianTimeIntervalBetweenTwoEvents = ( self._blocDurationInMilliSec
#     - 2*(8000+self._eventDuration) ) / ( 12.0 - 1 ) # 22.8 sec environ
#     randomInterval = (
#     medianTimeIntervalBetweenTwoEvents - (8000+self._eventDuration) ) / 2.0
#     # 5.4 sec environ
#
#     # generer les dates de survient des evenements
#     time = 8000
#     for i,event in enumerate(self.currentBlocEvenementSequence) :
#         randomSlide = 0
#         if i ==0 : randomSlide
# = random.uniform( 0 , randomInterval )
#         elif i == len( self.currentBlocEvenementSequence ) -1 : randomSlide
# = random.uniform( -randomInterval , 0 )
#         else : randomSlide
# = random.uniform( -randomInterval , randomInterval )
#
#         event["time"] = time + randomSlide
#
#         time += medianTimeIntervalBetweenTwoEvents
#
#     # pour le debug
#     def checkTimeInterval( seq ) :
#         lastTime = seq[0]["time"]

```



```

        if lastTime < 8000 : return False

        interval = 0
        for e in seq[1:-1] :
            if e["time"] - lastTime < 8000 + self._eventDuration : return
False
            lastTime = e["time"]

        if seq[len(seq)-1]["time"] > self._blocDurationInMilliSec - 8000 :
return False

        return True

    if not checkTimeInterval( self.currentBlocEvenementSequence ) :
        print("ERREUR_generation_de_sequences_du_pfd:_intervals_incorrects
_")
        print( [ str(e["time"]) + ":_:" + e["type"] for e in self.
currentBlocEvenementSequence ] )

        print( [ str(e["time"]) + ":_:" + e["type"] for e in self.
currentBlocEvenementSequence ] )

def reinit( self ) :
    self._lastStartOfBlocDatetime = 0
    self._lastEventDatetime       = 0
    self.lastEventType             = None

def goBackToSpeedSafeUser( self ) :
    self.timeInMs = datetime.datetime.now().timestamp() * 1000 * self.
debugSpeedFactor
    timeElapsedSinceLastStartOfBloc = self.timeInMs - self.
_lastStartOfBlocDatetime

    if self.lastEventType == "lowerSpeedDanger" :
        print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f") , ":_back_to_
safe_from_lower_speed" )
        self.startSafeSpeedZoneAt( timeElapsedSinceLastStartOfBloc ,
timeElapsedSinceLastStartOfBloc + 2000 , fromUpper = False )
        self.lastEventType = "safeSpeedZone"

    elif self.lastEventType == "upperSpeedDanger" :
        print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f") , ":_back_to_
safe_from_upper_speed" )
        self.startSafeSpeedZoneAt( timeElapsedSinceLastStartOfBloc ,
timeElapsedSinceLastStartOfBloc + 2000 , fromUpper = True )
        self.lastEventType = "safeSpeedZone"

```

```

def goBackToAltitudeSafeUser( self ) :
    self.timeInMs = datetime.datetime.now().timestamp() * 1000 * self.
debugSpeedFactor
    timeElapsedSinceLastStartOfBloc = self.timeInMs - self.
_lastStartOfBlocDatetime

    if self.lastEventType == "lowerAltDanger" :
        print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f") , " : back to
safe from lower altitude" )
        self.startSafeAltZoneAt( timeElapsedSinceLastStartOfBloc ,
timeElapsedSinceLastStartOfBloc + 2000 , fromUpper = False )
        self.lastEventType = "safeAltZone"

    elif self.lastEventType == "upperAltDanger" :
        print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f") , " : back to
safe from upper altitude" )
        self.startSafeAltZoneAt( timeElapsedSinceLastStartOfBloc ,
timeElapsedSinceLastStartOfBloc + 2000 , fromUpper = True )
        self.lastEventType = "safeAltZone"

def goToNextFrame( self ) :

    # calcul de la date courante en ms
    self.timeInMs = datetime.datetime.now().timestamp() * 1000 * self.
debugSpeedFactor

#    print( int( self.timeInMs ) )

    # test de debut de bloc et initialisation de la sequence des evenements
si besoin
    if self._lastStartOfBlocDatetime == 0 :
        self.initNewSequenceOfEvents()
        self._lastStartOfBlocDatetime = self.timeInMs

    # temps ecoule depuis le debut du bloc en ms
    timeElapsedSinceLastStartOfBloc = self.timeInMs - self.
_lastStartOfBlocDatetime

    # test de fin de bloc
    if timeElapsedSinceLastStartOfBloc >= self._blocDurationInMilliSec :
        self.initNewSequenceOfEvents()
        self._lastStartOfBlocDatetime = self.timeInMs
        self.endOfBlocSignal.emit()
        return

    # debug
#    if int(timeElapsedSinceLastStartOfBloc/1000 ) != self.timerDebug :

```

```

#         print( self.timerDebug )
#         self.timerDebug = int(timeElapsedSinceLastStartOfBloc/1000 )

# verifier s'il faut declencher un evenement
if self.lastEventType in [ "safeSpeedZone" , "safeAltZone" , "modeSafe"
, None ] :

    # chercher a declencher un evenement
    for eventToLaunch in self.currentBlocEvenementSequence :

        if eventToLaunch["type"] in [ "upperSpeedDanger" , "
lowerSpeedDanger" , "upperAltDanger" , "lowerAltDanger" ] :

            if abs( eventToLaunch["time"] -
timeElapsedSinceLastStartOfBloc - 3000 ) < 100 : # declencher l'evenement 2
sec avant

                if eventToLaunch["type"] == "upperSpeedDanger" and
self.lastEventType != "upperSpeedDanger" :
                    print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f")
, " : start upperSpeedDanger" )
                    self.startUpperSpeedDangerZoneAt(
timeElapsedSinceLastStartOfBloc , timeElapsedSinceLastStartOfBloc + 3000 )
                    self.lastEventType = "upperSpeedDanger"
                    self._lastEventDatetime = self.timeInMs
                    break

                elif eventToLaunch["type"] == "lowerSpeedDanger" and
self.lastEventType != "lowerSpeedDanger" :
                    print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f")
, " : start lowerSpeedDanger" )
                    self.startLowerSpeedDangerZoneAt(
timeElapsedSinceLastStartOfBloc , timeElapsedSinceLastStartOfBloc + 3000 )
                    self.lastEventType = "lowerSpeedDanger"
                    self._lastEventDatetime = self.timeInMs
                    break

                elif eventToLaunch["type"] == "upperAltDanger" and self
.lastEventType != "upperAltDanger" :
                    print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f")
, " : start upperAltDanger" )
                    self.startUpperAltDangerZoneAt(
timeElapsedSinceLastStartOfBloc , timeElapsedSinceLastStartOfBloc + 3000 )
                    self.lastEventType = "upperAltDanger"
                    self._lastEventDatetime = self.timeInMs
                    break

```

```

        elif eventToLaunch["type"] == "lowerAltDanger" and
self.lastEventType != "lowerAltDanger" :
            print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f")
, "┆┆start┆lowerAltDanger" )
            self.startLowerAltDangerZoneAt(
timeElapsedSinceLastStartOfBloc , timeElapsedSinceLastStartOfBloc + 3000 )
            self.lastEventType = "lowerAltDanger"
            self._lastEventDatetime = self.timeInMs
            break

        elif eventToLaunch["type"] == "modeDanger" :

            if abs( eventToLaunch["time"] -
timeElapsedSinceLastStartOfBloc ) < 100 : # declencher l'evenement tout de
suite

                if eventToLaunch["type"] == "modeDanger" : # and self.
lastEventType != "modeDanger" :
                    print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f")
, "┆┆start┆modeDanger" )
                    self.startModeDanger( )
                    self.lastEventType = "modeDanger"
                    self._lastEventDatetime = self.timeInMs
                    break

            else :

                # chercher a revenir a la normale
                if self.timeInMs - self._lastEventDatetime > self._eventDuration :

                    if self.lastEventType == "lowerSpeedDanger" :
                        print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f") , "┆┆
back┆to┆safe┆from┆lower" )
                        self.startSafeSpeedZoneAt( timeElapsedSinceLastStartOfBloc
, timeElapsedSinceLastStartOfBloc + 3000 , fromUpper = False )
                        self.lastEventType = "safeSpeedZone"

                    elif self.lastEventType == "upperSpeedDanger" :
                        print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f") , "┆┆
back┆to┆safe┆from┆upper" )
                        self.startSafeSpeedZoneAt( timeElapsedSinceLastStartOfBloc
, timeElapsedSinceLastStartOfBloc + 3000 , fromUpper = True )
                        self.lastEventType = "safeSpeedZone"

                    elif self.lastEventType == "upperAltDanger" :

```

```

        print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f") , "\n:\n"
back_to_safe_from_upper" )
        self.startSafeAltZoneAt( timeElapsedSinceLastStartOfBloc ,
timeElapsedSinceLastStartOfBloc + 3000 , fromUpper = True )
        self.lastEventType = "safeAltZone"

        elif self.lastEventType == "lowerAltDanger" :
            print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f") , "\n:\n"
back_to_safe_from_lower" )
            self.startSafeAltZoneAt( timeElapsedSinceLastStartOfBloc ,
timeElapsedSinceLastStartOfBloc + 3000 , fromUpper = False )
            self.lastEventType = "safeAltZone"

        elif self.lastEventType == "modeDanger" :
            print( datetime.datetime.now().strftime("%M:%S:%f") , "\n:\n"
back_to_safe_mode" )
            self.startModeSafe()
            self.lastEventType = "modeSafe"

        self.vitesse = self.speedValueGenerator (
timeElapsedSinceLastStartOfBloc )
        self.altitude = self.altitudeValueGenerator(
timeElapsedSinceLastStartOfBloc )

        self.cap      = 1.0 * math.sin( 0.0005*self.timeInMs ) + 0.5* math.sin
( 0.001*self.timeInMs + 0.1 )
        self.pitch    = 50.0 * math.cos( 0.0005*self.timeInMs + 0.3 )
        self.roll     = 20.0 * math.cos( 0.001 *self.timeInMs + 0.1 )

        self.notifyViews()

class PfdItem( QtWidgets.QGraphicsItem ):

    def __init__( self , pfdModel , parent = None ):

        QtWidgets.QGraphicsItem.__init__( self , parent )

        self.pfdModel = pfdModel
        self.pfdModel.notifyViewsSignal.connect( self.updateView )

        # testImage = QtGui.QImage( "pfdReference.jpg" )
        # imageItem = QtWidgets.QGraphicsPixmapItem( QtGui.QPixmap.fromImage(
testImage ) )

```

```

# background
self.backgroundWidth = 500
self.backgroundHeight = 500
self.background = QtWidgets.QGraphicsRectItem( 0 , 0 , self.
backgroundWidth , self.backgroundHeight )
self.background.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 0 , 0 , 0 ) ) )

# sky
self.skyWidth = 300
self.skyCircle = QtWidgets.QGraphicsEllipseItem( self.backgroundWidth/2
- self.skyWidth/2 , self.backgroundWidth/2 - self.skyWidth/2 , self.
skyWidth , self.skyWidth )
self.skyCircle.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 64 , 174 , 233 ) ) )
self.skyCircle.setPen( QtGui.QPen( QtGui.QColor( 164 , 0 , 0 , 0 ) ) )

# ground
self.groundWidth = self.skyWidth * 1.5
self.ground = QtWidgets.QGraphicsRectItem( -self.groundWidth/2 , 0 ,
self.groundWidth , self.groundWidth )
self.ground.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 107 , 52 , 22 ) ) )
self.ground.setPen( QtGui.QPen( QtGui.QColor( 107 , 52 , 22 , 0 ) ) )

self.line = QtWidgets.QGraphicsLineItem( 0 , self.backgroundWidth/2 ,
self.backgroundWidth , self.backgroundWidth/2 )
linePen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 255 , 255 , 255 , 255 ) )
linePen.setWidthF( 1.5 )
self.line.setPen( linePen )

# FMA
verticalLineHeight = 50
self.verticalLine = QtWidgets.QGraphicsLineItem( 0 , 0 , 0 ,
verticalLineHeight )
linePen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 255 , 255 , 255 , 255 ) )
linePen.setWidthF( 1.5 )
self.verticalLine.setPen( linePen )

# mask central
self.centralMaskWidth = self.skyWidth
self.centralMaskHeight = 240
self.centralMask = QtWidgets.QGraphicsRectItem( -self.centralMaskWidth
/2 , -self.centralMaskHeight/2 , self.centralMaskWidth , self.
centralMaskHeight )
self.centralMask.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 255 , 255 , 22 )
) )
self.centralMask.setPen( QtGui.QPen( QtGui.QColor( 107 , 52 , 22 , 0 )
) )

# background vitesse et altitude

```

```

self.backSpeedAltWidth = 50
self.backSpeedAlt = QtWidgets.QGraphicsRectItem( 0 , 0 , self.
backSpeedAltWidth , self.skyWidth )
self.backSpeedAlt.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 67 , 69 , 66 )
) )

# background cap
self.backCapHeight = 40
self.backCap = QtWidgets.QGraphicsRectItem( 0 , 0 , self.skyWidth ,
self.backCapHeight )
self.backCap.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 67 , 69 , 66 ) ) )

# reglettes
class GenericRuler :

    def __init__( self , orientation , intervalInPixel , minValue ,
maxValue , tickIntervalValue , labelIntervalValue , textMultCoeff ) :

        self.orientation          = orientation
        self.intervalInPixel      = intervalInPixel
        self.minValue             = minValue
        self.maxValue             = maxValue
        self.tickIntervalValue    = tickIntervalValue
        self.labelIntervalValue   = labelIntervalValue
        self.textMultCoeff        = textMultCoeff

        if( ( maxValue - minValue ) % tickIntervalValue != 0 ) :
            print("Erreur : tickIntervalValue n'est pas un multiple de
la longueur de la zone" )

        self.windowSizeInPixel   = 0

        self.value = 100

    def setWindowSizeInPixel( self , windowSizeInPixel ) :
        self.windowSizeInPixel = windowSizeInPixel

    def totalNumberOfTick( self ) :
        return int( ( self.maxValue - self.minValue ) / self.
tickIntervalValue ) + 1

    def totalWidthInPixel( self ) :
        if self.orientation == "horizontal" : return self.
intervalInPixel * ( self.totalNumberOfTick() - 1 )
        elif self.orientation == "vertical" : return 0

    def totalHeightInPixel( self ) :

```

```

        if self.orientation == "horizontal" : return 0
        elif self.orientation == "vertical" : return self.
intervalInPixel * ( self.totalNumberOfTick() - 1 )

    def setValue( self , value ) :
        self.value = value

    def convertDistanceInPixel( self , distance ) :
        if self.orientation == "horizontal" : return float( self.
totalWidthInPixel ( ) ) * distance / float( self.maxValue-self.minValue )
        elif self.orientation == "vertical" : return float( self.
totalHeightInPixel( ) ) * distance / float( self.maxValue-self.minValue )

    def convertPixelInDistance( self , pixelDistance ) :
        if self.orientation == "horizontal" : return float( self.
maxValue - self.minValue ) * pixelDistance / float( self.totalWidthInPixel
( ) )
        elif self.orientation == "vertical" : return float( self.
maxValue - self.minValue ) * pixelDistance / float( self.totalHeightInPixel
( ) )

    def paint( self , painter , option , widget , visibleMin = 0 ,
visibleMax = 0 ) :

        # setter la font pour le texte
        font      = QtGui.QFont( "Arial" , 15 )
        fontMetric = QtGui.QFontMetrics( font )
        painter.setFont( font )

        # calculer la translation induite par la valeur courante
        translationInPixel = self.convertDistanceInPixel( self.value -
self.minValue )

        # ligne de bordure
        pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 240 , 240 , 240 , 255 ) )
        pen.setWidth(2)
        painter.setPen( pen )
        if self.orientation == "vertical" : painter.drawLine( 0 ,
translationInPixel , 0 , translationInPixel - self.totalHeightInPixel(
) )
        elif self.orientation == "horizontal" : painter.drawLine(
translationInPixel -self.windowSizeInPixel/2 , 0 , translationInPixel +
self.windowSizeInPixel/2 , 0 )

        lowerValue = self.convertPixelInDistance( -self.
windowSizeInPixel/2 ) + self.value
        upperValue = self.convertPixelInDistance( self.
windowSizeInPixel/2 ) + self.value

```



```

        for i in range( 0 , self.totalNumberOfTick() ) :
            tickValue = self.minValue + i*self.tickIntervalValue
            if lowerValue - self.tickIntervalValue <= tickValue and
tickValue <= upperValue + self.tickIntervalValue :

                # tick
                subLineWidth = 5
                painter.drawLine( 0 , translationInPixel -i*self.
intervalInPixel , -subLineWidth , translationInPixel -i*self.
intervalInPixel )

                    if i*self.tickIntervalValue % self.labelIntervalValue
== 0 :
                        valueText      = "0"*( 3 - len( str( self.
textMultCoeff * i ) ) ) + str( self.textMultCoeff * i )
                        valueTextWidth = fontMetric.width( valueText )
                        valueTextHeight = fontMetric.height( )
                        painter.drawText( -valueTextWidth - subLineWidth -
5, translationInPixel - i*self.intervalInPixel + valueTextHeight/4 ,
valueText )

        self.speedRule      = GenericRuler( orientation = "vertical" ,
intervalInPixel = 20 , minValue = 0 , maxValue = 400 , tickIntervalValue =
10 , labelIntervalValue = 20 , textMultCoeff = 10 )
        self.altitudeRule = GenericRuler( orientation = "vertical" ,
intervalInPixel = 30 , minValue = 0 , maxValue = 300 , tickIntervalValue =
1 , labelIntervalValue = 5 , textMultCoeff = 1 )

# reglettes
class Ruler :

    def __init__( self , intervalHeightPixel , minValue , maxValue ,
tickIntervalValue , labelIntervalValue , textMultCoeff ) :

        self.intervalHeightPixel = intervalHeightPixel
        self.minValue             = minValue
        self.maxValue             = maxValue
        self.tickIntervalValue    = tickIntervalValue
        self.labelIntervalValue   = labelIntervalValue
        self.textMultCoeff        = textMultCoeff

        self.translatePixel = 0
        self.windowHeight   = 0

```

```

        self.mainLine = QtWidgets.QGraphicsLineItem( 0 , 0 , 0 , -self.
totalHeightInPixel() )

        self.value = 0

        def totalNumberOfTick( self ) :
            return int( ( self.maxValue - self.minValue ) / self.
tickIntervalValue )

        def totalHeightInPixel( self ) :
            return self.intervalHeightPixel * self.totalNumberOfTick()

        def getTranslateInPixel( self , value ) :
            return float( self.totalHeightInPixel() ) * float(value) /
float(self.maxValue - self.minValue )

        def paint( self , painter , option , widget , visibleMin = 0 ,
visibleMax = 0 ) :

            font = QtGui.QFont( "Arial" , 15 )
            fontMetric = QtGui.QFontMetrics( font )
            painter.setFont( font )

            # ligne de bordure
            pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 240 , 240 , 240, 255 ) )
            pen.setWidth(2)
            self.mainLine.setPen( pen )
            self.mainLine.paint( painter , option , widget )

            tickIntervalHeightPixel = int( self.totalHeightInPixel() / self
.totalNumberOfTick() )

            # determiner les ticks a afficher ( optimisation obligatoire )
# s = -1 if self.translatePixel > 0 else 1

            cuttingHighBorderPixel = max( self.windowHeight/2 + self.
translatePixel , 0 ) + 1
            maxTickNumber = int( float(cuttingHighBorderPixel) /
float(self.intervalHeightPixel) )

            cuttingLowBorderPixel = max( self.windowHeight/2 - self.
translatePixel , 0 )
# minTickNumber = max( int( float(cuttingLowBorderPixel)
/ float(self.intervalHeightPixel) ) )
            minTickNumber = 0

```

```

#         print( minTickNumber )
#         print( cuttingHighBorderPixel , cuttingLowBorderPixel )

#         print( self.windowHeight/2 , cuttingLowBorderPixel / float(self
.intervalHeightPixel) )
#         print( self.windowHeight/2 - self.translatePixel , self.
windowHeight/2 , self.translatePixel , minTickNumber , maxTickNumber )

##         print( self.translatePixel , self.windowHeight/2 , self.
windowHeight/2 - self.translatePixel )
#         cuttingLowBorderPixel = max( self.windowHeight/2 - self.
translatePixel , 0 )
##         cuttingLowBorderPixel = max( self.windowHeight/2 , 0 )
#         minTickNumber      = int( float(cuttingLowBorderPixel) /
float(self.intervalHeightPixel) )
#
#         cuttingHighBorderPixel = max( self.translatePixel + self.
windowHeight/2 , 0 )
#         print( self.translatePixel , self.windowHeight/2 , self.
translatePixel + self.windowHeight/2 )
##         cuttingHighBorderPixel = max( self.windowHeight/2 , 0 )
##         maxTickNumber      = int( float(cuttingHighBorderPixel) /
float(self.intervalHeightPixel) + 1 )
#         maxTickNumber      = int( float(cuttingHighBorderPixel) /
float(self.intervalHeightPixel) + 1 )

        for i in range( 0 , self.totalNumberOfTick() ) :
#             if i in range( minTickNumber , maxTickNumber ) :
#                 if True:
#                     # tick
#                     subLineWidth = 5
#                     painter.drawLine( 0 , -i*tickIntervalHeightPixel , -
subLineWidth , -i*tickIntervalHeightPixel )

#                     if i*self.tickIntervalValue % self.labelIntervalValue
== 0 :
#                         valueText      = "0"*( 3 - len( str( self.
textMultCoeff * i ) ) ) + str( self.textMultCoeff * i )
#                         valueTextWidth = fontMetric.width( valueText )
#                         valueTextHeight = fontMetric.height( )
#                         painter.drawText( -valueTextWidth - subLineWidth -
5, -i*tickIntervalHeightPixel + valueTextHeight/4 , valueText )

#         self.speedRule      = Ruler( intervalHeightPixel = 20 , minValue = 0 ,
maxValue = 250 , tickIntervalValue = 10 , labelIntervalValue = 20 ,
textMultCoeff = 10 )
#         self.altitudeRule = Ruler( intervalHeightPixel = 30 , minValue = 0 ,
maxValue = 2000 , tickIntervalValue = 1 , labelIntervalValue = 5 ,
textMultCoeff = 1 )

```

```

# reglettes
class HorizontalRuler( Ruler ) :

    def __init__( self , intervalWidthPixel , minValue , maxValue ,
tickIntervalValue , labelIntervalValue , textMultCoeff ) :
        Ruler.__init__( self , 0 , minValue , maxValue ,
tickIntervalValue , labelIntervalValue , textMultCoeff )
        self.intervalWidthPixel = intervalWidthPixel
        self.mainLine = QtWidgets.QGraphicsLineItem( -self.
totalWidthInPixel()/2 , 0 , self.totalWidthInPixel() , 0 )

    def totalWidthInPixel( self ) :
        return self.intervalWidthPixel * self.totalNumberOfTick()

    def totalNumberOfTick( self ) :
        return int( ( self.maxValue - self.minValue ) / self.
tickIntervalValue )

    def getTranslateInPixel( self , value ) :
        return float( self.totalWidthInPixel() ) * float(value) /
float(self.maxValue - self.minValue )

    def paint( self , painter , option , widget , visibleMin = 0 ,
visibleMax = 0 ) :

        font = QtGui.QFont( "Arial" , 15 )
        fontMetric = QtGui.QFontMetrics( font )
        painter.setFont( font )

        # ligne de bordure
        pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 240 , 240 , 240 , 255 ) )
        pen.setWidth(2)
        self.mainLine.setPen( pen )
        self.mainLine.paint( painter , option , widget )

        tickIntervalWidthPixel = int( self.totalWidthInPixel() / self.
totalNumberOfTick() )

#         print( self.maxValue - self.minValue , self.totalNumberOfTick
() )

```

```

#         incNumberList = int( ( self.maxValue - self.minValue ) / ( self
.labelIntervalValue ) )
        numberList = list( range( self.minValue , self.maxValue + self.
labelIntervalValue , int(self.labelIntervalValue) ) )

#         print( len(numberList) , self.totalNumberOfTick() )
#         print( numberList )

        for i in range( 0 , self.totalNumberOfTick() ) :
            if True:
                # tick
                subLineHeight = 5
                painter.drawLine( -self.totalWidthInPixel()/2 + i*
tickIntervalWidthPixel , 0 , -self.totalWidthInPixel()/2 + i*
tickIntervalWidthPixel , subLineHeight )

                if i*self.tickIntervalValue % self.labelIntervalValue
== 0 :
                    idx = int(i/(self.labelIntervalValue/self.
tickIntervalValue) )
                    valueText      = str( numberList[idx] )
                    valueTextWidth = fontMetric.width( valueText )
                    valueTextHeight = fontMetric.height()
                    painter.drawText( -self.totalWidthInPixel()/2 + i*
tickIntervalWidthPixel - valueTextWidth/2 , valueTextHeight +
subLineHeight - 5, valueText )

        self.capRule = HorizontalRuler( intervalWidthPixel = 40 , minValue = 0
, maxValue = 360 , tickIntervalValue = 0.5 , labelIntervalValue = 1 ,
textMultCoeff = 1 )

        class PitchRuler( Ruler ) :

            def __init__( self , intervalHeightPixel , minValue , maxValue ,
tickIntervalValue , labelIntervalValue , textMultCoeff ) :
                Ruler.__init__( self , intervalHeightPixel , minValue ,
maxValue , tickIntervalValue , labelIntervalValue , textMultCoeff )

            def paint( self , painter , option , widget , visibleMin = 0 ,
visibleMax = 0 ) :

                font = QtGui.QFont( "Arial" , 15 )
                font.setBold( True )
                fontMetric = QtGui.QFontMetrics( font )
                painter.setFont( font )

```

```

        # ligne de centrale
        painter.setPen( QtGui.QPen( QtGui.QColor( 255 , 255 , 255 ) , 5
    ) )
#
        self.mainLine.paint( painter , option , widget )
#
        numberOfTick          = int( ( self.maxValue - self.minValue
) / self.tickIntervalValue ) + 1
        tickIntervalHeightPixel = int( self.totalHeightInPixel() / self
.totalNumberOfTick() )

        # determiner les ticks a afficher ( optimisation obligatoire )
        cuttingLowBorderPixel = max( self.translatePixel - self.
windowHeight/2 , 0 )
        minTickNumber          = int( cuttingLowBorderPixel / self.
intervalHeightPixel )

        cuttingHighBorderPixel = max( self.translatePixel + self.
windowHeight/2 , 0 )
        maxTickNumber = int( cuttingHighBorderPixel / self.
intervalHeightPixel + 1 )

        painter.setPen( QtGui.QPen( QtGui.QColor( 255 , 255 , 255 ) , 2
    ) )
#
        for i in range( 0 , self.totalNumberOfTick() ) :
            if i in range( minTickNumber , maxTickNumber ) :
                # tick
                if i%4 == 0 : subLineWidth = 30
                elif i%4 == 1 : subLineWidth = 5
                elif i%4 == 2 : subLineWidth = 15
                elif i%4 == 3 : subLineWidth = 5

                painter.drawLine( -subLineWidth , -i*
tickIntervalHeightPixel , subLineWidth , -i*tickIntervalHeightPixel )

                if i*self.tickIntervalValue % self.labelIntervalValue == 0
:
                    speedText          = str( abs( int( i*self.
tickIntervalValue - self.totalNumberOfTick()*self.tickIntervalValue/2 ) ) )
                    if speedText == "0" : continue
                    textWidth          = fontMetric.width( speedText )
                    speedTextHeight    = fontMetric.height()
                    painter.drawText( -textWidth - subLineWidth - 5 , -i*
tickIntervalHeightPixel + textWidth/4 , speedText )

        self.pitchRuler = PitchRuler( intervalHeightPixel = 15 , minValue = 0 ,
maxValue = 100 , tickIntervalValue = 2.5 , labelIntervalValue = 10 ,
textMultCoeff = 1 )

```

```

markWidth = 7
rectWidth = 50
rectHeight = 20
self.leftWingPolygon = QtGui.QPolygonF( [
    QtCore.QPoint(0,0) , QtCore.QPoint(rectWidth,0) ,
    QtCore.QPoint(rectWidth,rectHeight) , QtCore.QPoint(rectWidth-
markWidth,rectHeight) ,
    QtCore.QPoint(rectWidth-markWidth,markWidth) ,
    QtCore.QPoint(0,markWidth)
] )

self.rightWingPolygon = QtGui.QPolygonF( [
    QtCore.QPoint(0,0) , QtCore.QPoint(rectWidth,0) ,
    QtCore.QPoint(rectWidth,markWidth) , QtCore.QPoint(markWidth,
markWidth) ,
    QtCore.QPoint(markWidth,rectHeight) ,
    QtCore.QPoint(0,rectHeight)
] )

def paint( self , painter , option , widget ) :

    painter.setRenderHint( QtGui.QPainter.HighQualityAntialiasing )

    self.backgroundWidth = widget.width ()
    self.backgroundHeight = widget.height()

    # helpers
    bw2 = self.backgroundWidth /2
    bh2 = self.backgroundHeight/2

    # background noir
    painter.setTransform( self.transform() )
    self.background.setRect( 0 , 0 , self.backgroundWidth , self.
backgroundHeight )
    self.background.paint( painter , option , widget )

    # background vitesse
    bgSpeedTransform = self.transform().translate( bw2 - self.skyWidth/2 -
self.backSpeedAltWidth , bh2 - self.skyWidth/2 )
    painter.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 67 , 69 , 66, 255 ) ) )
    painter.setTransform( bgSpeedTransform )
    self.backSpeedAlt.paint( painter , option , widget )

    # clip vitesse
    speedRectMaskPath = QtGui.QPainterPath()

```

```

speedRectMaskPath.addPath( self.backSpeedAlt.opaqueArea() )
speedRectMaskPath.intersected( speedRectMaskPath )
painter.setClipPath( speedRectMaskPath )

# regle vitesse
# painter.setClipping( False )
# speedRuleTransform = self.transform().translate( bw2 - self.skyWidth/2
- 2 , bh2 ) # + self.speedRule.getTranslateInPixel( self.pfdModel.vitesse
) )
speedRuleTransform = self.transform().translate( bw2 - self.skyWidth/2
- 2 , bh2 ) # + self.speedRule.getTranslateInPixel( self.pfdModel.vitesse
) )
painter.setTransform( speedRuleTransform )
self.speedRule.setWindowSizeInPixel( self.skyWidth ) # pour optims
self.speedRule.setValue( self.pfdModel.vitesse )
# self.speedRule.setValue( 130 )
# print( "vitesse" , self.pfdModel.vitesse )
self.speedRule.paint( painter , option , widget )
painter.setClipping( False )

# indicateur vitesse
tw = 10
th = math.sqrt( math.pow( tw , 2 ) - math.pow( tw/2 , 2 ) ) * 1.4
speedMarkTransform = self.transform().translate( bw2 - self.skyWidth/2
+ th - 1 , bh2 ).rotate(90)
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 250 , 250 , 0 , 255 ) )
pen.setWidth(1)
painter.setPen( pen )
painter.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 250 , 250 , 0 , 255 ) ) )
painter.setTransform( speedMarkTransform )
painter.drawPolygon( QtGui.QPolygonF( [ QtCore.QPoint(-tw/2,0) , QtCore
.QPoint(tw/2,0) , QtCore.QPoint( 0 ,th) ] ) )

lineSpeedMarkTransform = self.transform()
painter.setTransform( lineSpeedMarkTransform )
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 250 , 250 , 0 , 255 ) )
pen.setWidth(2)
painter.setPen( pen )
painter.drawLine( bw2 - self.skyWidth/2 - 11 , bh2 , bw2 - self.
skyWidth/2 - 1 , bh2 )

# return

# background altitude
bgAltTransform = self.transform().translate( bw2 + self.skyWidth/2 ,
bh2 - self.skyWidth/2 )
painter.setTransform( bgAltTransform )
self.backSpeedAlt.paint( painter , option , widget )

```



```

# clip altitude
altRectMaskPath = QtGui.QPainterPath()
altRectMaskPath.addPath( self.backSpeedAlt.opaqueArea() )
altRectMaskPath.intersected( altRectMaskPath )
painter.setClipPath( altRectMaskPath )

# regle altitude
# altRuleTransform = self.transform().translate( bw2 + self.skyWidth/2
+ self.backSpeedAltWidth - 2, bh2 + self.altitudeRule.getTranslateInPixel(
self.pfdModel.altitude ) )
# painter.setTransform( altRuleTransform )
# self.altitudeRule.translatePixel = self.pfdModel.altitude
# self.altitudeRule.windowHeight = self.skyWidth
# self.altitudeRule.paint( painter , option , widget )
# painter.setClipping( False )

altRuleTransform = self.transform().translate( bw2 + self.skyWidth/2 +
self.backSpeedAltWidth - 2 , bh2 )
painter.setTransform( altRuleTransform )
self.altitudeRule.setWindowSizeInPixel( self.skyWidth ) # pour optims
self.altitudeRule.setValue( self.pfdModel.altitude )
self.altitudeRule.paint( painter , option , widget )
painter.setClipping( False )

# indicateur altitude
tw = 10
th = math.sqrt( math.pow( tw , 2 ) - math.pow( tw/2 , 2 ) ) * 1.4
altMarkTransform = self.transform().translate( bw2 + self.skyWidth/2 +
th + self.backSpeedAltWidth - 1 , bh2 ).rotate(90)
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 250 , 250, 0 , 255 ) )
pen.setWidth(1)
painter.setPen( pen )
painter.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 250 , 250, 0 , 255 ) ) )
painter.setTransform( altMarkTransform )
painter.drawPolygon( QtGui.QPolygonF( [ QtCore.QPoint(-tw/2,0) , QtCore
.QPoint(tw/2,0) , QtCore.QPoint( 0 ,th) ] ) )

lineAltMarkTransform = self.transform()
painter.setTransform( lineAltMarkTransform )
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 250 , 250, 0 , 255 ) )
pen.setWidth(2)
painter.setPen( pen )
painter.drawLine( bw2 + self.skyWidth/2 + self.backSpeedAltWidth - 11
, bh2 , bw2 + self.backSpeedAltWidth + self.skyWidth/2 - 1 , bh2 )

# background cap
bgCapTransform = self.transform().translate( bw2 - self.skyWidth/2 ,
bh2 + self.skyWidth/2 + self.backCapHeight )

```

```

painter.setTransform( bgCapTransform )
self.backCap.paint( painter , option , widget )

# clip cap
capRectMaskPath = QtGui.QPainterPath()
capRectMaskPath.addPath( self.backCap.opaqueArea() )
capRectMaskPath.intersected( capRectMaskPath )
painter.setClipPath( capRectMaskPath )

# regle cap
capRuleTransform = self.transform().translate( bw2 - self.capRule.
getTranslateInPixel( self.pfdModel.cap ) , bh2 + self.skyWidth/2 + self.
backCapHeight + 2)
painter.setTransform( capRuleTransform )
self.capRule.paint( painter , option , widget )
painter.setClipping( False )

# marker cap
painter.setTransform( self.transform() )
painter.setPen( QtGui.QPen( QtGui.QColor( 255 , 255 , 0 ) , 4 ) )
painter.drawLine( bw2 , bh2 + self.skyWidth/2 + self.backCapHeight -
12 , bw2 , bh2 + self.skyWidth/2 + self.backCapHeight )

# sky paint avec cut sur les bords gauche et droit
skyCircleTransform = self.transform()
cutWidth = self.skyWidth - 50
cutHeight = 2*self.skyWidth
rectangleMaskPath = QtGui.QPainterPath()
rectangleMaskPath.addRect( bw2 - cutWidth/2 , bh2 - cutHeight/2 ,
cutWidth , cutHeight )
painter.setTransform( skyCircleTransform )
painter.setClipPath( rectangleMaskPath )

self.skyCircle.setRect( bw2 - self.skyWidth/2 , bh2 - self.skyWidth/2 ,
self.skyWidth , self.skyWidth )
self.skyCircle.paint( painter , option , widget )

# clip ground
circleRectMaskPath = QtGui.QPainterPath()
circleRectMaskPath.addPath( self.skyCircle.opaqueArea() )
circleRectMaskPath.intersected( rectangleMaskPath )
painter.setClipPath( circleRectMaskPath.intersected( rectangleMaskPath
) )

# ground
groundTransform = self.transform().translate( bw2 , bh2 ).rotate( self.
pfdModel.roll ).translate( -bw2 , -bh2 ).translate( bw2 , bh2 + self.
pfdModel.pitch )
painter.setTransform( groundTransform )

```

```
self.ground.paint( painter , option , widget )

# ligne d'horizon
horizonTransform = self.transform().translate( bw2 , bh2 ).rotate( self
.pfdModel.roll ).translate( -bw2 , -bh2 ).translate( 0 , self.pfdModel.
pitch )
self.line.setLine( 0 , bh2 , self.backgroundWidth , bh2 )
painter.setTransform( horizonTransform )
self.line.paint( painter , option , widget )

# ligne du dessus
highTransform = self.transform().translate( bw2 , bh2 ).rotate( self.
pfdModel.roll ).translate( -bw2 , -bh2 ).translate( 0 , -self.
centralMaskHeight/2 )
painter.setTransform( highTransform )
self.line.paint( painter , option , widget )

# ligne du dessous
lowTransform = self.transform().translate( bw2 , bh2 ).rotate( self.
pfdModel.roll ).translate( -bw2 , -bh2 ).translate( 0 , self.
centralMaskHeight/2 )
painter.setTransform( lowTransform )
self.line.paint( painter , option , widget )

# mask de la grille centrale
centralMaskTranform = self.transform().translate( bw2 , bh2 ).rotate(
self.pfdModel.roll ).translate( -bw2 , -bh2 ).translate( bw2 , bh2 )
painter.setTransform( centralMaskTranform )
painter.setClipPath( self.centralMask.shape() )

# regle centrale
pitchRulerTransform = self.transform().translate( bw2 , bh2 ).rotate(
self.pfdModel.roll ).translate( -bw2 , -bh2 ).translate( bw2 , bh2 + self.
pfdModel.pitch + self.pitchRuler.totalHeightInPixel()/2 )
painter.setTransform( pitchRulerTransform )
self.pitchRuler.paint( painter , option , widget )

# left wing
leftWingTransform = self.transform().translate( bw2 - 120 , bh2 - 5 )
painter.setTransform( leftWingTransform )
painter.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 0 , 0 , 0 ) ) )
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 240 , 240 , 0 , 255 ) )
pen.setWidth(2)
painter.setPen( pen )
painter.drawPolygon( self.leftWingPolyGon )

# right wing
rightWingTransform = self.transform().translate( bw2 + 70 , bh2 - 5 )
painter.setTransform( rightWingTransform )
```

```

painter.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 0 , 0, 0 , 255 ) ) )
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 240 , 240, 0 , 255 ) )
pen.setWidth(2)
painter.setPen( pen )
painter.drawPolygon( self.rightWingPolyGon )

# centralMark
centralMarkTransform = self.transform().translate( bw2 , bh2 )
painter.setTransform( centralMarkTransform )
painter.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 0 , 0, 0 , 255 ) ) )
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 240 , 240, 0 , 255 ) )
pen.setWidth(2)
painter.setPen( pen )
painter.drawRect(-4,-4,8,8)

# fixe horizontale line
painter.setClipping( False )
painter.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 240 , 240, 0 , 255 ) ) )
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 240 , 240, 0 , 255 ) )
pen.setWidth(2)
painter.setPen( pen )
fixeHorizonTransform = self.transform()
painter.setTransform( fixeHorizonTransform )
painter.drawLine( bw2 - 60 , bh2 - 5, bw2 + 60 , bh2 -5 )

# triangle fixe cap
painter.setClipping( False )
triangleWidth = 20
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 240 , 240, 0 , 255 ) )
pen.setWidth(2)
painter.setPen( pen )
painter.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 0 , 0, 0 , 255 ) ) )
triangleHeight = math.sqrt( math.pow( triangleWidth , 2) - math.pow(
triangleWidth/2 , 2 ) ) # isocèle
triangle = QtGui.QPolygonF( [ QtGui.QPoint(-triangleWidth/2,0) ,
QtGui.QPoint(triangleWidth/2,0) , QtGui.QPoint( 0 ,triangleHeight) ] )
triangleFixeCapTransform = self.transform().translate( bw2 , bh2 -
self.skyWidth/2 - triangleHeight )
painter.setTransform( triangleFixeCapTransform )
painter.drawPolygon( triangle )

# rectangle de cap en haut
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 255 , 255, 255 , 255 ) )
pen.setWidth(2)
painter.setPen( pen )
painter.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 0 , 0, 0 , 0 ) ) )
for i in range( 0 , 7 ) :
    if i == 3 :continue
    if i in [0,6] :

```

```

        rw = 8
        rh = 20
    else :
        rw = 5
        rh = 10

        #.translate( bw2-rw/2 , bw2 -rh/2 )
        angle = -60/2 + i*10
#        markTransform = self.transform().translate(0,self.skyWidth/2).
rotate(angle).translate(0,-self.skyWidth/2).translate( bw2 , bw2 - self.
skyWidth/2 )
        markTransform = QtGui.QTransform().translate( bw2 , bh2 - 16+rh/2).
rotate( angle ).translate( 0 , -self.skyWidth/2-rh/2 ) #.translate( bw2 ,
bw2 - self.skyWidth/2 )

#        markTransform = self.transform().translate(100,100).rotate( angle )
#.translate( bw2 , bw2 )
#        translate( 0 , -self.skyWidth/2 ).translate( bw2 , bw2 ) #.translate
( self.skyWidth , self.skyWidth ) #.translate( bw2 , bw2 - self.skyWidth
/2 - triangleHeight ).rotate(i*10)
        painter.setTransform( markTransform )
        painter.drawRect( -rw/2 , -rh + 15 , rw , rh )

# triangle cap
painter.setClipping( False )
triangleWidth = 20
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 255 , 255 , 255 , 255 ) )
pen.setWidth(2)
painter.setPen( pen )
painter.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 0 , 0 , 0 , 0 ) ) )
triangleHeight = math.sqrt( math.pow( triangleWidth , 2) - math.pow(
triangleWidth/2 , 2 ) ) # isocèle
triangle = QtGui.QPolygonF( [ QtGui.QPoint(-triangleWidth/2,0) ,
QtGui.QPoint(triangleWidth/2,0) , QtGui.QPoint( 0 ,triangleHeight) ] )
triangleFixeCapTransform = self.transform().translate( bw2 , bh2 ).
rotate( self.pfdModel.roll ).translate( -bw2 , -bh2 ).translate( bw2 ,
bh2 - self.skyWidth/2 - triangleHeight + 2*triangleHeight).rotate(180)
painter.setTransform( triangleFixeCapTransform )
painter.drawPolygon( triangle )

# # altitude text
font = QtGui.QFont( "Arial" , 15 )
## font.setBold( True )
fontMetric = QtGui.QFontMetrics( font )
# pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 230 , 230 , 0 , 255 ) )
# pen.setWidth(2)
# painter.setPen( pen )
# painter.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 0 , 0 , 0 , 0 ) ) )

```

```

# altitudeTextTransform = self.transform().translate( bw2 , bh2 ).rotate(
self.pfdModel.roll ).translate( -bw2 , -bh2 )
# painter.setTransform( altitudeTextTransform )
# altitudeText = str( int(self.pfdModel.altitude/10) * 10 )
# altTextWidth = fontMetric.width( altitudeText )
# altTextHeight = fontMetric.height( )
## painter.drawText( bw2 - altTextWidth /2 , bh2 + self.skyWidth/2 -
altTextHeight/2 + 4 , altitudeText )

# FMA
# totalWidth = self.skyWidth + self.backSpeedAltWidth + self.
backSpeedAltWidth
totalFMAWidth = 500

for i in range( 0 , 5 ) :
    if i not in [0,5] :
        fmaTransform = self.transform().translate( bw2 - totalFMAWidth
/2 + i * totalFMAWidth/5 , bh2 - 250 )
        self.verticalLine.setLine( 0 ,0 , 0 , 70 )
        painter.setTransform( fmaTransform )
        self.verticalLine.paint( painter , option , widget )

# mode text
# painter.setClipping( False )
# font = QtGui.QFont( "Arial" , 15 )
# fontMetric = QtGui.QFontMetrics( font )
# pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 230 , 230 , 0 , 255 ) )
# pen.setWidth(2)
# painter.setPen( pen )
# painter.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor( 0 , 0, 0 , 0 ) ) )
# modeTextWidth = fontMetric.width( self.pfdModel.currentMode )
# modeTextHeight = fontMetric.height( )

# modeTextTransform = self.transform().translate( bw2 - modeTextWidth/2
, bh2 - self.skyWidth/2 - 50 )
# painter.setTransform( modeTextTransform )
## painter.drawText( bw2 - modeTextWidth /2 , bh2 - self.skyWidth/2 -
modeTextHeight/2 + 4 , self.pfdModel.currentMode )
# painter.drawText( 0,0, self.pfdModel.currentMode )

speedModeTransform = self.transform().translate( bw2 - totalFMAWidth/2
- fontMetric.width( "SPEED") - 10 + 1 * totalFMAWidth/5 , bh2 - self.
skyWidth/2 - 70 )
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 0 , 220 , 0 , 255 ) )
pen.setWidth(1.0)

```

```

painter.setPen( pen )
painter.setTransform( speedModeTransform )
painter.drawText( 0 , 0 , "SPEED" )

altModeTransform = self.transform().translate( bw2 - totalFMAWidth/2 -
fontMetric.width( "ALT" ) - 30 + 2 * totalFMAWidth/5 , bh2 - self.skyWidth/2
- 70 )
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 150 , 150 , 255 , 255 ) )
pen.setWidth(1.0)
painter.setPen( pen )
painter.setTransform( altModeTransform )
painter.drawText( 0 , 0 , "ALT" )

navModeTransform = self.transform().translate( bw2 - totalFMAWidth/2 -
fontMetric.width( "NAV" ) - 30 + 3 * totalFMAWidth/5 , bh2 - self.skyWidth/2
- 70 )
if self.pfdModel.isModeSafe : pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 0 , 220
, 0 , 255 ) )
else : pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 150 , 150
, 255 , 255 ) )

pen.setWidth(1.0)
painter.setPen( pen )
painter.setTransform( navModeTransform )
painter.drawText( 0 , 0 , "NAV" )

catModeTransform = self.transform().translate( bw2 - totalFMAWidth/2 -
10 - 70 + 4 * totalFMAWidth/5 , bh2 - self.skyWidth/2 - 70 ) #- fontMetric
.width( "CAT3" )
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 255 , 255 , 255 , 255 ) )
pen.setWidth(1.0)
painter.setPen( pen )
painter.setTransform( catModeTransform )
painter.drawText( 0 , 0 , "CAT3" )

dualModeTransform = self.transform().translate( bw2 - totalFMAWidth/2 -
10 - 70 + 4 * totalFMAWidth/5 , bh2 - self.skyWidth/2 - 40 )
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 255 , 255 , 255 , 255 ) )
pen.setWidth(1.0)
painter.setPen( pen )
painter.setTransform( dualModeTransform )
painter.drawText( 0 , 0 , "DUAL" )

ap1ModeTransform = self.transform().translate( bw2 - totalFMAWidth/2 -
10 - 70 + 5 * totalFMAWidth/5 , bh2 - self.skyWidth/2 - 70 )
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 255 , 255 , 255 , 255 ) )
pen.setWidth(1.0)
painter.setPen( pen )
painter.setTransform( ap1ModeTransform )

```

```

painter.drawText( 0 , 0 , "AP1" )

athrModeTransform = self.transform().translate( bw2 - totalFMAWidth/2 -
10 - 70 + 5 * totalFMAWidth/5 , bh2 - self.skyWidth/2 - 30 )
pen = QtGui.QPen( QtGui.QColor( 255 , 255 , 255 , 255 ) )
pen.setWidth(1.0)
painter.setPen( pen )
painter.setTransform( athrModeTransform )
painter.drawText( 0 , 0 , "A/THR" )

def boundingRect( self ) :
    # toujours en coords locales ici d'apres doc Qt, la pos est geree
    # avec qgraphicsitem.setPos() pour la position scene
    rect = QtCore.QRectF( 0 , 0 , self.backgroundWidth , self.
backgroundWidth )
    return rect

def updateView( self , modelSource = None , blockedViews = [] ) :

    if self not in blockedViews:
        if modelSource == self.pfdModel :
            for k in self.pfdModel.getModified() :
                if k in [ "vitesse" , "altitude" , "mode" , "cap" , "
isModeSafe" ] : self.update()

class PfdTaskView( QtWidgets.QGraphicsView ) :

    def __init__( self , parent = None ) :

        QtWidgets.QGraphicsView.__init__( self , parent )
# self.setViewport( QtWidgets.QOpenGLWidget ( ) )

# self.setViewportUpdateMode( QtWidgets.QGraphicsView.
MinimalViewportUpdate )
self.setRenderHint( QtGui.QPainter.Antialiasing )

self.setScene( QtWidgets.QGraphicsScene() )

self.pfdModel = PfdModel()
self.pfdItem = PfdItem( self.pfdModel )

self.scene().addItem( self.pfdItem )

```



```

def getSpeedScreenBox( self ) :
    bh2      = self.pfdItem.backgroundHeight/2
    bw2      = self.pfdItem.backgroundWidth /2
    topLeftScene = self.pfdItem.mapFromScene( QtCore.QPoint( bw2 - self.
pfdItem.skyWidth/2 - self.pfdItem.backSpeedAltWidth , bh2 - self.pfdItem.
skyWidth/2 ) )
    topLeft = self.mapToGlobal( QtCore.QPoint( topLeftScene.x() ,
topLeftScene.y() ) )
    return QtCore.QRect( topLeft , QtCore.QSize( self.pfdItem.
backSpeedAltWidth , self.pfdItem.skyWidth ) )

def getAltScreenBox( self ) :
    bh2      = self.pfdItem.backgroundHeight/2
    bw2      = self.pfdItem.backgroundWidth /2
    topLeftScene = self.pfdItem.mapFromScene( QtCore.QPoint( bw2 + self.
pfdItem.skyWidth/2 , bh2 - self.pfdItem.skyWidth/2 ) )
    topLeft = self.mapToGlobal( QtCore.QPoint( topLeftScene.x() ,
topLeftScene.y() ) )
    return QtCore.QRect( topLeft , QtCore.QSize( self.pfdItem.
backSpeedAltWidth , self.pfdItem.skyWidth ) )

def getModeScreenBox( self ) :
    font = QtGui.QFont( "Arial" , 15 )
    fontMetric = QtGui.QFontMetrics( font )
    totalFMAWidth = 500
    bh2      = self.pfdItem.backgroundHeight/2
    bw2      = self.pfdItem.backgroundWidth /2
    topLeftScene = self.pfdItem.mapFromScene( QtCore.QPoint( bw2 -
totalFMAWidth/2 - fontMetric.width( "NAV" ) - 30 + 3 * totalFMAWidth/5 , bh2
- self.pfdItem.skyWidth/2 - 70 ) )
    topLeft = self.mapToGlobal( QtCore.QPoint( topLeftScene.x() ,
topLeftScene.y() ) )
    return QtCore.QRect( topLeft , QtCore.QSize( self.pfdItem.
backSpeedAltWidth , self.pfdItem.skyWidth ) )

# def paintEvent( self , event ) :
##     print( "paint event" )
#     QtWidgets.QGraphicsView.paintEvent( self , event )
##     print( "global" , self.mapToGlobal( QtCore.QPoint(0,0) ) )
##     p = self.pfdItem.mapFromScene( QtCore.QPoint(0,0) )
##     print( "item" , self.mapToGlobal( QtCore.QPoint( p.x() , p.y() ) ) )
#
#

```

```
# print( self.getSpeedScreenBox() , self.getAltScreenBox() , self.
      getModeScreenBox() )
```

## 7.2. Sous-tâche FPT

```
from PyQt5 import QtCore, QtWidgets, QtGui
import random
import model
import collections
import datetime
import log
import icons.icons

patterns = {
    'A': {'1':0, '2':0, '3':0, '4':1, 'frequency':0.14, 'breakdown':0.143},
    'B': {'1':0, '2':0, '3':1, '4':0, 'frequency':0.08, 'breakdown':0.375},
    'C': {'1':0, '2':0, '3':1, '4':1, 'frequency':0.09, 'breakdown':0.111},
    'D': {'1':0, '2':1, '3':0, '4':0, 'frequency':0.08, 'breakdown':0.625},
    'E': {'1':0, '2':1, '3':0, '4':1, 'frequency':0.06, 'breakdown':0.167},
    'F': {'1':0, '2':1, '3':1, '4':0, 'frequency':0.06, 'breakdown':0.500},
    'G': {'1':0, '2':1, '3':1, '4':1, 'frequency':0.04, 'breakdown':0.250},
    'H': {'1':1, '2':0, '3':0, '4':0, 'frequency':0.14, 'breakdown':0.857},
    'I': {'1':1, '2':0, '3':0, '4':1, 'frequency':0.06, 'breakdown':0.500},
    'J': {'1':1, '2':0, '3':1, '4':0, 'frequency':0.06, 'breakdown':0.833},
    'K': {'1':1, '2':0, '3':1, '4':1, 'frequency':0.03, 'breakdown':0.333},
    'L': {'1':1, '2':1, '3':0, '4':0, 'frequency':0.09, 'breakdown':0.889},
    'M': {'1':1, '2':1, '3':0, '4':1, 'frequency':0.03, 'breakdown':0.667},
    'N': {'1':1, '2':1, '3':1, '4':0, 'frequency':0.04, 'breakdown':0.750}
}

class BreakdownTaskModel( model.Model ) :

    endOfSequenceSignal = QtCore.pyqtSignal()

    def __init__( self ) :

        model.Model.__init__( self )

        # view parameters
        self.isCircleOn = False
        self.isRectangleOn = False
        self.isCrossOn = False
        self.isTriangleOn = False
```

```

self.userInputValue = "no_answer" # dans [ "no_answer" , "engine" ,
"break" ] reponse utilisateur
self.engineAnswerValue = None # dans [ None , "engine" , "break" ]

self.isAnswerVisible = False
self.isTaskEnabled = True

# sequences
self._numberOfBloc = 4
self._numberOfTrialPerBloc = 50
self._trialDurationInSeconds = 5.0

self.currentBlocNumber = -1
self.currentTrialNumber = -1

# sequences precalculees
self._trialToPlay = []
self._blocs = []
self.generateSequence()

# tirer au sort les differentes sequences pour les differents modes
# - entrainement engine seul : 4 blocs
# - entrainement double-tache : 1 blocs
# - test : 4 blocs
trainingBlocSequence = [ 0 , 1 , 2 , 3 ]
random.shuffle( trainingBlocSequence )
testBlocSequence = trainingBlocSequence[:]
while trainingBlocSequence == testBlocSequence : random.shuffle(
testBlocSequence )

self.singleTaskTrainingBlocMapping = trainingBlocSequence
self.doubleTaskTrainingBlocMapping = [ random.randint(0,3) ]
self.testTaskBlocMapping = testBlocSequence

self.currentTaskMode = "noTask" # dans [ "noTask" , "
singleTaskTraining" , "doubleTaskTraining" , "testTask" ]

# le troisieme bloc est en loc
self.locBlocNumber = 2 # car les numeros de bloc commencent a 0
self.isInLoc = False

self.recordAnswers = False
self.score = [] # de type [ True , False , True , ... ] a
chaque reponse de loc

def setRecordAnswers( self , on ) :
if self.recordAnswers == False and on : self.score = []
self.recordAnswers = on

```

```

def recordKeyPressed( self , keyPressed ) :
    # [EPOCH] [SMI_TIMESTAMP] USER_KEYBOARD [touche : K,F,H ] [detecte :
    TRUE/FALSE]

#     if keyPressed == "ENGINE"      : isEventDetected = self.isEngine()
#     elif keyPressed == "CLEAR"     : isEventDetected = self.
isInModeDangerZone()

    msg = "ENGINE_USER_KEYBOARD" + keyPressed + "\n"
#     msg += "TRUE" if isEventDetected else "FALSE"
    log.logger.log( msg )

#     revenir a la normale pour mode
    if keyPressed == "MODE" and not self.isModeSafe :
        self.isModeSafe = True
        self.notifyViews()

#     if self.recordAnswers :
#         self.keyPressed.append( ( keyPressed , isEventDetected ) )

def reinit( self ) :
    self.isCircleOn      = False
    self.isRectangleOn  = False
    self.isCrossOn       = False
    self.isTriangleOn   = False
    self.currentBlocNumber = -1
    self.currentTrialNumber = -1

def generateSequence( self ) :

    # Definitions:
    # - un pattern est une combinaison triangle/rond/carre/croix
    # - un trial est un pattern + un resultat ( panne ou non panne )
    # - il y a donc 14 type de pattern ( de 'A' a 'N' )
    # - il y a donc 2x14 types de trial
    # - ( C,0 ) correspond au pattern C ( croix et triangle allume ) et
une absence de panne

    # Problematique:
    # il faut generer aleatoirement une liste contenant l'ensemble
    # des trials selon une repartition donnee par la loi-ci dessus.
    # La contrainte est que deux trials du meme pattern ne doivent
    # pas se succeder. Par ex (D,0) ne doit pas succeder a (D,1)
    # et il faut une repartition homogene ie pas un ensemble de
    # meme trial alternes a la fin par ex

```

```

#
# Algorithme :
# - on procede par insertion successive dans un tableau initialement
#   rempli par l'ensemble des trials les plus nombreux
# - on parcourt l'ensemble des types de trials
#   - pour chaque type de trial , on insere l'ensemble
#     de ses occurrence dans le tableau en respectant la
#     contrainte, ie pas de trial de meme pattern avant et apres
# - le parcours des types de trials se fait dans l'ordre decroissant
de leur occurrence
# - on effectue un dernier parcours sur le tableau pour supprimer les
eventuelles successions
#   du premier type de trial, en effectuant des switchs en place sur
le tableau

numberOfTrialPerBloc = 50
numberOfBloc          = 4
numOfTrial            = numberOfTrialPerBloc * numberOfBloc
trialToPlay           = []

# pour chaque type de trial, calculer le nombre d'occurrence a placer
# trialTypeCount[ 5 ] = 4 signifie que le pattern ('B',1) est present 4
fois
# detail du calcul : 5 = 2*2 + 1 , 'B' = int(5/2) = 2 , et 1 = 5
modulo (2)
trialTypeCount = []
for label,values in patterns.items() :
    trialTypeCount.append( int( round( numOfTrial * values['frequency']
* (1-values['breakdown']) ) ) ) # 0 : absence de panne
    trialTypeCount.append( int( round( numOfTrial * values['frequency']
* values['breakdown'] ) ) ) # 1 : panne ( on inverse ici )

# on commence par placer les elements les plus frequents en
# alternant les patterns pour eviter une boucle infinie. En effet on
# ne peut pas entremeler du (A,1) sur un tableau uniquement compose de
(A,0)
# Donc on separe en deux series paires et impaires correspondant aux
trials
# sans panne puis avec panne
evenList = [ x for x in range(0,len(trialTypeCount)) if x%2 == 0 ]
oddList  = [ x for x in range(0,len(trialTypeCount)) if x%2 == 1 ]

# on classe les series en nombre d'occurrence decroissant
evenList = sorted( evenList , key = lambda x : trialTypeCount[x] ,
reverse = True )
oddList  = sorted( oddList  , key = lambda x : trialTypeCount[x] ,
reverse = True )

res = 0

```

```

for i in trialTypeCount :
    res += i

# print( [ (x, typeCount[x]) for x in evenList ] )
# print( [ (x, typeCount[x]) for x in oddList ] )

# on initialise le tableau avec le type de trial le plus frequent
trialToPlay = [ (evenList + oddList)[0] ] * trialTypeCount[ (evenList +
oddList)[0] ]

# fonction outil pour tester : (A,0) et (A,1) retourne True
def isSamePattern( a , b ) : return int(a/2) == int(b/2)

# on parcours les differents types de trial et on
# les insere aleatoirement dans le tableau.
for t in (evenList + oddList)[1:] :
    for i in range(0,trialTypeCount[t]) :
        while True:
            # tirer une position d'insertion aleatoire dans le tableau
            # tant que celle-ci ne satisfait pas la contrainte
            r = random.randint( 0 , len(trialToPlay) - 1 )
            isInsertionPossible = not isSamePattern( trialToPlay[ max(
r-1,0) ] , t ) # avant
            isInsertionPossible &= not isSamePattern( trialToPlay[r
] , t ) # apres
            if isInsertionPossible :
                trialToPlay.insert( r , t )
                break

# ici seuls les elements du premier type de trial peuvent encore se
# succeder : il faut donc les separer dans une derniere passe

firstType = (evenList + oddList)[0]

i = 0
while i < len( trialToPlay ) - 1 :

    if trialToPlay[i] == firstType and trialToPlay[i+1] == firstType :

        # deux elements de la sequence sont du meme type : switcher des
elements
        while True :

            # tirer une nouvelle position dans le tableau sur laquelle
switcher
            # tant que la contrainte n'est pas satisfait. Verifier la
contrainte

```

```

        # sur les positions source et cible
        r = random.randint( 0 , len(trialToPlay) - 2 )
        isSwitchPossible = not isSamePattern( trialToPlay[max(r
-1,0)] , firstType      )
        isSwitchPossible &= not isSamePattern( trialToPlay[r+1
] , firstType      )
        isSwitchPossible &= not isSamePattern( trialToPlay[max(i
-1,0)] , trialToPlay[r] )
        isSwitchPossible &= not isSamePattern( trialToPlay[i+1
] , trialToPlay[r] )

        if isSwitchPossible :
            trialToPlay[r] , trialToPlay[i] = trialToPlay[i] ,
trialToPlay[r]
            i = 0 # relancer le parcours du tableau
            break

    else :
        i += 1

# tester que la contrainte est bien respectee
for i in range( 0 , len(trialToPlay) -1 ) :
    if isSamePattern( trialToPlay[i] , trialToPlay[i+1] ) :
        print("#####ERREUR#####" , i , i+1)

# convertir les indexes stockes dans trialToPlay en format utilisable :
ex 5 devient ('B', 1 ) ie pattern B avec panne
# avec 0:panne , 1 :non panne, donc t%2 == est une panne ? 1 oui , 0
non
    trialToPlay = [ ( str( chr( 65 + int( t /2 )) ) , t%2 ) for t in
trialToPlay ]

# debug
#   for t in trialToPlay : print( t[0] , end=' ')
#   print()

#   for blocNumber in range( 0 , numberOfBloc ) :
#       print( "Bloc #" , blocNumber )
#       print( trialToPlay[ blocNumber * numberOfTrialPerBloc : (
blocNumber + 1 ) * numberOfTrialPerBloc ] )
#       print()

# stocker dans les blocs
#   print( "resulat", len( trialToPlay ) )

    for b in range( self._numberOfBloc ):
        self._blocs.append( trialToPlay[ self._numberOfTrialPerBloc*b :
self._numberOfTrialPerBloc*(b+1) ] )

```

```

def getCurrentTrialNumber( self ) :
    return self.currentTrialNumber

def getCurrentBlocNumber( self ) :
    return self.currentBlocNumber

def getCurrentPattern( self ) :
    if self.currentTaskMode == "noTask" : return "0000"
    # selectionner le bon blocMapping en fonction du mode
    if self.currentTaskMode == "singleTaskTraining" : blocMapping = self.
singleTaskTrainingBlocMapping
    elif self.currentTaskMode == "doubleTaskTraining" : blocMapping = self.
doubleTaskTrainingBlocMapping
    elif self.currentTaskMode == "testTask" : blocMapping = self.
testTaskBlocMapping

    trialName = self._blocs[ blocMapping[ self.currentBlocNumber ] ][
self.currentTrialNumber ][0]
    resultOfTrial = self._blocs[ blocMapping[ self.currentBlocNumber ] ][
self.currentTrialNumber ][1]
    return str( patterns[trialName] ['1'] ) + str( patterns[trialName] ['2'
] ) + str( patterns[trialName] ['3'] ) + str( patterns[trialName] ['4'] )

def startNextTrial( self ) :

    if self.currentTaskMode == "noTask" : return False

    self.isAnswerVisible = False
    self.userInputValue = "no_answer"

    msg = "FEEDBACK_END_"
    msg += str(self.currentTrialNumber ) + "_"
    msg += self.getCurrentPattern() + "_"
    msg += "EXPECTED_" + str(self.engineAnswerValue).upper() + "_"
    msg += "USER_" + self.userInputValue.upper() + "_"
    if self.engineAnswerValue != None and self.currentTrialNumber >= 0 :
#         log.logger.log( msg )
#         # [trialNumber] [pattern: 0010] [resultat:ENGINE/CLEAR]
        log.logger.log( "TRIAL_END_" + str( self.currentTrialNumber ) + "_"
+ self.getCurrentPattern() + "_" + self.engineAnswerValue )

    # selectionner le bon blocMapping en fonction du mode
    if self.currentTaskMode == "singleTaskTraining" : blocMapping = self.
singleTaskTrainingBlocMapping

```



```

        elif self.currentTaskMode == "doubleTaskTraining" : blocMapping = self.
doubleTaskTrainingBlocMapping
        elif self.currentTaskMode == "testTask"           : blocMapping = self.
testTaskBlocMapping

# si on est au tout debut , lancer un trial
if self.currentBlocNumber == -1 and self.currentTrialNumber == -1 :
    print( "init_new_mode(0,0)" )
    self.currentBlocNumber = 0
    self.currentTrialNumber = 0

else :
    # reste-t-il un trial dans le bloc ?
    if self.currentTrialNumber < self._numberOfTrialPerBloc - 1 :
        # passer au trial suivant du meme bloc
        self.currentTrialNumber += 1

    elif self.currentTrialNumber == self._numberOfTrialPerBloc - 1 :
        # passer au bloc suivant
        log.logger.log( "BLOC_END" + str( self.currentBlocNumber ) )
        self.currentBlocNumber += 1
        self.currentTrialNumber = 0

# arreter la sequence si on est en fin du dernier bloc de la
sequence
if self.currentBlocNumber >= len( blocMapping ) :
    print( "fin_sequence_de_bloc:", self.currentTaskMode )
    self.currentBlocNumber = -1
    self.currentTrialNumber = -1
    self.currentTaskMode = "noTask"
    self.endOfSequenceSignal.emit()
    return False
else :
    log.logger.log( "BLOC_START" + str( self.currentBlocNumber
) )

    self.isInLoc = ( self.currentTaskMode == "testTask" and self.
currentBlocNumber == self.locBlocNumber )

#     print( "start new trial ", self._currentTrialNumber , self.
_currentBlocNumber )
#     logging.info( str(datetime.datetime.now().timestamp()) + " : nouveau
loc trial (" + str(self._currentBlocNumber) + "," + str(self.
_currentTrialNumber) + ")" )
#     log.logger.log( "ENGINE_TRIAL_START " + str( self._currentBlocNumber
) )

```

```

        trialName      = self._blocs[ blocMapping[ self.currentBlocNumber ] ][
self.currentTrialNumber ][0]
        resultOfTrial = self._blocs[ blocMapping[ self.currentBlocNumber ] ][
self.currentTrialNumber ][1]

        self.isCircleOn      = False    if patterns[trialName] ['1'] == 0
else True
        self.isRectangleOn   = False    if patterns[trialName] ['2'] == 0
else True
        self.isCrossOn       = False    if patterns[trialName] ['3'] == 0
else True
        self.isTriangleOn    = False    if patterns[trialName] ['4'] == 0
else True
        self.engineAnswerValue = "engine" if resultOfTrial == 1
else "clear"

        # [EPOCH] [SMI_TIMESTAMP] TRIAL_START/END [trialNumber] [pattern: 0010]
[resultat:ENGINE/CLEAR]
        # [EPOCH] [SMI_TIMESTAMP] FEEDBACK_START/END [trialNumber] [pattern:
0010] [resultat:TRUE/FALSE]
        # [EPOCH] [SMI_TIMESTAMP] LOC_START/_END ( optionnel car bloc 3
toujours )

        pattern = str( patterns[trialName] ['1'] ) + str( patterns[trialName] [
'2'] ) + str( patterns[trialName] ['3'] ) + str( patterns[trialName] ['4']
)

        log.logger.log( "TRIAL_START" + str(self.currentTrialNumber ) + " " +
pattern + " " + self.engineAnswerValue.upper() )

        return True

# ----- Vues
-----

class GeometricItem( QtWidgets.QGraphicsItem ) :

    def __init__( self ) :
        QtWidgets.QGraphicsItem.__init__( self )
        self.isActive = True
        self.shadow    = QtWidgets.QGraphicsDropShadowEffect()

```

```
self.shadow.setOffset(3,3)
self.shadow.setColor( QtGui.QColor( 0 , 0 , 0 , 50 ) )
self.shadow.setBlurRadius( 20 )

def setState( self , on ) :
    self.isActive = on
    if on :
        self.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor(255,255,50) ) )
        self.shadow.setColor( QtGui.QColor( 50 , 50, 5 , 50 ) )
        self.setPen( QtGui.QPen( QtGui.QColor(200,200,0) ) )

    else :
        self.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor(200,200,200) ) )
        self.shadow.setColor( QtGui.QColor( 0 , 0 , 0 , 50 ) )
        self.setPen( QtGui.QPen( QtCore.Qt.gray , 0 ) )

    self.setGraphicsEffect( self.shadow )

class CircleItem( QtWidgets.QGraphicsEllipseItem , GeometricItem ) :

    def __init__( self , x , y , w , h ):
        GeometricItem.__init__( self )
        QtWidgets.QGraphicsEllipseItem.__init__( self , x , y , w , h )
        self.setState( False )

class SquareItem( QtWidgets.QGraphicsRectItem , GeometricItem ) :

    def __init__( self , x , y , w , h ) :
        GeometricItem.__init__( self )
        QtWidgets.QGraphicsRectItem.__init__( self , x , y , w , h )
        self.setState( True )

class TriangleItem( QtWidgets.QGraphicsPolygonItem , GeometricItem ) :

    def __init__( self , x , y , w , h ):
        GeometricItem.__init__( self )
        trianglePolygon = QtGui.QPolygonF( [ QtCore.QPoint(0,h) ,QtCore.QPoint(
w/2,0) ,QtCore.QPoint(w,h) ] )
        QtWidgets.QGraphicsPolygonItem.__init__( self , trianglePolygon )
        self.setState( True )
        self.setPos( x , y )

class EngineItem( QtWidgets.QGraphicsItemGroup ) :
```

```

def __init__( self ) : #, x , y , w , h
#   QtWidgets.QGraphicsRectItem.__init__( self , x , y , w , h )
   QtWidgets.QGraphicsItemGroup.__init__( self )

   self.shadow = QtWidgets.QGraphicsDropShadowEffect()
   self.shadow.setOffset(3,3)
   self.shadow.setColor( QtGui.QColor( 100 , 100 , 100 , 150 ) )
   self.shadow.setBlurRadius( 10 )
   self.setGraphicsEffect( self.shadow )

   self.itemWidth = 100
   self.itemHeight = 100

   self.background = QtWidgets.QGraphicsRectItem( 0 , 0 , self.itemWidth ,
self.itemHeight )
   self.background.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor(80,80,80) ) )
   self.background.setPen( QtGui.QPen( QtGui.QColor(80,80,80) ) )

   # texte
   font = QtGui.QFont( "Arial" , 18 )
   font.setBold( True )
   self.fontMetric = QtGui.QFontMetrics( font )

   textWidth = self.fontMetric.width( "Engine" )
   textHeight = self.fontMetric.height( )

   redShadow = QtWidgets.QGraphicsDropShadowEffect()
   redShadow.setOffset(3,3)
   redShadow.setColor( QtGui.QColor( 255 , 0 , 0 , 200 ) )
   redShadow.setBlurRadius( 10 )

   self.text = QtWidgets.QGraphicsTextItem()
   self.text.setPos( self.itemWidth / 2 - textWidth/1.8 , self.itemHeight
/ 2 - textHeight/1.5 )
   self.text.setPlainText("Engine")
   self.text.setFont( font )
   self.text.setDefaultTextColor( QtGui.QColor(255,0,0,255) )
   self.text.setGraphicsEffect( redShadow )

   self.addToGroup( self.background )
   self.addToGroup( self.text )

def setEngineClear( self ) :
   textWidth = self.fontMetric.width( "CLEAR" )
   textHeight = self.fontMetric.height( )
   self.background.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor(0,150, 0,255) ) )
   self.text.setPos( self.itemWidth / 2 - textWidth/1.8 , self.itemHeight
/ 2 - textHeight/1.5 )

```

```

self.text.setDefaultTextColor( QtGui.QColor( 0,255, 0,255) )
self.text.setPlainText("CLEAR")
self.text.setVisible( True )

def setEngineBreak( self ) :
    textWidth = self.fontMetric.width( "ENGINE" )
    textHeight = self.fontMetric.height()
    self.background.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor(150,0, 0,255) ) )
    self.text.setPos( self.itemWidth / 2 - textWidth/1.8 +2 , self.
itemHeight / 2 - textHeight/1.5 )
    self.text.setDefaultTextColor( QtGui.QColor( 255,0,0,255) )
    self.text.setPlainText("ENGINE")
    self.text.setVisible( True )

def setNoText( self ) :
    self.background.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor(150,150, 150,255)
) )
    self.text.setVisible( False )

class CrossItem( QtWidgets.QGraphicsPolygonItem , GeometricItem ) :

    def __init__( self , x , y , w , h ):
        GeometricItem.__init__( self )
        internalWidth = 10

        crossPolygon = QtGui.QPolygonF( [
            QtCore.QPoint( w/2-internalWidth/2 , 0 ) ,
            QtCore.QPoint( w/2+internalWidth/2 , 0 ) ,
            QtCore.QPoint( w/2+internalWidth/2 , h/2-internalWidth/2 ) ,
            QtCore.QPoint( w , h/2-internalWidth/2 ) ,
            QtCore.QPoint( w , h/2+internalWidth/2 ) ,
            QtCore.QPoint( w/2+internalWidth/2 , h/2+internalWidth/2 ) ,
            QtCore.QPoint( w/2+internalWidth/2 , h ) ,
            QtCore.QPoint( w/2-internalWidth/2 , h ) ,
            QtCore.QPoint( w/2-internalWidth/2 , h/2 + internalWidth/2 ) ,
            QtCore.QPoint( 0 , h/2 + internalWidth/2 ) ,
            QtCore.QPoint( 0 , h/2 - internalWidth/2 ) ,
            QtCore.QPoint( w/2-internalWidth/2 , h/2 - internalWidth/2 )
        ])

        QtWidgets.QGraphicsPolygonItem.__init__( self , crossPolygon )
        self.setState( False )
        self.setPos( x , y )
        self.setTransformOriginPoint( w/2 , h/2 )
        self.setRotation( 45 )

```

```

class BreakdownTaskView( QtWidgets.QGraphicsView ) :

    def __init__( self , parent = None ) :

        QtWidgets.QGraphicsView.__init__( self , parent )

        self.setViewportUpdateMode( QtWidgets.QGraphicsView.
MinimalViewportUpdate )
        self.setRenderHint( QtGui.QPainter.Antialiasing )

        self.setScene( QtWidgets.QGraphicsScene() )

        self.breakdownTaskModel = BreakdownTaskModel()
        self.breakdownTaskModel.notifyViewsSignal.connect( self.updateView )

        itemWidth = 100
        itemHeight = 100
        itemOffset = 20

        self.circleItem = CircleItem ( 0 , 0 ,
itemWidth , itemHeight )
        self.squareItem = SquareItem ( itemWidth + itemOffset , 0 ,
itemWidth , itemHeight )
        self.crossItem = CrossItem ( 2*(itemWidth + itemOffset) , 0 ,
itemWidth + 10 , itemHeight + 10 )
        self.triangleItem = TriangleItem( 3*(itemWidth + itemOffset) , 0 ,
itemWidth , itemHeight )

        self.engineClearOrBreakItem = EngineItem( )
        self.engineClearOrBreakItem.setPos( 4*(itemWidth + itemOffset) , 0 )
#itemHeight/2 - self.engineClearOrBreakItem.itemHeight /2 )

        self.taskItem = QtWidgets.QGraphicsItemGroup()
        self.taskItem.addToGroup( self.circleItem )
        self.taskItem.addToGroup( self.squareItem )
        self.taskItem.addToGroup( self.crossItem )
        self.taskItem.addToGroup( self.triangleItem )
        self.taskItem.addToGroup( self.engineClearOrBreakItem )

        self.scene().addItem( self.taskItem )

        self.engineClearOrBreakItem.setEngineClear()

        self.setBackgroundBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor(240,240,240) ) )

```

```
# self.taskItem.setPen( QtGui.QPen( QtCore.Qt.red , 10 ) )

# self.setBackgroundBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor(240,0,0) ) )
# self.setBackgroundBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor(0,240,0) ) )

aRatio = 610.0 / 458.0
th = itemHeight
tw = th * aRatio

# self.checkPixmap = QtWidgets.QGraphicsPixmapItem( QtGui.QPixmap.
fromImage( QtGui.QImage( "./icons/checkAlpha.tiff" ).scaled( tw , th ) )
)
self.checkPixmap = QtWidgets.QGraphicsPixmapItem( QtGui.QPixmap.
fromImage( QtGui.QImage( "./icons/check.png" ).scaled( tw , th ) ) )
self.checkPixmap.setPos( 5*(itemWidth + itemOffset ) , 0 )

# self.crossPixmap = QtWidgets.QGraphicsPixmapItem( QtGui.QPixmap.
fromImage( QtGui.QImage( "./icons/crossAlpha.tiff" ).scaled( tw ,th ) ) )
self.crossPixmap = QtWidgets.QGraphicsPixmapItem( QtGui.QPixmap.
fromImage( QtGui.QImage( "./icons/cross.png" ).scaled( tw ,th ) ) )
self.crossPixmap.setPos( 5*(itemWidth + itemOffset ) , 0 )

self.taskItem.addToGroup( self.checkPixmap )
self.taskItem.addToGroup( self.crossPixmap )

self.checkPixmap.setVisible( True )
self.crossPixmap.setVisible( False )

penW = 20
o = 10

self.borderFeedback = QtWidgets.QGraphicsRectItem( 0 , 0 , self.size().
width() , self.size().height() )
self.borderFeedback.setPen( QtGui.QPen( QtGui.QColor(200,240,240) ,
penW ) )
# self.borderFeedback.setPos( 0,-500 )
# self.borderFeedback.setRect( -penW/2 - o, -penW/2 - o, 6*(itemWidth +
itemOffset ) + 2*o , itemHeight + penW/2 + 2*o)
# self.borderFeedback.setRect( 0,-penW/2 - o, 6*(itemWidth + itemOffset
) + 2*o , itemHeight + penW/2 + 2*o)
# self.borderFeedback.setRect( - penW/2,- penW/2, 6*(itemWidth +
itemOffset ) + penW , itemHeight + penW )
# self.borderFeedback.setRect( 0 , 0 , 6 * ( itemWidth + itemOffset ) +
penW , itemHeight + penW )
self.borderFeedback.setRect( 0 , 0 , self.size().width() , self.size()
.height() )
```

```

#         self.borderFeedback.setBrush( QtGui.QBrush( QtGui.QColor(200,200,200) )
#     )
#         self.taskItem.addToGroup( self.borderFeedback )
#         self.scene().addItem( self.borderFeedback )

        self.setTaskEnabled( True )
        self.setUserInputVisibility( False )
        self.setAnswerVisibility( False )

def setUserInputVisibility( self , display ) :
    self.engineClearOrBreakItem.setVisible( display )

def setAnswerVisibility( self , display ) :
    self.checkPixmap.setVisible( display )
    self.crossPixmap.setVisible( display )

def setTaskEnabled( self , enabled ) :
#         self.taskItem.setVisible( display )

        if enabled :
            self.circleItem .setState( self.breakdownTaskModel.isCircleOn      )
            self.squareItem .setState( self.breakdownTaskModel.isRectangleOn )
            self.crossItem   .setState( self.breakdownTaskModel.isCrossOn     )
            self.triangleItem.setState( self.breakdownTaskModel.isTriangleOn )

        else :
            self.circleItem .setState( False )
            self.squareItem .setState( False )
            self.crossItem   .setState( False )
            self.triangleItem.setState( False )
            self.checkPixmap.setVisible( False )
            self.crossPixmap.setVisible( False )
            self.engineClearOrBreakItem.setVisible( False )

def updateView( self , modelSource = None , blockedViews = [] ) :
#         self.borderFeedback.setPen( QtGui.QPen( QtCore.Qt.red ,10  ) )
#         self.borderFeedback.setRect( 0 , 0 , self.size().width() - 10, self.
size().height() )

        if self not in blockedViews :

```



```

    if modelSource == self.breakdownTaskModel :
        for k in self.breakdownTaskModel.getModified() :

            if k in [ "isCircleOn" , "isRectangleOn" , "isCrossOn" , "
isTriangleOn" ] :
                self.circleItem .setState( self.breakdownTaskModel.
isCircleOn )
                self.squareItem .setState( self.breakdownTaskModel.
isRectangleOn )
                self.crossItem .setState( self.breakdownTaskModel.
isCrossOn )
                self.triangleItem.setState( self.breakdownTaskModel.
isTriangleOn )

            elif k == "engineState" :
                if not self.breakdownTaskModel.isTaskEnabled : continue
                if self.breakdownTaskModel.engineState == "hide" :
self.engineClearOrBreakItem.setNoText()
                elif self.breakdownTaskModel.engineState == "break" :
self.engineClearOrBreakItem.setEngineBreak()
                elif self.breakdownTaskModel.engineState == "clear" :
self.engineClearOrBreakItem.setEngineClear()

            elif k == "userInputValue" :
                if not self.breakdownTaskModel.isTaskEnabled : continue

                if self.breakdownTaskModel.userInputValue == "
no_answer" :
                    self.setUserInputVisibility( False )
                elif self.breakdownTaskModel.userInputValue == "engine"
:
                    self.engineClearOrBreakItem.setEngineBreak()
                    self.setUserInputVisibility( True )
                elif self.breakdownTaskModel.userInputValue == "clear"
:
                    self.engineClearOrBreakItem.setEngineClear()
                    self.setUserInputVisibility( True )

            elif k == "isAnswerVisible" :

                # [EPOCH] [SMI_TIMESTAMP] FEEDBACK_START/END [
trialNumber] [pattern: 0010] [resultat_attendu:TRUE/FALSE] [reponse user ]
[ resultat ]

                if self.breakdownTaskModel.isAnswerVisible :
                    msg = "FEEDBACK_"
                    msg += str(self.breakdownTaskModel.
getCurrentTrialNumber() ) + "_"

```

```

        msg += self.breakdownTaskModel.getCurrentPattern()
    + "␣"
        msg += "EXPECTED_" + str(self.breakdownTaskModel.
engineAnswerValue).upper() + "␣"
        msg += "USER_" + self.breakdownTaskModel.
userInputValue.upper() + "␣"

        result = False
        if not self.breakdownTaskModel.isInLoc :
            if self.breakdownTaskModel.userInputValue ==
self.breakdownTaskModel.engineAnswerValue :
                self.checkPixmap.setVisible( True )
                self.crossPixmap.setVisible( False )
                msg += "RESULT_TRUE"
                result = True
            else :
                self.checkPixmap.setVisible( False )
                self.crossPixmap.setVisible( True )
                msg += "RESULT_FALSE"
                result = False
        else :
            print("bloc␣aleatoire" )
            if self.breakdownTaskModel.userInputValue != "
no_answer" :

                # bloc loc donc aleatoire
                if random.randint(0,1) == 0 :
                    self.checkPixmap.setVisible( False )
                    self.crossPixmap.setVisible( True )
                    msg += "RESULT_FALSE"
                    result = False
                else :
                    self.checkPixmap.setVisible( True )
                    self.crossPixmap.setVisible( False )
                    msg += "RESULT_TRUE"
                    result = True
            else :
                self.checkPixmap.setVisible( False )
                self.crossPixmap.setVisible( True )
                msg += "RESULT_FALSE"
                result = False

        log.logger.log( msg )

        if self.breakdownTaskModel.recordAnswers : self.
breakdownTaskModel.score.append( result )

    else :
        self.setAnswerVisibility( False )

```

```
#             msg = "FEEDBACK_END "
#             msg += str(self.breakdownTaskModel.
currentTrialNumber ) + " "
#             msg += self.breakdownTaskModel.getCurrentPattern()
#             + " "
#             msg += "EXPECTED_" + str(self.breakdownTaskModel.
engineAnswerValue).upper() + " "
#             msg += "USER_" + self.breakdownTaskModel.
userInputValue.upper() + " "
#             if self.breakdownTaskModel.engineAnswerValue !=
None and self.breakdownTaskModel.currentTrialNumber >= 0 :
#                 log.logger.log( msg )
#                 # [trialNumber] [pattern: 0010] [resultat:
ENGINE/CLEAR]
#                 log.logger.log( "TRIAL_END " + str( self.
breakdownTaskModel.currentTrialNumber ) + " " + self.breakdownTaskModel.
getCurrentPattern() + " " + self.breakdownTaskModel.engineAnswerValue )

                elif k == "isTaskEnabled" :
                    self.setTaskEnabled( self.breakdownTaskModel.
isTaskEnabled )
```