Université Victor Segalen Bordeaux 2

Année 2010

Thèse n°6278

THÈSE

pour le

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 2

Mention : Sciences Cognitives

Présentée et soutenue publiquement

Le 25 Juin 2010

Par Marie CHARBONNEAU

Né(e) le 16 juillet 1980 à Bourges

Approche méthodologique et comparative des critères de qualité d'image, de perception et d'exploitabilité opérationnelle

Application aux systèmes d'aide à la vision nocturne en aéronautique

Membres du Jury

Mme Catherine SEMAL .....Président
Mme Corinne ROUMES.....Rapporteur
Mr Ron KRUK.....Rapporteur
Mr Alain LEGER .....Examinateur
Mr Pascal GUITTON.....Examinateur
Mr Bernard CLAVERIE .....Directeur de thèse

Université Victor Segalen Bordeaux 2

Année 2010

Thèse n°6278

THÈSE

pour le

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 2

Mention : Sciences Cognitives

Présentée et soutenue publiquement

Le 25 Juin 2010

Par Marie CHARBONNEAU

Né(e) le 16 juillet 1980 à Bourges

Approche méthodologique et comparative des critères de qualité d'image, de perception et d'exploitabilité opérationnelle

Application aux systèmes d'aide à la vision nocturne en aéronautique

Membres du Jury

Mme Catherine SEMAL .....Président

Mme Corinne ROUMES.....Rapporteur

Mr Ron KRUK.....Rapporteur

Mr Alain LEGER .....Examinateur

Mr Pascal GUITTON.....Examinateur

Mr Bernard CLAVERIE .....Directeur de thèse

Résumé

Les méthodes pour évaluer les systèmes de vision nocturne présentent un certain manque de techniques permettant d'évaluer ces dispositifs avec l'humain dans la boucle. Pour mettre en place ce type de méthodologies, les performances des sujets ont été évaluées dans différentes méthodologies, afin de comparer différents types de systèmes de vision nocturne. L'objectif final est d'améliorer la prédictabilité des évaluations de laboratoire réalisées pour mieux préparer les essais en vol.

Une première série d'expérimentation traite de la mise en place de méthodologies sensorielles par l'amélioration de deux méthodes classiques : la mesure de l'acuité visuelle et l'évaluation de la sensibilité au contraste. Les résultats ont permis de discuter du rôle du conflit accommodation/convergence dans les systèmes de type 2, avec les tubes IL déplacés sur le coté. Une différence de sensibilité au contraste entre les systèmes de type 1 et 2 semble se confirmer.

Une seconde série d'expérimentation propose une nouvelle approche méthodologique cognitive avec le développement de deux nouvelles méthodes appelées « simulation » et « stimulation ». Dans la première étude, la détection est influencée par l'expérience des sujets, le niveau de nuit et la fonction de sensibilité au contraste tandis que la prise de décision ne semble être dépendante que de l'expérience et du contraste. Avec des systèmes de vision nocturne fonctionnels, la détection et la prise de décision sont dépendantes du niveau de nuit.

La dernière partie discute des modifications apportées aux méthodes sensorielles existantes ainsi que des nouvelles méthodes cognitives développées. Les apports méthodologiques sont également présentés, ainsi que d'autres approches expérimentales à mettre en place.

En conclusion, les expérimentations menées « avec l'homme dans la boucle » ont permis d'apporter de nouvelles méthodes pour évaluer les dispositifs de vision nocturne. Il apparait aussi que, selon le type d'expérimentation à mener, il est essentiel de bien choisir la population sélectionnée, en termes de critère de performances visuelles, mais aussi d'expérience opérationnelle.

Abstract

Methods to evaluate night-vision devices present an evident lack of technique preventing the testing of these devices with the operators themselves. To set up these methodology types and establish a link between evaluations in laboratory and flight tests, subjects' performances were measured thanks to various methodologies in order to compare different night-vision systems. The final aim is to improve the predictability of laboratory evaluation to better prepare flight tests.

A first series of experiment deals with the implementation of sensory methodologies thanks to the improvement of two classic methods: visual acuity measure and contrast sensitivity evaluation. The results enabled us to discuss the role of accommodation/convergence conflict in the type 2 systems, with tubes IT moved at each side of the head. A difference in contrast sensitivity between type 1 and type 2 systems seems to be confirmed.

A second series of experiment proposes a new cognitive methodological approach with the development of two new methods called "simulation" and "stimulation". In the first study, the detection is influenced by the subject's experience, night level and contrast sensitivity function, whereas decision-making seems only to be dependent on experience and contrast. With functional night-vision systems, detection and decision-making are dependent on night level.

The last part discusses the modifications made to existing sensory methods and to the new developed cognitive methods. The methodological contributions are also presented, as well as other experimental approaches to set up.

In conclusion, the experiments led including humans "in the buckle" brought new methods to evaluate night-vision devices. It appears as well that according to the type of experiment led, it is essential/very important to properly select the chosen population, as regards to the visual performance criteria, but also as regards to the subject's operational experiment.

REMERCIEMENTS

Cette thèse CIFRE s'est déroulée au sein du service Safety Interactions and Human factors (SIH) de la division aéronautique de Thales, en collaboration avec l'Ecole Nationale Supérieure de Cognitique (ENSC), le laboratoire Cognition et Facteurs Humains (EA-487) et le Laboratoire Bordelais de Recherche Informatique (LaBRI).

Je tiens en premier lieu à adresser mes sincères remerciements au Professeur Bernard CLAVERIE, professeur des universités et directeur de l'ENSC, qui a accepté de diriger cette thèse. Ses compétences, son exigence et sa rigueur m'ont permis de progresser tout au long de ces trois ans et demi.

Un simple merci ne me semble pas suffisant pour m'adresser au Docteur Alain LEGER, qui m'a guidé depuis mon stage de deuxième année de master. Au-delà du soutien et de la confiance qu'il a su me témoigner, il m'a guidé dans les méandres de la thèse avec enthousiasme et beaucoup de patience. Je souhaite à tous les futurs thésards de pouvoir bénéficier de tel encadrement ou soutient, qu'il soit scientifique ou humain.

Je tiens à remercier également au Professeur Pascal GUITTON, Professeur à l'université de Bordeaux 1 et responsable de l'équipe IPARLA, pour son accueil chaleureux et amical mais aussi pour avoir su me guider sur des aspects bien méconnus pour ma part.

J'adresse toute ma gratitude au Professeur Catherine SEMAL, Professeur à l'Institut Polytechnique de Bordeaux, de me faire l'honneur de présider mon jury.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Madame la Professeur Agrégé Corinne ROUMES d'avoir accepté d'être rapporteur. Ses propres travaux m'ont été d'une grande aide et ses conseils éclairés m'ont été à plusieurs reprises au cours de ces années d'un grand secours.

Je remercie sincèrement le Docteur Ron KRUK d'avoir accepté de juger mon travail en qualité de rapporteur.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements au Professeurs Pascal GUITTON et au Docteur Alain LEGER d'avoir bien voulu examiner ce document.

Je tiens à remercier l'équipe SIH et Monsieur Denis BONNET de m'avoir accueilli, de m'avoir accompagné et aider à gérer les aléas financiers et techniques. Un merci tout particulier à Elisa, mon amie, toujours là pour le travail, les bons conseils mais aussi les moments de folie.

Je ne peux pas oublier ceux sans qui cette thèse n'aurait jamais abouti, c'est-à-dire les ingénieurs et les techniciens qui ont participé à tout ce projet, en particulier Frédéric SAVIOT et Philippe AUGEREAU qui ont su faire preuve de patience face à mon manque de compétences techniques. Mais je n'oublie pas l'ensemble des équipes qui m'ont aidé à travers les services de production, d'optique et d'informatique. Merci à Julien, Laurent pour vos sourires et vos encouragements.
Un merci tout particulier à Mickael MELAS et Thi Ngoc Hanh NGUYEN. Sans votre travail, cette thèse n'aurait pu exister et pour cela, ces lignes ne sont pas assez.

Je tiens à remercier le Professeur Bernard N'KAOUA, ainsi que tous les chercheurs et les étudiants, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire CFH. Un merci très spécial à Sabine, pour tous nos échanges sur nos expérimentations, pour ton soutien et ta bonne humeur quotidienne.
Je remercie sincèrement toute l'équipe de l'ENSC, leur équipe pédagogique, les chercheurs, les personnels administratifs pour leur accueil et leur aide au cours de mon périple doctoral.

Je remercie sincèrement tous les sujets ayant pris part aux fastidieuses expériences présentées dans ce travail. Je remercie tout particulièrement l'EA-ALAT d'avoir participé à la réalisation de ce travail. Un merci tout particulier à Marc et Teddy, qui se reconnaitront.

Et puis, comment ne pas remercier mes amis, dont certains ont déjà été cités. Pour la plupart, la thèse est une expérience inconnue mais votre présence et vos encouragements ont toujours été agréables. Il n'y a pas d'ordre de préférence alors, pour tout cela, je tiens à remercier ma Titine, Stef, Christelle, Yannick, Jérémy, ma binôme, Emma, Purdey et tous les autres.
Je ne peux bien sûr pas oublier ma famille. A toi Maman, sans qui je ne serais pas là aujourd'hui, car c'est toi qui m'as faite. A ma sœur et son époux pour tous leurs conseils et surtout toi, ma sœur, pour ton inconditionnel soutien. A Franck et Jean-Malo, presque comme des grands frères que je n'ai jamais eus, et à leurs épouses, je souhaite dire merci.
A toi, Aurélien, mon compagnon, je te dois de n'avoir rien dit pour les soirées et les weekends à travailler. Merci de m'avoir encouragé pendant des années à continuer et d'être prêt à poursuivre le chemin.
Enfin, je dédie ce travail à mon père, parti beaucoup trop tôt, et à Olivier, Louis, Michelle, Daniel, Anne-Marie,… Ces mots seraient les siens : « *Lève les yeux et regarde-moi, J'ai peut-être jamais été si proche de toi* ».

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS **7**

LISTE DES ILLUSTRATIONS 19

LISTE DES TABLEAUX 23

GLOSSAIRE 1

INTRODUCTION **1**

PARTIE 1 : ASPECTS THEORIQUES **1**

- CHAPITRE 1 - 2

LES SYSTEMES DE VISION NOCTURNE 2

1. Architecture optique d'un DVN *2*

2. L'intensification de lumière *3*

2.1. Rappels sur les sources de lumière 3

2.2. Les tubes intensificateurs de lumière (tubes IL) 4

2.3. Fonction de Transfert de Modulation et résolution spatiale 7

2.4. Marquage des tubes 10

3. Différents types de DVN *11*

3.1. Systèmes de type 1 12

3.2. Systèmes de type 2 12

- CHAPITRE 2 - 14

PERCEPTION VISUELLE 14

1. Quelques bases de physiologie visuelle *15*

1.1. La structure de l'œil humain 15

1.2. Le système visuel récepteur 16

1.3. L'accommodation 23

1.4. Le système oculomoteur 24

1.5. Les anomalies du système visuel 25

1.6. Conclusion 28

2. Traitement sensoriel en conditions normale et dégradée *29*

2.1. Vision des couleurs 29

2.2. La sensibilité à la lumière 33

2.3. Le champ visuel 34

2.4. L'acuité visuelle 36

2.5. Contraste de luminance et sensibilité au contraste 38
2.6. Conclusion sur le traitement sensoriel 41
3. Traitement cognitif en conditions normale et dégradée 43
3.1. La perception et la reconnaissance des objets 43
3.2. La perception de la profondeur et des distances 51
3.3. L'estimation de la pente 61
3.4. Tâches de perception visuelle 63
3.5. Mémoire et représentation 65
3.6. Le traitement cognitif de la perception visuelle 69
3.7. Prise de décision 70
3.8. Novices et experts 73
3.9. Conclusion sur le traitement cognitif 76
- CHAPITRE 3 - 78
ANALYSE DE L'EXISTANT SUR LES METHODOLOGIES 78
1. Variables fondamentales du stimulus lumineux 79
1.1. Domaine radiométrique 79
1.2. Domaine photométrique 79
2. Evaluation en laboratoire 81
2.1. Les tests optiques 81
2.2. Les tests sensoriels 83
2.3. Les tests cognitifs 85
2.4. Conclusions 86
3. Evaluations en vol 87
4. Conclusion pour les évaluations opérationnelles en laboratoire 87
PARTIE 2: METHODOLOGIE PHYSIQUE 89
1. Présentation des mesures physiques recommandées 90
2. Réalisation des mesures recommandées 91
2.1. Champ de vision 93
2.2. Défauts des tubes 94
2.3. Gain de luminance 95
2.4. Disparités binoculaires 99
2.5. Fonction de Transfert de Modulation (FTM) 102
2.6. Résolution 103

3. Conclusion *105*

PARTIE 3: METHODOLOGIES SENSORIELLES 107

- CHAPITRE 1 - 110

MESURES D'ACUITE VISUELLE 110

1. Etudes sur l'hyperstéréoscopie *112*

2. Méthodes *114*

2.1. Matériel 114

2.2. Stimuli 115

2.3. Niveaux de luminance 116

2.4. Protocoles expérimentaux 116

3. Résultats *119*

3.1. Expérimentation 1 119

3.2. Expérimentation 2 123

4. Discussion *124*

4.1. Conflit accommodation/ vergence 124

4.2. Impact du réglage du focus fixe de l'oculaire 126

4.3. Autres résultats 127

5. Conclusion *128*

- CHAPITRE 2 - 129

MESURES DE SENSIBILITE AUX CONTRASTES 129

1. Matériels et méthodes : aspects communs *130*

1.1. Système d'affichage 130

1.2. Stimuli utilisés 130

1.3. Dispositifs de vision nocturne (DVN) 131

1.4. Analyse 132

2. Matériels et méthodes : aspects spécifiques *132*

2.1. Expérimentation 1 132

2.2. Expérimentation 2 134

3. Résultats : Etude 1 ..... *137*

4. Résultats : Expérimentation 2 ..... *139*

5. Discussion *140*

5.1. Méthodologie 140

5.2. Expérimentations 141

6. Conclusion - Perspectives *145*
- CHAPITRE 3 - 146
CONCLUSION SUR LES METHODOLOGIES SENSORIELLES 146
PARTIE 4 : METHODOLOGIES COGNITIVES 147
- CHAPITRE 1 - 150
RECUEIL DE L'EXPERTISE DE PILOTES D'HELICOPTERES UTILISANT DES DISPOSITIFS DE VISION NOCTURNE (DVN) 150
1. Rappels théoriques *150*
1.1. Recueil d'expertise 150
1.2. Techniques employées pour le recueil d'expertise 151
1.3. Analyse de l'activité et des tâches 155
2. Approche choisie pour le recueil de l'expertise *162*
2.1. Choix de l'expert 162
2.2. Conduite de l'entretien 162
2.3. Approche choisie 165
3. Conduite du recueil d'expertise *165*
4. Résultats des entretiens *166*
4.1. Retour d'expertise 167
4.2. Organisation de l'expertise 173
- CHAPITRE 2 - 180
SIMULATION DE VOL EN VISION NOCTURNE 180
1. Définition des scenarii et des tâches *180*
1.1. Lien avec la fonction Détection, Reconnaissance et Identification 180
1.2. Scénario 1 : détection d'une bosse 181
1.3. Scénario 2 : saut de haie 181
1.4. Scénario 3 : tâche de discrimination entre une voiture et une maison 182
1.5. Scénario 4 : atterrissage sur une aire de posé 182
1.6. Scénario 5 : recherche de trajectoire au milieu d'un environnement montagneux 183
1.7. Scénario 6 : détection de poteaux électriques formation en serpent 183
1.8. Scénario 7 : perte de sécurité 183
2. Application logicielle *183*
2.1. Général 183

2.2. Filtres 184
2.3. Récupération des données 186
2.4. Interface 188
2.5. Environnement 3D 190
2.6. Temps réel 191
2.7. Bilan de la prestation 192
3. Mise en place d'une approche simplifiée 192
3.1. Définition des scénarii et des tâches 192
3.2. Application simulation de vision nocturne 194
4. Fonctionnement de l'application 198
4.1. Principe 198
4.2. Schéma de fonctionnement 198
4.3. Fonctionnement de l'interface expérimentateur GUI 200
5. Filtres utilisés pour l'expérimentation de simulation 200
5.1. Filtre « vert » (filtre IL) 200
5.2. Filtre passe-bas : BlurMask 201
5.3. Filtre « contraste » 203
6. Scénarii implémentés et testés pour les expérimentations 204
6.1. Motopompe 204
6.2. Zone montagneuse 205
6.3. Interface 205
7. Système d'affichage 209
7.1. Choix du système de projection 209
7.2. Equivalence en niveaux de nuit 212
8. Conclusion 215
- CHAPITRE 3 - 216
ETUDE EXPERIMENTALE 216
1. Aspects communs aux deux expérimentations 217
1.1. Participants 217
1.2. Matériel 218
1.3. Procédure 218
1.4. Données recueillies 219
2. Expérimentation en « Simulation » 220
2.1. Aspects méthodologiques spécifiques 220

2.2. Résultats 221
3. Stimulation *239*
3.1. Aspects méthodologiques spécifiques 239
3.2. Résultats 241
4. Discussion *254*
4.1. Méthodologie : application et scénarii 254
4.2. Simulation 256
4.3. Stimulation 260
5. Conclusion sur les méthodologies cognitives *263*

DISCUSSION GENERALE 265

1. Introduction *266*
2. Synthèse de l'approche expérimentale *267*
2.1. Objet de la recherche 267
2.2. Méthodologies sensorielles 267
2.3. Méthodologies cognitives 269
3. Apports sur les méthodologies d'évaluation des DVN *272*
4. Perspectives et conclusion *274*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 277

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : structure simplifiée d'un dispositif de vision nocturne 3
Figure 2 : réflexion de la lumière 4
Figure 3 : réponses spectrales de 2 photocathodes 5
Figure 4 : principe de l'amplification dans un canal de la galette 5
Figure 5 : divers exemples de matrices de microcanaux 6
Figure 6 : schéma de principe de l'écran de phosphore 6
Figure 7 : fonction de transfert de modulation 7
Figure 8 : limite de résolution spatiale d'un système optique 8
Figure 9: concept de MTFA 8
Figure 10 : exemple de tubes intensificateurs de lumière 9
Figure 11 : exemple de marquage des tubes IL avec un groupe de mire USAF 1951 10
Figure 12 : les deux types de dispositifs de vision nocturne 12
Figure 13 : anatomie simplifiée de l'œil humain 15
Figure 14 : coupe de rétine humaine faite à mi-distance de la fovéa et la périphérie 17
Figure 15 : enregistrements de l'activité d'une cellule ganglionnaire 18
Figure 16 : répartition des photorécepteurs au sein de la rétine 19
Figure 17 : courbes fondamentales de réponses à l'œil humain selon la longueur d'onde 20
Figure 18 : courbes d'efficacité lumineuse relative 21
Figure 19 : accroissement de la sensibilité de l'œil dans l'obscurité 22
Figure 20 : exemple d'un cas de myopie sans correction 26
Figure 21 : exemple d'un cas d'hypermétropie 26
Figure 22 : exemple d'un cas d'astigmatisme 27
Figure 23 : sensibilité aux longueurs d'onde en vision photopique et scotopique 30
Figure 24 : spectre de transmission de divers phosphores 32
Figure 25 : comparaison d'une scène en vision normale et vue sous DVN 32
Figure 26 : réflectivité de la végétation (exemple de végétation australienne) 33
Figure 27 : division du champ visuel dans un plan horizontal 34
Figure 28 : contenu fréquentiel d'une image complexe 37
Figure 29 : contraste simultané 39
Figure 30 : sensibilité aux contrastes en fonction de l'acuité visuelle 41
Figure 31: schéma de principe de la perception visuelle des objets 44
Figure 32 : influences objectives sur la sélection figure-fond 46

Table des illustrations

Figure 33 : effets de l'expérience antérieure 47
Figure 34 : relation physiologique entre accommodation et convergence 52
Figure 35 : dissociation accommodation/ convergence dans un VDC 54
Figure 36 : exemple de disparités binoculaires 57
Figure 37 : mesures des disparités binoculaires avec des DVN 59
Figure 38 : effet de la stéréoscopie sur la perception de la pente 63
Figure 39 : description du modèle d'Atkinson et Schiffrin (1968) 65
Figure 40 : mémoire de travail dans le modèle de Baddeley et Hitch 66
Figure 41 : modèle du traitement des informations visuelles de Rensink (2000) 68
Figure 42 : estimation de la double distance et de la double hauteur 86
Figure 43 : dispositif de test du champ de vision pour un DVN à intensification de lumière . 93
Figure 44: Exemple de tracé de signal enregistré pour la mesure du champ de vision 94
Figure 45 : dispositif expérimental pour mesure le gain de luminance 96
Figure 46 : luminance de sortie en fonction de la luminance d'entrée 98
Figure 47: gain de luminance en fonction de la luminance d'entrée 98
Figure 48: dispositif expérimental pour la mesure de disparités binoculaires 100
Figure 49: données issues de la procédure de mesures géométriques 101
Figure 50: courbe typique de la fonction de transfert de modulation (FTM) 102
Figure 51: mire de résolution USAF 1951 103
Figure 52: schéma explicatif des mécanismes de la convergence 111
Figure 53: téléstéréoscope utilisé pour les deux expériences 115
Figure 54: exemple de mires utilisées pour l'expérience 1 115
Figure 55 : performances d'acuité visuelle à haute luminance (nuit 1). 120
Figure 56 : performances d'acuité visuelle à basse luminance (nuit 3) 122
Figure 57 : acuité visuelle en fonction (a) du contraste, (b) de la distance physique, (c) de l'écartement et (d) du niveau de nuit. 123
Figure 58 : variations moyennes de sensibilité au contraste en fonction du niveau de nuit .. 138
Figure 59 : mesures moyennes d'acuité visuelle limite obtenue avec un contraste de 100% 138
Figure 60: variations moyennes de sensibilité au contraste en fonction du niveau de nuit ... 139
Figure 61: estimation de la double distance 148
Figure 62 : les 7 étapes d'une action (Norman et Hollnagen, 1986). 159
Figure 63 : l'échelle double de Rasmussen 161
Figure 64 : diagramme HTA de haut niveau 175

Table des illustrations

Figure 65 : diagramme HTA de la tâche N.2.2 « suite de tenue d'allures » (vol) 175
Figure 66 : diagramme HTA de la tâche N.2.3 "se poser" 176
Figure 67 : besoins en informations sur l'échelle de décision pour la tâche "se poser" 178
Figure 68 : liste des prestations demandées dans le cahier des charges de l'application 184
Figure 69 : classification des niveaux de nuit 184
Figure 70 : principe de fonctionnement de l'application 198
Figure 71: schéma de fonctionnement de l'application. 199
Figure 72: comparaison entre le vert simulé (à gauche) et le vert d'un DVN (à droite). 201
Figure 73 : effet des réglages du filtre passe bas sur la même scène. 202
Figure 74: filtre contraste. 204
Figure 75: illustration du problème de la taille de la motopompe 204
Figure 76: exemple de scènes issues du scénario montagne 205
Figure 77 : interface expérimentateur 206
Figure 78: sélectionneur de sujets 206
Figure 79: zone d'informations sur le sujet à remplir 207
Figure 80: zone d'affichage des pré-sets réalisés 207
Figure 81: sélectionneur de pré-sets 208
Figure 82: zone de paramétrage des filtres 208
Figure 83: type d'évaluation 209
Figure 84: spectre de sensibilité de deux vidéoprojecteurs entre 380 et 1100 nm. 210
Figure 85: spectre de luminance du Benq W400 entre 380 et 900 nm. 211
Figure 86: mesures de contraste effectuées sur le vidéoprojecteur Benq w4000 211
Figure 87: calculs des niveaux de nuit équivalents pour le vidéoprojecteur Benq w4000 212
Figure 88: support fabriqué pour les polariseurs placé devant le vidéoprojecteur 213
Figure 89: figure utilisée pour les mesures de luminance 213
Figure 90: mesures en 9 points effectués pour calibrer les polariseurs et les niveaux de nuit 214

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: tableau récapitulatif des unités radiométriques et photométriques 80
Tableau 2 : tests optiques 82
Tableau 3 : tests sensoriels 83
Tableau 4 : optotypes utilisables pour les mesures de tests sensoriels 83
Tableau 5 : table d'équivalence entre les différentes notations de l'acuité visuelle 84
Tableau 6 : tests cognitifs 86
Tableau 7: liste des tests prioritaires recommandés par le groupe de travail de l'OTAN 91
Tableau 8 : récapitulatif des mesures à effectuer et des modes de réalisation 91
Tableau 9: critère de mesures des défauts des tubes 94
Tableau 10: exemples de données de gain de luminance 97
Tableau 11: conversion de la mire de résolution USAF 1951 en unités de résolution 104
Tableau 12: niveaux de luminance pour les deux expérimentations 116
Tableau 13: récapitulatif des variables et des valeurs de chaque variable testées 117
Tableau 14: récapitulatif des variables et des valeurs de chaque variable testées 119
Tableau 15 : acuité visuelle en nuit 1 ($1{,}46^{E}$-2 d/m²) 120
Tableau 16 : acuité visuelle en nuit 3 ($1{,}03^{E}$-3 d/m²) 122
Tableau 17 : acuité visuelle en nuit 1 et 3 123
Tableau 18 : valeurs de luminances en sortie des DVN 133
Tableau 19 : acuité visuelle des sujets 133
Tableau 20 : valeurs de résolution spatiale testées pour chaque niveau de nuit 134
Tableau 21 : différence de luminance de sortie calculée pour les deux DVN testés 135
Tableau 22 : acuité visuelle des sujets 136
Tableau 23 : Résolutions spatiales testées pour chaque niveau de nuit 136
Tableau 24 : valeurs de seuil de sensibilité au contraste (étude 1) 137
Tableau 25 : valeurs de seuil de sensibilité au contraste (étude 2) 139
Tableau 26 : indicateurs essentiels des approches directives et non directives 152
Tableau 27 : classification des interventions dans la relance 155
Tableau 28 : grille de recueil d'activité et guide d'entretien 164
Tableau 29 : expérience des pilotes interrogés pour les entretiens 165
Tableau 30 : expérience du pilote interrogé pour l'entretien complémentaire 166
Tableau 31 : tableau des scénarii incluant les dénominations et les variations proposées 186
Tableau 32: interface d'entrée 189

Tableau 33 : interface de sortie ou de restitution (indices de mesures) 190
Tableau 34 : caractéristiques du groupe de novices 217
Tableau 35 : caractéristiques du groupe d'experts 218
Tableau 36 : résumé des configurations testées pour le scénario motopompe 221
Tableau 37 : synthèse des huit configurations testées pour le scénario montagne 221
Tableau 38 : pourcentage de détection pour le scénario motopompe (SIM) 222
Tableau 39 : temps de détection pour le scénario motopompe (SIM) 223
Tableau 40 : pourcentage de détection correcte et erronée, pour le scénario motopompe (SIM) 224
Tableau 41 : temps de détection correcte et erronée de la motopompe (SIM) 225
Tableau 42 : pourcentage de réponses pour le scénario montagne (SIM) 229
Tableau 43 : temps d'identification de la vallée (SIM) 230
Tableau 44 : temps de prise de décision pour s'engager dans la vallée (SIM) 231
Tableau 45 : pourcentage de réponses correctes et erronées, pour le scénario montagne (SIM) 233
Tableau 46 : temps d'identification et de prise de décision, correctes et erronées, pour le scénario montagne (SIM) 235
Tableau 47 : résumé des corrélations entre les variables, pour le scénario montagne (SIM) 239
Tableau 48 : mesures d'acuité visuelle limite (STIM) 242
Tableau 49 : pourcentage de réponse pour le scénario motopompe (STIM) 243
Tableau 50 : temps de détection pour le scénario motopompe (STIM) 243
Tableau 51 : pourcentage de réponses correctes et erronées, pour le scénario motopompe (STIM) 244
Tableau 52 : temps de détection correcte et erronée, pour le scénario motopompe (STIM) . 245
Tableau 53 : résumé des corrélations entre les variables, pour le scénario motopompe (STIM) 246
Tableau 54 : pourcentage de réponse des sujets, pour le scénario montagne (STIM) 246
Tableau 55 : temps d'identification de la vallée et de son orientation (STIM) 247
Tableau 56 : temps de prise de décision, pour le scénario montagne (STIM) 248
Tableau 57 : pourcentage de réponses correctes et erronées, pour le scénario montagne (STIM) 249
Tableau 58 : temps d'identification correcte et erronée de la vallée et de son orientation (STIM) 250

Tableau 59 : temps de prise de décision correcte et erronée, pour le scénario montagne (STIM)..... 251
Tableau 60 : résumé des corrélations entre les variables, pour le scénario montagne (STIM) 254

GLOSSAIRE

AsGA : Arseniure de Gallium

ANVIS : Aviator's Night Vision Imaging System

AV : Acuité Visuelle

BFS : Basses Fréquences Spatiales

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

CCD : Charged Coupled Device

CIE : Commission Internationale de l'Eclairage

CN : Corps noir

CRT : Cathodic Ray Tube

CTA : Cognitive Task Analysis

CTM: Collimateurs Têtes Moyennes

DLP : Digital Light Processing

DRI : Détection-Reconnaissance-Identification

DVN : Dispositif de vision nocturne

EA-ALAT : Ecole d'Application de l'Aviation Légère de l'Armée de Terre

EDP : Enhanced Dot Ptich

ENSC : Ecole Nationale Supérieure de Cognitique

FH: Facteurs Humains

FLIR : Forward Looking InfraRed

FOV : Field Of View

FrACT : Freiburg Visual Acuity and Contrast Test

FTM : Fonction de Transfert de Modulation

HFS: Hautes frequencies spatiales

HD: Haute Définition

HT: Haute tension

HTA - Hierarchical Task Analysis

IdC: Institut de Cognitique (devenu ENSC)

IHADSS : Integrated Helmet And Display Sight System

IHM : Interface Homme-Machine

IL : Intensification/intensificateurs de lumière

IPD : InterPupillary Distance ou Distance interpupillaire (en français)

JVN : Jumelles de Vision Nocturne

KMADe : Kernel of Model for Activity Description environment

LaBRI : Laboratoire Bordelais Recherche Informatique

LCOS : Liquid Crystal On Silicon

MCT : Mémoire à Court Terme

MFS : Moyennes fréquences spatiales

MLT : Mémoire à Long Terme

N-MDA : Noyau du Modèle de Description de l'Activité

MFTA : Modulation Function Tranfert Area

NVIS : Night Vision Imaging System

PEST : Parameter Estimation by Sequential Testing

USAF: United States Air Forces

OMB : Orienteur marqueur baliseur

RGB : Red, Green, Blue

RBNC : Radiologique Nucléaire Bactériologique Chimique

RPAP : Reconnaissance pratique d'une aire de poser

THAV : Thales Avionique – Le Haillan

UB2 : Université de Bordeaux 2

VDC : Visuels De Casque

INTRODUCTION

« L’expérience est le nom que chacun donne à ses erreurs »

Oscar Wilde

Dans de nombreuses situations de travail, les opérateurs sont amenés à employer des systèmes d'aides et de suppléance, en particulier dans l'aéronautique. Ces systèmes peuvent être optiques, tels que des jumelles, des collimateurs, ou optroniques, comme par exemple des systèmes de vision nocturne, des viseurs de casque.

Dans le domaine militaire, différentes technologies ont été mises au point pour palier la différence de sensibilité à la lumière et le fait que l'œil n'est sensible qu'à un domaine de longueur d'onde pendant les phases nocturnes. Il existe des capteurs spécifiques tels que l'imagerie infrarouge et thermique, le radar, la télémétrie ou les intensificateurs de lumière. Les systèmes de vision nocturne, utilisant l'intensification de lumière, posent de réelles questions quant aux capacités perceptives humaines. Ils permettent d'accéder à des propriétés intrinsèques des objets de l'environnement, habituellement non perceptibles par notre système visuel : ces systèmes permettent de visualiser dans le domaine de longueur d'onde proche de l'infrarouge.

Maîtriser les conditions dans lesquelles ces systèmes sont évalués avec fiabilité requiert que les méthodologies permettant d'évaluer les performances des systèmes et des opérateurs soient plus développées.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail. L'idée directrice est de proposer des méthodes d'évaluation des systèmes de vision nocturne pour les pilotes d'hélicoptères, plus particulièrement au regard de la qualité d'image et de l'impact sur le traitement sensoriel et cognitif résultant.

Il est nécessaire pour cela de réaliser une revue de la littérature de la perception visuelle ce qui permet de proposer des axes de recherche pour les méthodologies à mettre en place.

Un recensement des méthodes et tests existants pour évaluer les systèmes de vision nocturne est également essentiel afin d'établir un lien entre les études réalisées en laboratoire et les essais en vol.

Cette analyse met en évidence que les méthodes physiques sont relativement bien développées et bien standardisées. Il n'y a donc pas beaucoup d'amélioration à apporter sur ce versant et cela ne concerne pas totalement notre domaine d'intervention. Mais, elles sont essentielles à la compréhension de l'ensemble de la chaîne de l'évaluation de ces dispositifs. En ce qui concerne les méthodologies sensorielles, c'est-à-dire à partir du moment où l'homme entre dans la boucle, les tests existants sont peu nombreux mais sont un peu standardisés. Ce n'est pas tout à fait le domaine d'intervention essentiel pour la problématique qui nous intéresse mais il semble que des pistes d'améliorations sont envisageables,

notamment pour mettre ces méthodes en pratique avec des systèmes de type hyperstéréoscopiques. Les méthodes cognitives sont les moins développées et sont peu ou pas standardisées. Il apparait certain que dans ce domaine, il y a une véritable approche méthodologique innovante à mettre en place afin d'établir un lien entre les performances mesurées lors des essais en vol et les caractéristiques physiques des systèmes.

Nous aborderons dans un premier temps une mise au point de la question traitée, des systèmes de vision nocturne aux méthodologies existantes pour évaluer ces dispositifs en passant par une brève revue de littérature sur la perception visuelle. Ensuite, nous traiterons dans différentes parties les méthodologies physiques, mais essentiellement sensorielles et cognitives, au travers de différentes expérimentations. Les réponses et les solutions apportées par ces différentes méthodes seront alors discutées dans une dernière partie.

PARTIE 1 : ASPECTS THEORIQUES

« Savoir est le début de la pratique ; faire est l'aboutissement du savoir »

Wang Yang Ming

- CHAPITRE 1 -

LES SYSTEMES DE VISION NOCTURNE

L'intérêt d'exploiter, lors des opérations militaires, en particulier dans les opérations continues (c'est-à-dire les opérations de jour et de nuit), le fait de « voir sans être vu », ou du moins le plus tard possible, est reconnu de longue date. Avec des systèmes de visionique[1] modernes, la capacité de combattre aussi bien de nuit que de jour est devenue une réalité technologique. Ces systèmes peuvent être définis comme des équipements qui fournissent à l'opérateur humain une image de l'environnement extérieur dans des conditions où la vision naturelle a besoin d'être aidée ou augmentée. Ces images peuvent provenir de différents types de capteurs (intensificateurs de lumière, capteurs infrarouges, etc.) et être augmentées par l'ajout d'informations symboliques. Aujourd'hui, ces systèmes de visionique sont largement utilisés pour augmenter la perception visuelle des pilotes, leur permettant ainsi de mettre en œuvre une réelle capacité à mener des opérations nocturnes. Parmi les différents systèmes existants, les dispositifs de vision nocturne (DVN) utilisant des intensificateurs de lumière sont une aide précieuse pour les pilotes d'avions ou d'hélicoptères lors des vols de nuit. Ces systèmes permettent d'améliorer les performances cognitives des utilisateurs.

Dans cette partie, nous allons, dans un premier temps, expliquer le principe de l'intensification de lumière et des tubes intensificateurs, intégrés dans les DVN. Dans un second temps, nous présenterons les différents types de DVN qui existent selon leurs architectures spécifiques.

1. Architecture optique d'un DVN

La figure 1 présente le principe général de l'architecture optique d'un DVN (Berkley, 1992). Elle se compose de :

- deux lentilles, appelées objectifs, qui concentrent la lumière entrante sur un tube intensificateur de lumière ;
- deux tubes intensificateurs de lumière, dont le principe est décrit dans le paragraphe suivant ;

[1] Visionique : technique de réalisation et de mise en œuvre des systèmes d'aide à la vision.

- deux lentilles, appelées oculaires, qui projettent l'image à l'infini optique et focalise celle-ci sur les yeux de l'utilisateur[2] ;
- un générateur électrique.

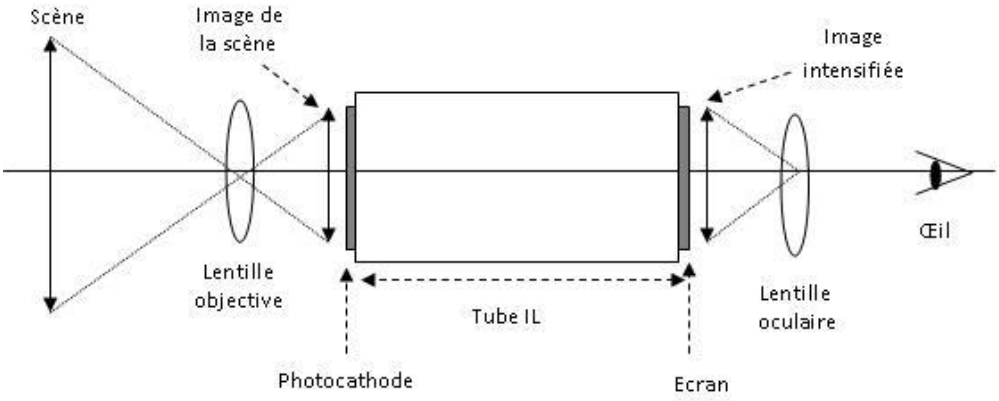


Figure 1 : structure simplifiée d'un dispositif de vision nocturne

2. L'intensification de lumière

2.1. Rappels sur les sources de lumière

Le rôle principal d'un intensificateur de lumière est d'amplifier les lumières ambiantes réparties selon deux ordres :

- les sources primaires ;
- les sources secondaires.

Les sources primaires de lumière sont les éléments qui produisent la lumière. Il en existe 2 catégories :

- les sources naturelles (exemples: le soleil, les étoiles, ...) ;
- les sources artificielles (exemples: écrans de télévision, lampes, ...).

Les sources secondaires sont tous les objets qui nous entourent et qui sont invisibles lorsque rien ne les éclaire. Lorsque ces objets sont éclairés, ils renvoient une partie de la lumière qu'ils reçoivent, ils n'en émettent aucune. La réflexion de la lumière sur les sources secondaires (figure 2) est :

- soit spéculaire : le faisceau est réfléchi dans une seule direction (ex: miroir) ;
- soit diffuse : la surface de réflexion étant irrégulière, le faisceau est réfléchi dans toutes les directions (exemple : la lune qui réfléchit la lumière du soleil).

[2] Il existe une alternative, avec une voie optique indirecte, telle que l'image est vue au travers d'un « combineur ».

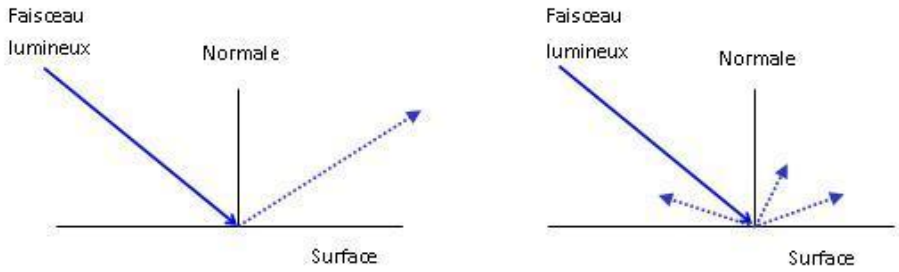


Figure 2 : réflexion de la lumière

A gauche : réflexion spéculaire. A droite : réflexion diffuse.

Avec les DVN, ce sont les lumières des sources primaires et secondaires qui sont amplifiées (que ces sources soient spéculaires ou diffuses), grâce aux tubes intensificateurs de lumière (IL) qui jouent ce rôle d'amplificateur.

2.2. Les tubes intensificateurs de lumière (tubes IL) [3]

2.2.1. L'intensification de lumière

Il s'agit d'une amplification photovoltaïque : les photons sont transformés en électrons, multipliés à l'aide d'une galette de microcanaux et retransformés en photons par projection sur un écran de phosphore. Les photons, entrant au travers des objectifs, sont focalisés sur un matériel photosensible, appelé photocathode. Celle-ci convertit les photons en électrons, proportionnellement à la quantité de photons entrants. Pour les dernières générations de tubes, il y a émission de 2 électrons pour 5 photons reçus. Pour les générations plus anciennes, le rapport est de 2 pour 15 (Soulie, 2005). La principale caractéristique de la photocathode est la sensibilité radiante, qui correspond à la sensibilité de la photocathode pour chaque longueur d'onde où la photocathode a une réponse. Elle est exprimée en milliampères par watt (mA/W). Le graphe de cette sensibilité en fonction de la longueur d'onde est appelée la réponse spectrale de la photocathode (figure 3) et recouvre le domaine de longueur d'onde entre 400 et 900 nanomètres (nm). Les tubes d'ancienne génération sont sensibles à la lumière entre 400 et 900 nm. Les tubes de nouvelle génération sont plus sensibles entre 600 et 900 nm et ils sont 4 à 5 fois plus sensibles aux basses illuminations (Task, 1992).

[3] Dans la suite du document, nous parlerons de tubes IL pour les tubes intensificateurs de lumière et IL pour l'intensification de lumière.

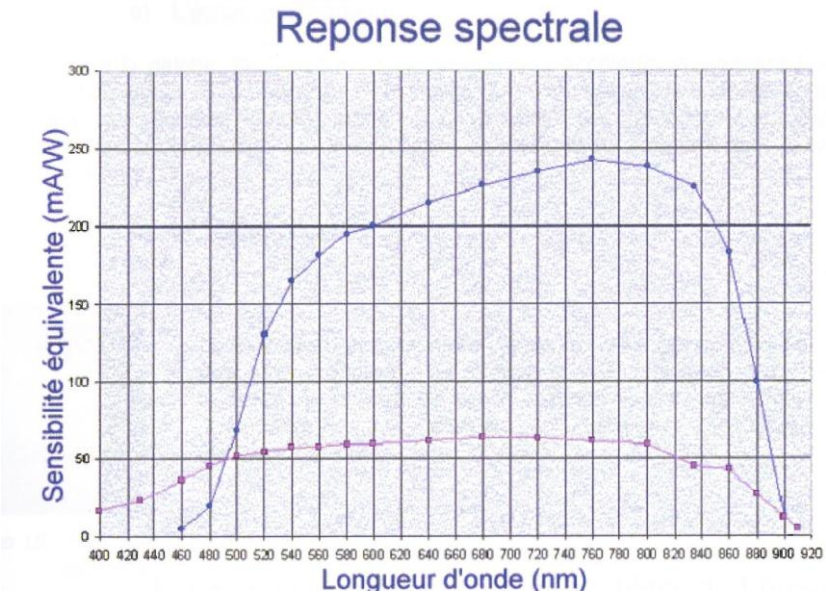


Figure 3 : réponses spectrales de 2 photocathodes

La courbe violette est la réponse d'une photocathode de 2e génération et la courbe bleue celle d'une photocathode de 3e génération (d'après Soulie, 2005)

Ensuite, ces électrons émis sont accélérés et multipliés entre 500 et 1000 fois dans les microcanaux de la galette. La galette permet l'amplification des électrons qui traversent plusieurs millions de microcanaux dont l'angle est légèrement incliné (Midavaine, 2004) (figure 4).

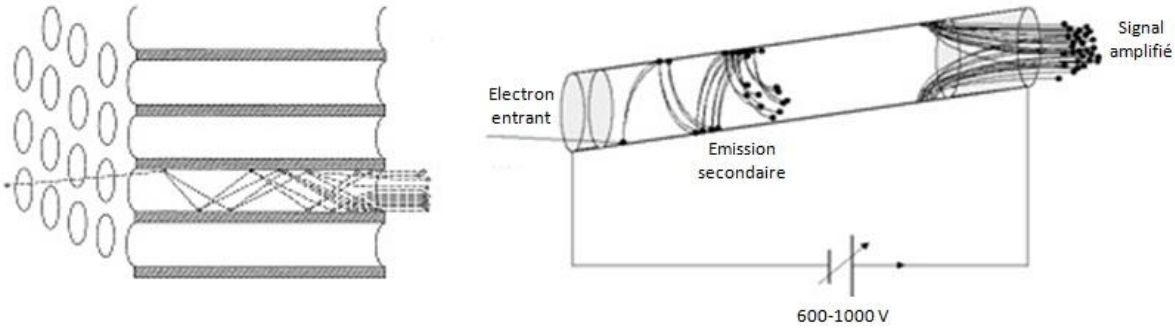


Figure 4 : principe de l'amplification dans un canal de la galette

A gauche: principe de l'amplification dans un seul canal ; A droite: schéma montrant comment un électron entrant permet d'avoir un nombre démultiplié à la sortie d'un seul canal (d'après Midavaine, 2004)

Un courant électrique circule dans les parois des canaux. Lorsqu'un électron entre, il percute la paroi d'un canal et arrache plusieurs électrons. Chaque électron arraché est accéléré par le champ appliqué sur la galette. Il percute la paroi du canal, arrache des électrons supplémentaires qui percutent à nouveau la paroi, et ainsi de suite jusqu'à la sortie. Pour les

tubes IL de dernière génération, la galette de microcanaux possède un film pour empêcher les ions positifs de venir frapper la photocathode, plus fragile, et éviter que celle-ci soit endommagée par le bombardement ionique.

L'épaisseur de la galette est d'environ 0,5 millimètres (mm). Les premières galettes étaient composées de canaux de 12 micromètres (µm) de diamètre, à raison de 1,3 millions de microcanaux par galette. Actuellement, les galettes atteignent 5 à 6 millions de microcanaux de 6 µm de diamètre (Midavaine, 2004) (figure 5).

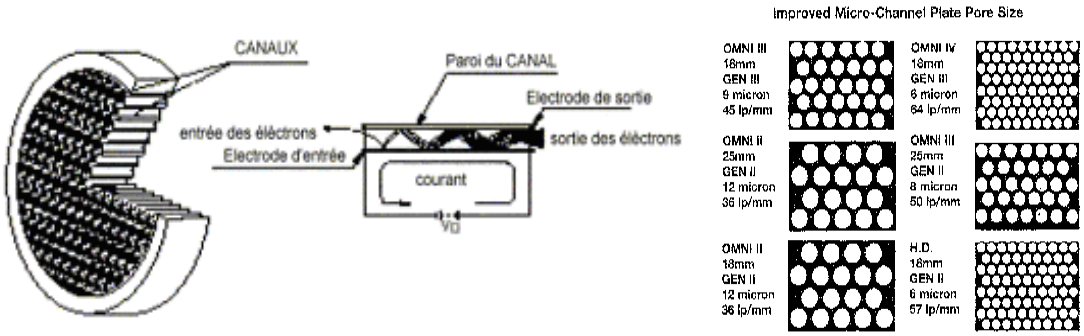


Figure 5 : divers exemples de matrices de microcanaux (Midavaine, 2004)

Les électrons sortant de la galette percutent un écran de luminophores (figure 6), constitué d'un dépôt de phosphore 43. Ils sont alors convertis en photons et la lumière produite émet à une longueur d'onde comprise entre 542 et 545 nm (Rash et Becher, 1982). L'image intensifiée est vue au travers de l'oculaire. Un faisceau de fibres optiques torsadées permet l'inversion de l'image à 180° entre l'entrée et la sortie. Cette rotation permet de compenser l'inversion d'image due à l'objectif.

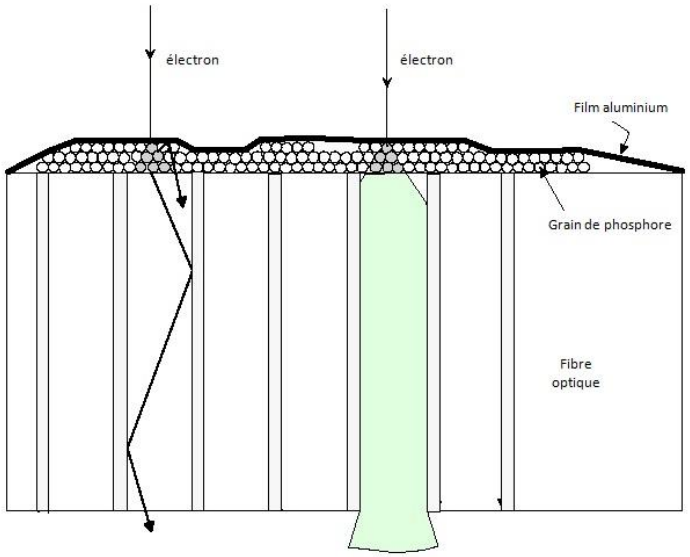


Figure 6 : schéma de principe de l'écran de phosphore (d'après Midavaine 2004)

Les éléments ayant un impact sur la qualité du DVN sont :

- le diamètre des canaux ;
- le nombre de microcanaux ;
- les fibres optiques de sortie.

La qualité d'un système (dans notre cas, un DVN) est exprimée par la Fonction de Transfert de Modulation (FTM).

2.3. Fonction de Transfert de Modulation et résolution spatiale

La Fonction de Transfert de Modulation (FTM) traduit la capacité d'un système à transférer les informations d'entrée en conservant la meilleure qualité possible. La mesure de la FTM permet d'évaluer les qualités optiques d'un système. Elle peut être évaluée par mesure de la réponse du système à une mire sinusoïdale, d'amplitude constante et de fréquence spatiale variable, normalisée à 1 pour la fréquence nulle. Dans tous les cas, la mesure de FTM est répétée pour des fréquences spatiales de plus en plus réduites mais toujours constantes (Rash et McLean, 1999).

Pour une fréquence donnée, la FTM est définie par l'équation suivante :

$$FTM = (Lmax - Lmin) / (Lmax + Lmin)$$

où Lmax et Lmin sont les luminances maximales et minimales en réponse à la mire sinusoïdale.

Elle est maximale pour la fréquence spatiale nulle, c'est-à-dire le fond continu. Elle décroît généralement jusqu'à une valeur de la fréquence spatiale pour laquelle le contraste s'annule (Rash et McLean, 1999) (figure 7). Le système ne transmet alors plus aucune modulation. Elle s'exprime en pourcentage.

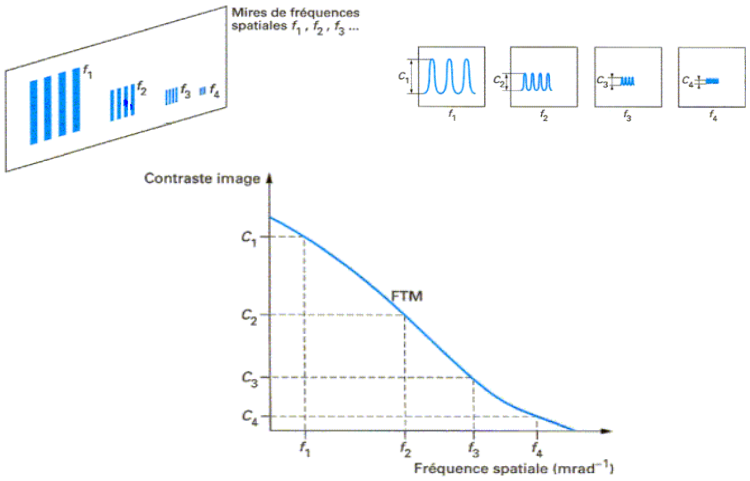


Figure 7 : fonction de transfert de modulation
(d'après Soulie, 2005)

La résolution spatiale d'un système optique peut être définie à partir de la FTM. La limite de résolution est la fréquence spatiale qui donne une FTM de 2 à 3 %. Elle peut aussi être définie comme la fréquence spatiale pour laquelle on ne voit plus une mire, définition plus subjective et fondée sur l'apparence de l'image (figure 8).

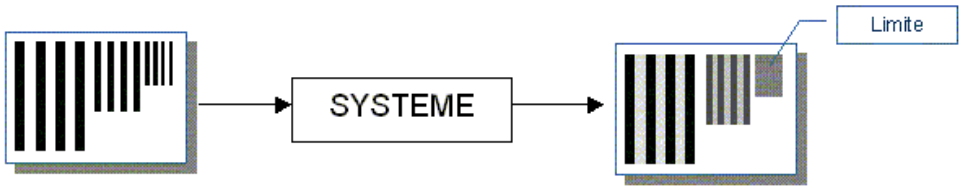


Figure 8 : limite de résolution spatiale d'un système optique
(d'après Soulie, 2005)

La plus haute fréquence spatiale qui peut être détectée est définie aussi par l'intersection de la courbe de FTM du sytème et celle de sensibilité aux contrastes de l'œil. Cela détermine la MFTA (pour Modulation Function Tranfert Area), c'est-à-dire la zone où la modulation du système est supérieure à la fonction de sensibilité de contraste de l'œil (Velger, 1998) (figure 9).

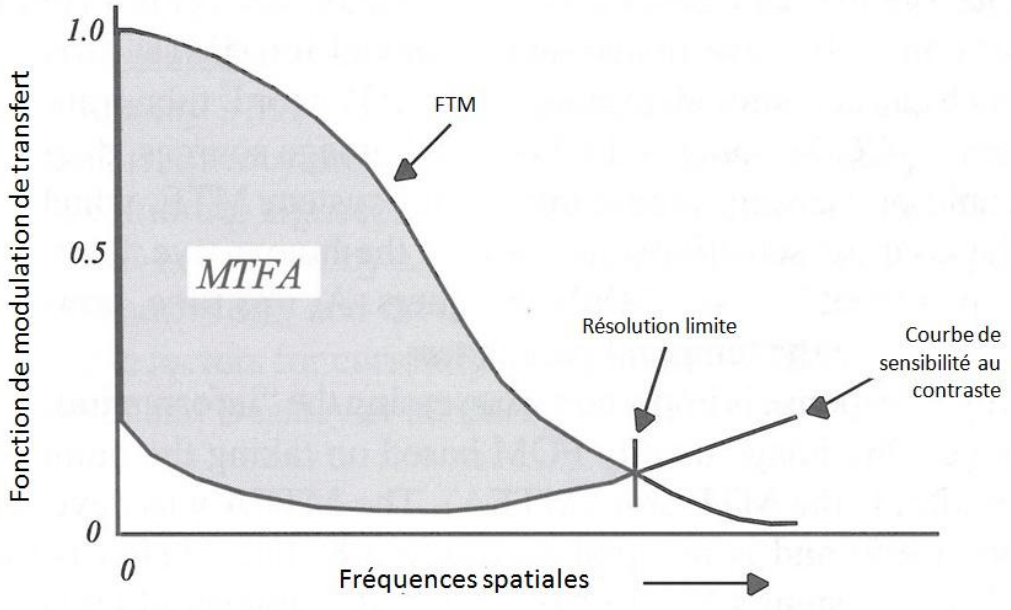


Figure 9 : concept de MTFA

La courbe du dessus indique la fonction de transfert de modulation totale du système optique et la courbe du bas la sensibilité au contraste de l'œil avec ce système. La surface grisée est la MTFA (Rash & McLean, 1999).

La limite de résolution est un élément de mesure de la qualité d'image fournie par le système. Elle peut être trompeuse si l'on utilise seulement la fréquence, sans référence au niveau de contraste. Pour l'établir, il est nécessaire de mesurer la résolution spatiale à différents niveaux de contraste, comme c'est le cas avec la mesure de FTM. La résolution de l'œil peut s'exprimer en cycles par milliradian (cy/mrad). C'est le passage par l'objectif du système optique qui permet d'obtenir une résolution en cycles par millimètre (cy/mm) ou en paires de lignes par millimètre (pl/mm).

2.3.1. Composition du tube

Le tube IL (figure 10) mesure environ 0,3 à 0,5 millimètres (mm) et comprend :

- une fenêtre d'entrée sur laquelle est déposée la photocathode ;
- un corps composé d'anneaux en céramique isolante et d'anneaux métalliques servant de contacts électriques ;
- une galette de microcanaux ;
- une fenêtre de sortie composée de fibres optiques et d'un écran de phosphore (P43).

Figure 10 : exemple de tubes intensificateurs de lumière (Midavaine, 2004)

2.3.2. Les générations d'IL

Il existe trois générations principales de tubes IL (Verona, 1985), chacune ayant des avantages et des inconvénients. La première génération (GEN I) utilise une simple différence de potentiel entre la photocathode et l'écran du tube. Pour la deuxième génération (GEN II), la différence majeure réside dans l'utilisation d'un multiplicateur d'électrons (galette de microcanaux) permettant d'augmenter l'énergie et le nombre de microcanaux. La troisième génération (GEN III) utilise une photocathode à l'arséniure de gallium (AsGa) présentant une plus grande sensibilité. Cependant, cette photocathode étant plus sensible et plus fragile

qu'une photocathode alcaline de deuxième génération, un film anti-retour d'ion est rajouté pour la protéger.

Depuis quelques années est apparue une « quatrième » génération qui correspond à de la troisième génération améliorée. Elle comprend deux types de tubes avec des améliorations différentes:

- soit des électrons sont sensibles dans le domaine infrarouge de 1 à 1,8 micromètres (µm) (surtout utilisée aux Etats-Unis) ;
- soit le film anti-retour d'ion avec la photocathode AsGa est retiré.

L'amélioration de la technologie d'amplification et de la qualité des tubes a permis d'augmenter les performances des DVN au cours de ces trente dernières années.

2.4. Marquage des tubes

Le marquage des tubes se traduit par une persistance de l'image. Ceci peut poser des problèmes au pilote qui verra plusieurs paysages superposés. Le marquage concerne pratiquement tous les tubes. Cependant sur un même lot, on peut se rendre compte que certains tubes marquent et d'autres non. Le marquage viendrait plus particulièrement de l'ensemble « film + galette » et du transfert d'électrons au sein de ces éléments (Soulie, 2005). Il existe deux types de marquage (figure 11) : le marquage négatif et le marquage positif.

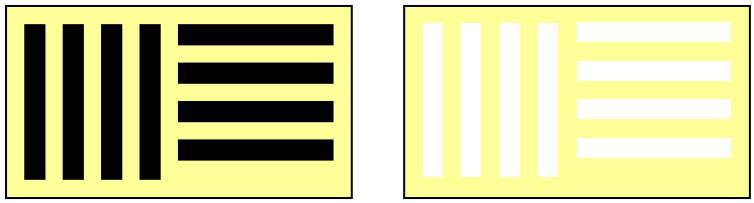


Figure 11 : exemple de marquage des tubes IL avec un groupe de mire USAF 1951
A gauche : marquage négatif; A droite : marquage positif (d'après Soulie, 2005)

2.4.1. Le marquage négatif

Les traces observées à l'écran sont noires. L'hypothèse proposée pour ce marquage est que les parties du film situées derrière les traits noirs de la mire laissent passer les électrons plus lentement que dans les traits blancs de la mire (Soulie, 2005). Le temps que ces zones du film se chargent en électrons, les traits noirs de la mire sont visibles. Lorsque le régime d'équilibre du niveau d'électrons s'établit entre la galette et le film, le marquage disparaît. Le marquage est visible avant que le régime d'équilibre soit atteint. La durée du marquage n'a pas été mesurée.

2.4.2. Le marquage positif

La mire apparaît plus claire que le fond de l'écran. Ce marquage peut être dû aux micro-canaux de la galette situés derrière les traits noirs de la mire, ils ne sont pas activés et sont « plus neufs » (Soulie, 2005). Pendant que la mire est placée devant le tube, les microcanaux ne sont pas activés et ils sont « plus neufs » que les autres canaux. Lorsque le régime d'équilibre du niveau d'électrons s'établit entre les canaux, le marquage apparaît. Le marquage est visible après que le régime d'équilibre soit atteint. La durée du marquage est estimée à 15 secondes.

2.4.3. Persistance dynamique

La persistance d'un phosphore, définie comme le temps nécessaire pour que la luminance de sortie du phosphore chute à 10% du maximum, est un facteur essentiel dans la réponse dynamique ou temporelle du tube IL (Rash, Ledford et Mora, 1999). Dans le domaine de l'aviation militaire, la capacité de réponse temporelle d'un système d'affichage est particulièrement critique dans les tâches d'acquisition de cibles (Rash et Verona, 1987).

3. Différents types de DVN

Depuis les années 70, période où l'armée américaine a adopté l'utilisation des DVN pour les vols opérationnels en hélicoptère, ces dispositifs ont subi de nombreuses évolutions (amélioration de la qualité d'intensification de l'image, apparition de la symbologie, intégration des détecteurs et afficheurs au niveau du casque).

Il existe actuellement deux types de DVN (figure 12) :

- les systèmes de type 1, appelés couramment Jumelles de Vision Nocturne (JVN) ;
- les systèmes de type 2, appelés aussi Visuels De Casque (VDC).

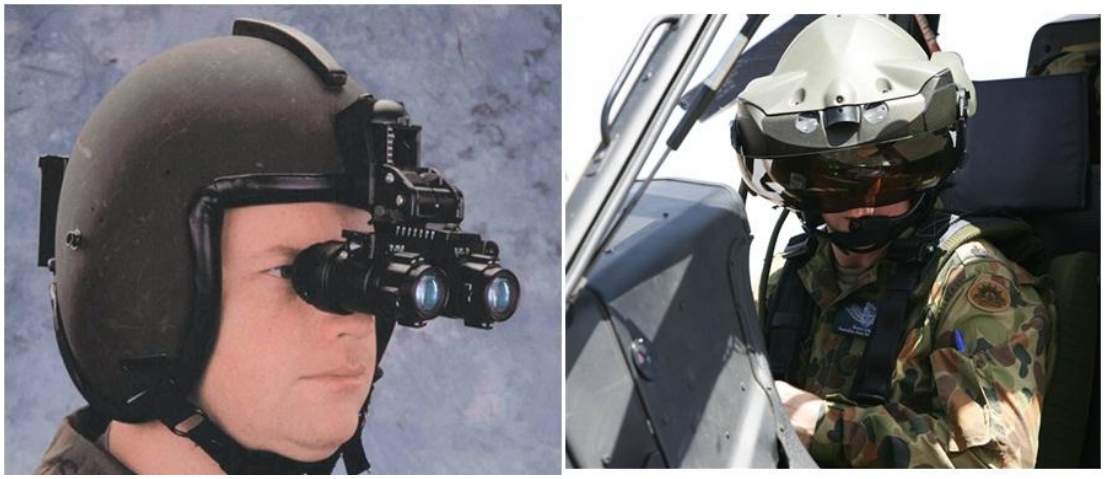


Figure 12 : les deux types de dispositifs de vision nocturne

A gauche, les systèmes de type 1 avec les tubes sont placés devant les yeux de l'utilisateur. A droite, les systèmes de type 2 : les tubes sont placés sur les côtés et permettent aux yeux du pilote d'accéder à la vision directe.

3.1. Systèmes de type 1

Dans les premiers DVN, utilisés depuis les années 70 (JVN) tels que les Aviator's Night Vision Imaging System (ANVIS), les tubes IL sont localisés devant les yeux du pilote. La vision de la scène extérieure est possible à travers le système d'aide à la vision (Berkley, 1992). La présence des tubes intensificateurs réduit le champ visuel utile de manière assez importante puisque le champ de vision des DVN est de 40° par recouvrement des 2 images. L'addition de DVN de type 1 sur le casque génère une augmentation de la masse supportée par la tête du pilote et un déplacement, plus ou moins important, du centre de gravité de la tête (Rash, 1999). Ceci provoque un effort musculaire important.

Pour permettre une vue directe de l'environnement extérieur ou des éléments de la cabine de pilotage à travers la visière, une solution a été développée afin de déplacer les capteurs de vision nocturne et libérer la vision directe. Il s'agit des VDC.

3.2. Systèmes de type 2

Les VDC sont apparus plus tard, dans les années 80. Dans ces systèmes (IHADSS de Elbit System Ltd, TopOwl® de Thales, Cat's Eyes® de GEC Avionics, Eagle Eyes® de Night Vision Corporation, etc.) (Berkley, 1992), les pilotes peuvent voir directement la scène extérieure. Les choix de conception des VDC sont des compromis entre les données biomécaniques et optiques. L'utilisation de systèmes de type 2 tend à améliorer la situation en réduisant l'effet de couple agissant sur le système tête-cou. La diminution de la masse supportée demeure un souci constant dans les problématiques de confort et d'utilisation des opérateurs, tout en conservant, au mieux, les capacités optiques optimales déjà atteintes. Les

capteurs sont intégrés dans la combinaison optique du VDC et l'image fournie est renvoyée à l'œil du pilote par couplage optique. Les images intensifiées sont superposées à la vision directe de la scène extérieure par l'utilisation d'un combineur semi-transparent. Ceci implique que les détecteurs ne sont pas localisés devant les yeux.

Pour cela, il existe deux possibilités. La première consiste à décaler les capteurs de vision nocturne vers le dessus des yeux au niveau du front. C'est le cas du Cat's Eyes® (Evans, 1991). Ce type d'équipement a été développé à la fin des années 80 : l'image venant des capteurs frontaux est projetée sur des combineurs semi-transparents. Le choix de localisation des capteurs crée un effet périscopique : une des conséquences est que l'image semble plus petite. Plus les tubes sont longs, plus l'image sera réduite. Cependant, cette configuration est peu utilisée dans les visuels de casque. C'est la seconde option, avec les capteurs déplacés latéralement, qui a été développée pour ce type de système, et notamment pour le casque TopOwl® conçu par Thalès. TopOwl® est un visuel de casque spécialement développé pour les pilotes d'hélicoptères. Les images sont présentées dans un champ binoculaire de 40° avec recouvrement total. Il permet de présenter, projetées sur la visière, des images provenant de tubes intensificateurs de lumière et de capteurs infrarouges ainsi que de la symbologie de pilotage.

L'avantage de ce système est d'être non seulement partiellement transparent mais aussi plus petit, ce qui permet de réduire l'obstruction du champ de vision. La semi-transparence de la visière permet aussi d'augmenter la capacité à voir les différents moniteurs dans la cabine de pilotage. Au-delà des bénéfices fournis par la vision binoculaire, son ergonomie et sa faible masse (inférieure à 2,3 kilogrammes en configuration complète) (Léger, Portier, Baudou et Trosseille, 1997) répondent aux besoins actuels des pilotes. Les capacités de transition jour/nuit fournies sont également améliorées.

- CHAPITRE 2 -

PERCEPTION VISUELLE

La majorité des informations perçues du monde environnant sont des informations visuelles. Pour les pilotes d'aéronefs, les informations visuelles sont essentielles par rapport aux informations vestibulaires et proprioceptives.

Le système visuel humain se compose de l'ensemble des yeux et des zones du cerveau participant au traitement des informations visuelles (corps genouillé latéral, cortex visuel primaire, aire V5, aire V4, aire IT, etc.) (Kandel et Wurtz, 2000). L'œil est un organe spécialisé dans la détection, la localisation et l'analyse de la lumière, ce qui permet de percevoir la luminance, la couleur, le relief et le mouvement. Le cerveau complète le traitement des informations. La rétine appartient au système nerveux central tandis que les autres parties de l'œil assurent des fonctions sensorielles dont le rôle est de focaliser les images sur la rétine.

Les images renvoyées par les capteurs embarqués soit dans les hélicoptères soit directement sur la tête des pilotes, sont très éloignées des images naturellement perçues en vision de jour. Les capteurs traduisent plus ou moins fidèlement les propriétés physiques des objets, leur donnant ainsi parfois des aspects nouveaux difficiles à reconnaître. L'œil, de part sa sensibilité, n'a accès qu'à une partie de ces caractéristiques physiques. C'est l'aspect psychosensoriel qui est, par conséquent, important.

Il est nécessaire, pour étudier les systèmes de vision nocturne, de comprendre les processus de la vision. Il est donc utile de rappeler, dans un premier temps, quelques notions sur la structure et le fonctionnement du système visuel humain. Dans un second temps, nous présenterons les traitements des informations visuelles qui sont modifiés par l'utilisation de dispositifs de vision nocturne (DVN), en traitant d'abord les aspects sensoriels, puis les aspects cognitifs.

1. Quelques bases de physiologie visuelle

1.1. La structure de l'œil humain

L'œil a pour rôle de capter la lumière émise par l'environnement et les objets, d'effectuer un premier traitement de ces informations pour transférer le résultat issu de ce traitement vers le cerveau.

La structure principale de l'œil est appelée globe oculaire. Celui-ci est constitué de deux couches externes (la sclérotique et la choroïde), qui fournissent protection, support et nutrition à l'œil, et d'une couche interne (la rétine) qui contient les éléments sensibles à la lumière. La structure de base de l'œil est représentée dans la figure 13. La lumière issue de sources primaires va se réfléchir sur des objets de la scène (sources secondaires) placés dans le champ de vision.

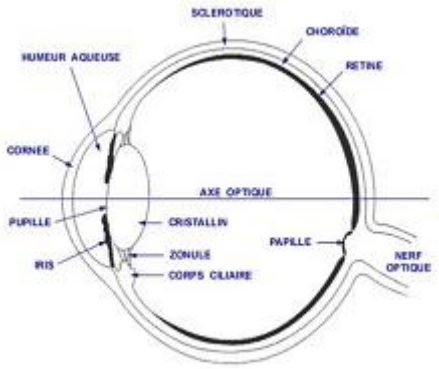


Figure 13 : anatomie simplifiée de l'œil humain

Les rayons de lumière réfléchis entrent par la cornée. Celle-ci est constituée de plusieurs couches de tissus transparents ; les tissus nerveux y sont abondants alors qu'il n'y a aucun vaisseau sanguin. La lumière traverse ensuite la chambre antérieure, remplie d'un liquide appelé humeur aqueuse. Dans cette chambre se trouve l'iris qui est la partie colorée de l'œil en raison de la présence d'un pigment (mélanine). L'iris contrôle la quantité de lumière qui entre dans l'œil par sa partie centrale, appelée la pupille. Celle-ci peut se dilater (dans l'obscurité) et se contracter (dans la clarté) afin d'adapter la quantité de lumière selon l'importance de l'illumination. La taille de la pupille varie de 2 à 10 mm, selon les conditions de lumière ambiante (Le Grand, 1975). Les rayons lumineux traversent alors le cristallin (ou lentille cristalline) qui peut adapter sa forme (accommoder) afin de placer l'image (distance de focalisation précise) sur la rétine, c'est-à-dire de la focaliser. Cet ajustement est dû aux

muscles ciliaires qui, par contraction ou relâchement, peuvent modifier le pouvoir de focalisation. La lumière entre ensuite dans la chambre postérieure, remplie d'humeur vitrée, principalement constituée d'eau, ce qui donne sa forme à l'œil (pression intraoculaire). Finalement, les rayons lumineux atteignent la rétine. Celle-ci est constituée d'environ 260 millions de cellules sensibles à la lumière (photorécepteurs), de cellules nerveuses et de fibres nerveuses à destination extra-oculaire. Elle permet ainsi la capture de rayons lumineux et leur conversion en messages nerveux. Ceux-ci sont transférés, après codage, par le nerf optique, vers le cerveau, qui les interprète en images.

L'œil possède des structures nerveuses, au niveau de la rétine, qui effectuent un traitement de base de l'information en codant les stimuli lumineux en informations interprétables par le reste du système nerveux central. Ce sont ces structures, décrites plus précisément dans le paragraphe suivant, qui constituent la base de la perception.

1.2. Le système visuel récepteur

L'image rétinienne est formée par l'ensemble des rayons lumineux captés par les photorécepteurs. Cette image peut être caractérisée de plusieurs manières. La façon la plus courante de caractériser une image rétinienne est de faire référence au type de cellules réceptrices activées.

Il existe deux types de photorécepteurs : les cônes et les bâtonnets (Le Grand, 1975). Ces cellules sont connectées dans la rétine avec d'autres types de cellules qui permettent l'intégration des informations visuelles (cellules bipolaires, horizontales, amacrines, ganglionnaires). Les traitements diffèrent sur 5 critères principaux à partir des cônes et des bâtonnets, ce qui a de nombreuses implications sur les processus de traitement visuel: localisation, acuité visuelle, sensibilité à la couleur, sensibilité à la lumière, adaptation à l'obscurité.

Nous allons voir dans un premier temps l'organisation de la rétine et des différentes couches de cellules. Puis, nous aborderons les cinq points cités précédemment afin d'aborder les différences entre les voies issues des cônes et des bâtonnets.

1.2.1. L'organisation de la rétine

1.2.1.1.L'organisation des couches de cellules

Les cônes et les bâtonnets se trouvent au fond de la rétine, si bien que la lumière doit traverser les autres couches cellulaires pour atteindre et stimuler les cellules photoréceptrices. La couche la plus externe contient les cellules ganglionnaires dont les axones traversent la

surface de la rétine pour aller former ensuite le nerf optique. L'ensemble des cônes et bâtonnets se projette sur les cellules ganglionnaires (seulement 1 million). Les informations arrivent par 2 voies (figure 14) (Dowling, 1979, in Tessier-Lavigne, 2000) :

- une voie directe via les cellules bipolaires ;
- une voie indirecte par les cellules horizontales, bipolaires et amacrines.

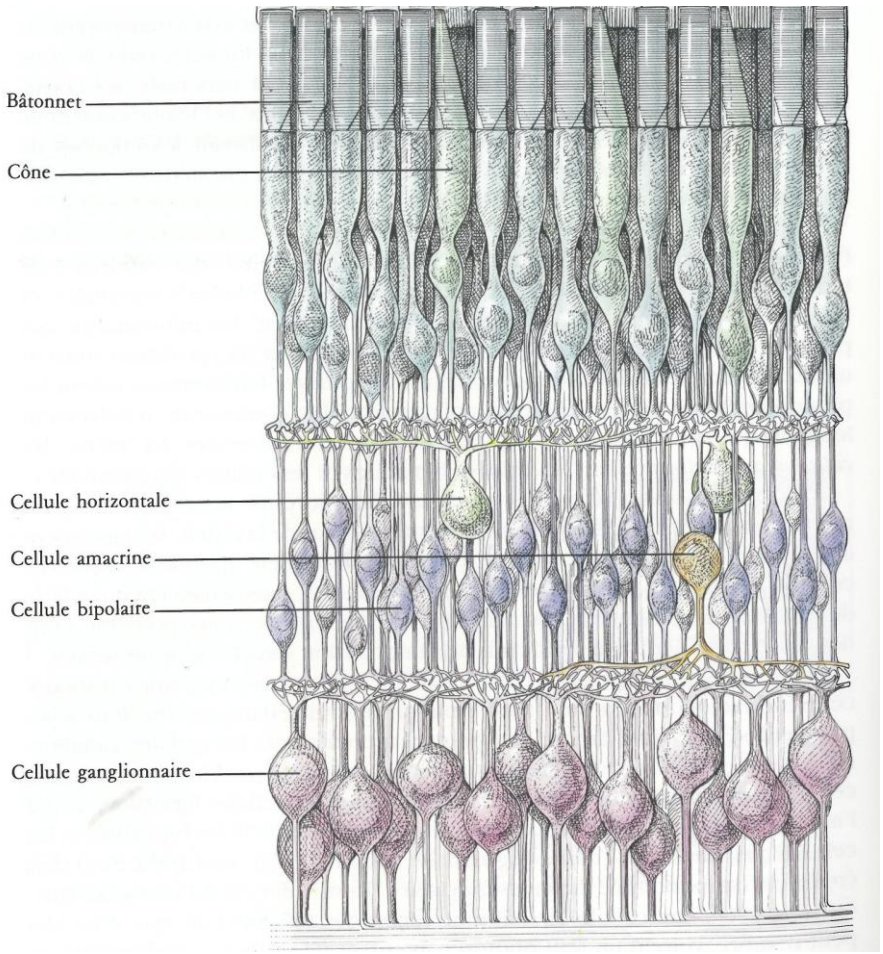


Figure 14 : coupe de rétine humaine faite à mi-distance de la fovéa et la périphérie

Les bâtonnets sont plus nombreux que les cônes et en hauteur, la structure représentée mesure environ un quart de millimètre (Hubel, 1994)

Kuffler (1953) fut le premier à mettre en évidence l'existence des champs récepteurs des cellules ganglionnaires. Ces cellules peuvent êtres divisées en deux catégories sur ce critère : les cellules à centre – ON et les cellules à centre – OFF. Le centre et la périphérie sont antagonistes. Pour une cellule centre – ON, elle est excitée quand la lumière est dirigée sur le centre de son champ récepteur. Si la lumière arrive sur la périphérie du champ, la cellule est inhibée (figure 15). Le phénomène est inversé pour une cellule centre – OFF.

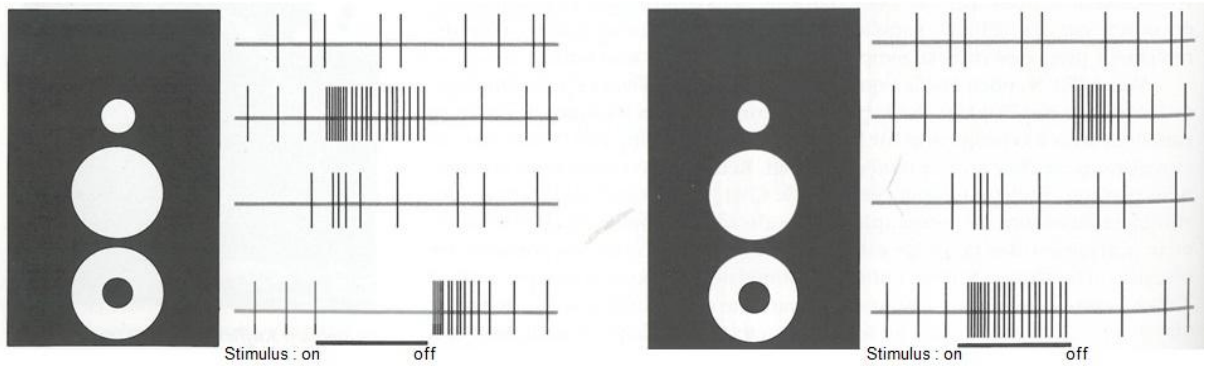


Figure 15 : enregistrements de l'activité d'une cellule ganglionnaire

A gauche : cellule centre – ON ;A droite : centre – OFF. Le tracé du haut correspond à une cellule non éclairée (non stimulée) donc au repos : les neurones déchargent peu et de manière assez aléatoire. Les tracés suivants correspondent, respectivement, à la stimulation par un disque lumineux de petite taille couvrant uniquement le champ récepteur (optimal), à un disque de très grande taille couvrant le centre et la périphérie du champ récepteur et un anneau lumineux couvrant la périphérie uniquement.

Chaque région de la rétine analyse des aspects distincts de la fonction visuelle et se divise en deux régions fonctionnelles au niveau ganglionnaire. Il existe les cellules de type M (pour magnocellulaires) et P (pour parvocellulaires) incluant chacune des cellules centre – ON et centre – OFF (Tessier-Lavigne, 2000). Les cellules M ont de grands champs récepteurs et sont plutôt impliquées dans les fonctions de détection du mouvement et d'analyse de grands traits des objets. Les cellules P ont de petits champs récepteurs et elles jouent un rôle plutôt dans l'analyse des détails fins, la perception de la forme et la couleur.

1.2.1.2. La localisation des photorécepteurs

La rétine humaine contient environ 6,5 millions de cônes (Davson, 1949 ; Polyak, 1941), distribués sur la rétine avec une densité plus importante au niveau de la macula, région de la rétine responsable de la vision centrale (figure 16). La majorité se situe au niveau de la fovéa[4] (1,5 à 2° d'excentricité) (Osterberg, 1935). Au-delà de cette zone se trouve un mélange de cônes et de bâtonnets, avec une décroissance de la concentration de cônes assez rapide dès que l'on s'éloigne de la fovéa. Les cônes se trouvent principalement au centre de la rétine et jusqu'à environ 10° d'excentricité (Osterberg, 1935). Les bâtonnets sont plus nombreux que les cônes (entre 75 et 150 millions) (Davson, 1949 ; Polyak, 1941), et distribués sur l'ensemble de la rétine. La majorité d'entre eux se situe en périphérie (au-delà de 20° d'excentricité) (Osterberg, 1935).

[4] L'anagramme « fovea » provient d'un terme anglo-saxon, « Field Of View of Eye Area ».

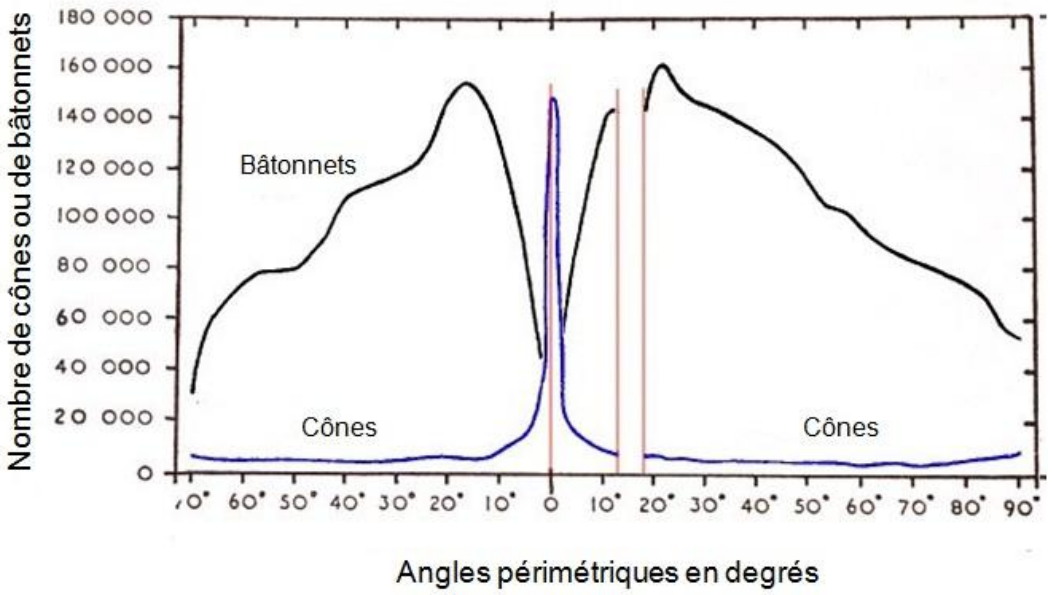


Figure 16 : répartition des photorécepteurs au sein de la rétine (Osterberg, 1935)

1.2.2. L'acuité visuelle

L'acuité visuelle fait référence à la capacité à résoudre des détails les plus fins possibles (Le Grand, 1975). Elle est souvent exprimée comme l'inverse du plus petit angle visuel (exprimé en minutes d'angle) qui peut être détecté[5]. Il est possible de relier l'angle visuel à la taille du champ récepteur (Hubel, 1994).

Etant donné que la taille des champs récepteurs des cellules ganglionnaires reliées aux cônes diminue au niveau de la fovéa, il en résulte une meilleure capacité à distinguer les détails des objets. L'acuité est meilleure lorsque l'image est placée dans la zone dense de cônes que dans la zone éparse de cônes. La capacité de discriminer les détails fins des objets diminue en périphérie. Ainsi, pour étudier des objets nécessitant une haute acuité visuelle, ces objets sont amenés au centre du champ de vision, par des mouvements des yeux (au niveau de la rétine centrale).

Les bâtonnets sont peu efficaces dans la discrimination des détails et permettent une perception globale. Ils jouent un rôle essentiel dans la vision périphérique et dans la détection des mouvements.

1.2.3. La sensibilité à la couleur

[5] L'unité d'acuité visuelle utilisée pour nos expérimentations, et dans le reste du document, est le nombre de cycles par milliradian (cy/mrad).

Les cônes et les cellules ganglionnaires de type P fournissent une vision précise des couleurs. Le système visuel humain est sensible aux couleurs rouge, vert et bleu. Ce sont les trois couleurs auxquelles sont adaptés les différents types de cônes (De Valois et De Valois, 1975), mis en jeu dans la rétine qui génèrent trois pigments différents (figure 17) :

- les cônes L, sensibles aux ondes longues (avec un pic de sensibilité vers 560 nm), pour la vision du rouge ;
- les cônes M, sensibles aux ondes moyennes (avec un pic de sensibilité vers 530 nm), pour la vision du vert ;
- les cônes S, sensibles aux ondes courtes (avec un pic de sensibilité vers 420 nm), pour la vision du bleu.

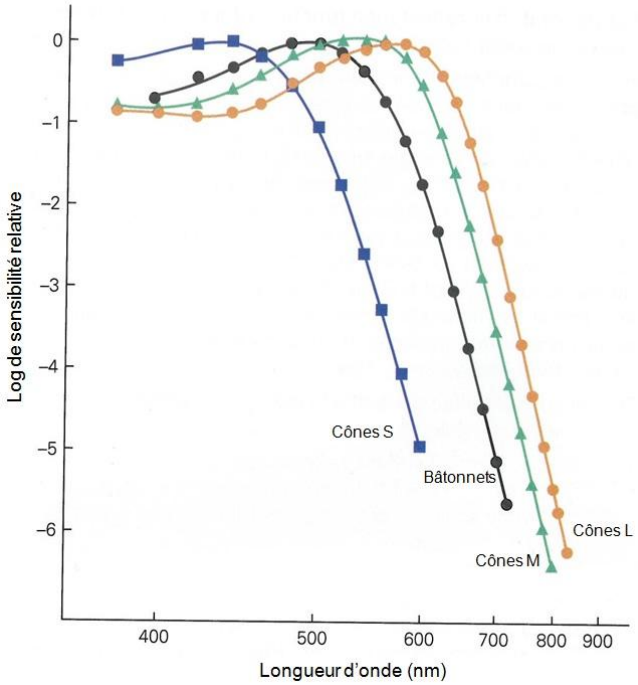


Figure 17 : courbes fondamentales de réponses à l'œil humain selon la longueur d'onde (d'après Schnapf, Kraft, Nunn et Baylor, 1988)

La vision des couleurs sera explicitée dans le paragraphe 2.1.1, concernant le traitement sensoriel en condition normale et dégradée.

Les bâtonnets ne permettent pas de discriminer différentes longueurs d'onde : ils sont adaptés à toutes les longueurs d'onde mais, contrairement aux cônes, ils ne génèrent qu'un seul pigment, la rhodopsine (Le Grand, 1975). La vision des bâtonnets donne une perception en

noir et blanc (ou panchromatique). Par conséquent, la limite de distinction des teintes décline la nuit ainsi qu'en périphérie.

1.2.4. La sensibilité à la lumière

La sensibilité fait référence à la quantité de lumière qui peut être détectée. Sensibilité et seuil de détection sont directement reliés puisque l'un augmente quand l'autre diminue et inversement (figure 18). En fonction de la quantité de lumière dans la zone d'observation, les cellules photoréceptrices mises en jeu sont différentes et il existe trois types de vision (Le Grand, 1975) : photopique, mésopique et scotopique.

La vision photopique correspond à la vision où tous les types de récepteurs sont activés, avec une efficacité maximale des cônes (les cônes s'activent pour de hautes et moyennes intensités lumineuses). Elle correspond à des luminances de plus de 10 candelas par mètre carré (cd/m²), avec un maximum de sensibilité de l'œil obtenu pour une longueur d'ondes de 555 nm.

La vision scotopique fait référence à la vision où seuls les bâtonnets sont activés. Elle correspond à des luminances inférieures à 10^{-3} cd/m², c'est-à-dire à la vision de nuit, avec un maximum de sensibilité obtenu pour une longueur d'ondes de 507 nm, qui correspond à une gamme de vert. Les bâtonnets sont plus sensibles à la lumière que les cônes.

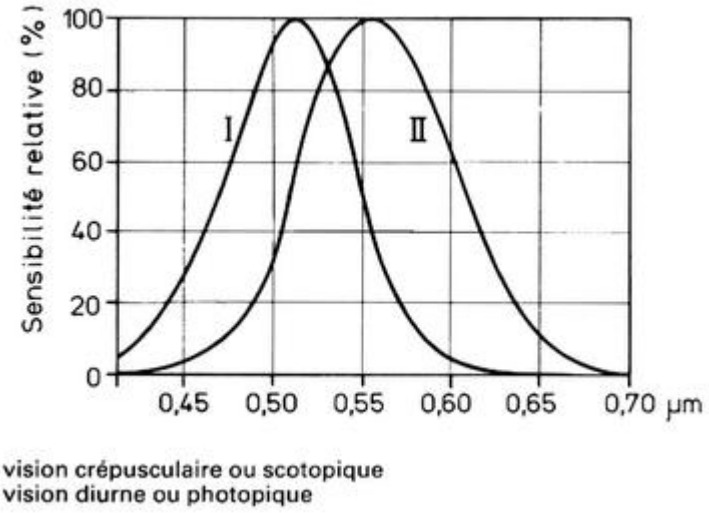


Figure 18 : courbes d'efficacité lumineuse relative
I: vision scotopique ; II: vision photopique (Le Grand, 1975).

Le domaine de vision mésopique correspond à des domaines de luminance compris entre 10^{-3} et 10 cd/m². Les deux types de photorécepteurs (cônes et bâtonnets) opèrent simultanément, chacun étant partiellement efficace.

1.2.5. L'adaptation à l'obscurité

Si, pendant une certaine période, les yeux sont maintenus dans une situation de faible éclairement, ils deviennent de plus en plus sensibles, et une lumière donnée paraîtra de plus en plus lumineuse. Il s'agit du phénomène d'adaptation à l'obscurité. Les cellules photoréceptrices de la rétine s'adaptent à l'obscurité, à des vitesses différentes. L'adaptation des cônes à l'obscurité est complète au bout d'une dizaine de minutes, tandis que l'adaptation des bâtonnets dure environ 50 minutes pour être totale (figure 19).

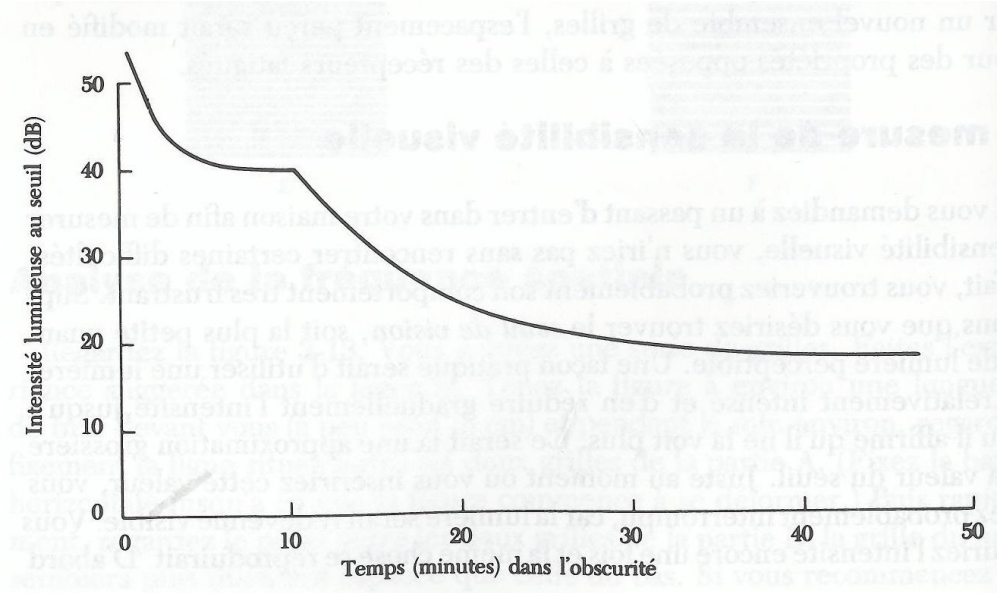


Figure 19 : accroissement de la sensibilité de l'œil dans l'obscurité

Dans le phénomène d'adaptation à l'obscurité, la 1^e^ partie de la courbe correspond à l'adaptation des cônes et la 2^nde^ à celle des bâtonnets (Chapanis, 1947)

Cette courbe peut être modifiée par :

- la variation du diamètre pupillaire : la dilatation de la pupille permet d'augmenter l'éclairement rétinien, ce qui ne permet pas de compenser la perte de luminosité de l'environnement ;
- le niveau lumineux initial de préadaptation : l'adaptation est l'obscurité est d'autant plus rapide que la luminance de départ est faible. Ceci se traduit par une translation de la courbe, l'adaptation des cônes diminue et on peut n'obtenir parfois qu'une courbe correspondant à la réponse des bâtonnets ;
- la composition spectrale : la forme de la courbe d'adaptation est identique pour toutes les longueurs d'onde mais elle se décale selon les valeurs.

Ces phénomènes d'adaptation temporelle sont liés aux mécanismes de phototransformation chimique des pigments ainsi qu'au phénomène d'intégration nerveuse au niveau central (Rushton et Westheimer, 1962 ; Le Grand, 1975).

Parmi les différentes structures de l'œil, les cellules photoréceptrices sont celles qui participent à la perception de la couleur, de la luminance et des détails. Mais, l'œil joue aussi un rôle important dans la netteté de l'image avec le cristallin. C'est ce mécanisme de « mise au point » ou accommodation que nous allons décrire ci-dessous.

1.3. L'accommodation

1.3.1. La description du système accommodatif

Le cristallin est la lentille de l'œil dont les fines modifications de forme se produisent, de manière automatique, en regardant un objet, afin de régler la distance de focalisation pour conserver l'image focalisée sur la rétine (Thomas, 1975). Cela fait référence au phénomène d'accommodation. L'accommodation est due à la contraction ou au relâchement des muscles ciliaires qui entourent la lentille (Brown, 1965), et elle joue un rôle important dans la vision des objets à toutes les distances, mais elle joue un rôle plus important à courte distance. Des récepteurs sensoriels, situés dans ces muscles, envoient des informations concernant la réponse accommodative aux centres perceptifs. L'unité utilisée est la dioptrie (D). Une dioptrie correspond à l'accommodation nécessaire pour voir un objet situé à un mètre et elle est définie comme l'inverse de la distance entre l'œil et un objet focalisé.

Quand l'image est près, les rayons lumineux issus de ces images s'approchant de l'œil sont convergents et les muscles doivent accommoder en changeant la lentille vers une forme plus arrondie (Norman, 1980). L'image d'un objet plus proche (moins de 1 m) va solliciter un effort d'accommodation du cristallin pour ne pas être perçue comme floue. Cette « mise au point » est effectuée de façon automatique (réflexe d'accommodation). Pendant l'accommodation, le cristallin se déforme légèrement et prend une forme plus convexe. De ce fait, sa puissance optique augmente et permet de voir net un objet situé à une distance rapprochée.

Quand l'image est située plus loin, les rayons lumineux atteignent l'œil de manière essentiellement parallèle, les muscles accommodent en créant une lentille plus plate. L'image d'un objet éloigné (au-delà de 4 m) se forme sur la rétine. Ceci est lié au fait que la rétine se situe dans le « plan focal » du couple cornée/cristallin pour les objets éloignés observés. Quelque part entre ces deux positions, il existe un point où la lentille vient en position

naturelle de repos (Leibowitz et Owens, 1975a), là où le tonus des muscles est nul ou le plus faible possible. Cette position est évaluée entre 58 et 67 cm (Leibowitz et Owens, 1975b, 1978, in Wolfe et O'Connell, 1987).

Pour détecter la présence d'objets dans l'environnement, mais surtout pour les reconnaître et les identifier, il est nécessaire de les placer au centre de notre champ visuel, de les suivre quand ils sont en mouvements, etc. Ces mécanismes sont assurés par le système oculomoteur, décrit ci-dessous.

1.4. Le système oculomoteur

C'est le système moteur qui contrôle le mouvement du globe oculaire. Il se compose de 6 muscles par œil et permet d'effectuer des mouvements dans toutes les directions possibles avec un maximum d'environ 40°, par rapport à l'axe du regard au repos.

Le contrôle de la position du regard met en jeu des comportements qui peuvent être divisés en processus d'orientation et de stabilisation.

1.4.1. Les processus d'orientation

Les comportements d'orientation sont les mouvements oculaires nécessaires pour rechercher les objets d'intérêt dans le champ visuel. A partir de 15-20° au-delà du point de repos, les mouvements de la tête sont mis en jeu afin de replacer les objets d'intérêt au centre du champ visuel et de minimiser le travail de ces muscles (Paillard, 1976). L'œil se déplace rarement vers ces extrémités.

Les trois mouvements principaux des yeux sont les saccades, la poursuite et la vergence (Findley, 1995 ; Williams, 1966).

Les saccades sont les mouvements principaux utilisés pour voir différentes portions d'une scène visuelle. Elles sont principalement mises en jeu lors de la recherche visuelle. Ce sont des mouvements rapides et soudains, pouvant être volontaires (processus top-down) ou de nature réflexive (processus bottom-up) et permettant de se déplacer d'un point à un autre. Leur latence varie de 100 à 300 ms et leur vélocité de 30 à 700 degrés par seconde (°/s) (proportionnellement à la taille du mouvement de la saccade).

La poursuite consiste en un mouvement coordonné et parallèle des deux yeux pendant une phase de pistage d'objets en mouvement (cibles), avec une vélocité constante. La latence est d'environ 125 ms. La vélocité de ces mouvements peut atteindre 30 à 50 °/s. Au-delà de 30°/s valeur nécessaire pour avoir un mouvement stable des yeux (Young et Sheena, 1975), des auteurs (Meyer, Lasker et Robinson, 1985) ont montré que les sujets peuvent suivre des

cibles jusqu'à 90°/s mais avec une imprécision modérée et une absence de linéarité entre vitesse-œil et vitesse-cible On parle classiquement de poursuite lisse.

La vergence est mise en jeu quand les yeux se déplacent d'un point distant vers un point proche (convergence) ou d'un point proche vers un point éloigné (divergence) pour suivre le déplacement d'une cible qui s'approche ou qui s'éloigne. La latence atteint environ 160 ms et le maximum de vélocité 20 °/s.

1.4.2. Les processus de stabilisation

Les mécanismes de stabilisation permettent « d'accrocher le regard sur une cible ou un environnement visuel alors que la tête et/ou le corps sont soumis à des mouvements volontaires ou non » (Sandor, 1992). Dans un environnement habituel, pendant un mouvement rotatoire de la tête, le réflexe vestibulo-oculaire (VOR) déclenche un mouvement compensatoire de l'œil. Ceci permet de maintenir la direction du regard et la netteté de l'image sur la rétine pendant le déplacement. Ce réflexe a été décrit par Lorente de No en 1933 et Szentagotai en 1950 (d'après Melvill Jones et Gonshor, 1975).

1.5. Les anomalies du système visuel

Ces dégradations sont assez nombreuses mais les plus courantes sont :

- les anomalies de la réfraction de l'œil (ou amétropies) ;
- la presbytie ;
- les dyschromatopsies.

Les anomalies de réfraction de l'œil, congénitales ou acquises, sont caractérisées par une mauvaise mise au point des images rétiniennes d'objets situés à l'infini ou par un effort de mise au point. Il existe deux sortes d'amétropie :

- l'amétropie axiale, due à une longueur anormale de l'axe antéro-postérieur de l'œil alors que sa puissance est de valeur moyenne ;
- l'amétropie de puissance (ou amétropie de réfraction), due à une puissance anormale de l'œil alors que sa longueur est de valeur moyenne. Les amétropies de puissance peuvent être soit de courbure, soit d'indice selon que l'un ou l'autre de ces facteurs est nettement différent de la valeur moyenne.

Les amétropies sont la myopie, l'hypermétropie et l'astigmatisme.

La myopie est induite par un allongement excessif de l'œil, plus exactement de l'axe antéro-postérieur du globe (la distance entre la cornée et la rétine appelée longueur axiale est trop importante par rapport à la distance de focalisation de l'objectif couple cornée-cristallin) ou à

une trop grande convergence de l'œil. L'image d'un objet se forme en avant de la rétine (figure 20). De ce fait, le myope distingue mal les objets situés à l'infini. L'accommodation ne commence à jouer son rôle qu'à faible distance et donc seule la vision des objets proches est nette sans effort.

Figure 20 : exemple d'un cas de myopie sans correction
(d'après Gatinel, 2010)

L'hypermétropie est induite par une longueur axiale insuffisante : la distance entre la cornée et la rétine est trop courte par rapport à la distance de focalisation du couple cornée-cristallin. L'image d'un objet éloigné est défocalisée spontanément en arrière de la rétine (figure 21). L'image perçue est floue. Selon le degré de l'hypermétropie, l'accommodation peut être suffisante pour refocaliser l'image mais au prix d'un effort accommodatif permanent et fatiguant. Dans ce cas, la vision de loin peut être corrigée.

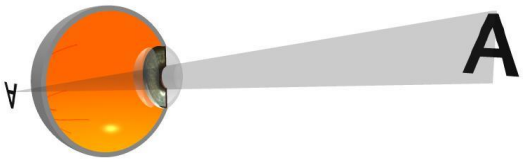


Figure 21 : exemple d'un cas d'hypermétropie
(d'après Gatinel, 2010)

La cornée ne doit pas présenter de défaut de courbure important pour permettre à l'image d'être de bonne qualité. Les méridiens sont des lignes virtuelles que l'on peut tracer du centre de la cornée vers le bord de la pupille. Ils ont la même courbure ou presque. L'astigmatisme est souvent induit par une variation excessive (irrégularité) de la courbure cornéenne entre ses méridiens (toricité excessive) (figure 22). Dans la zone déformée, l'indice de réfraction n'est pas le même que dans les autres zones, si bien que les rayons ne sont pas transmis correctement. Les conséquences optiques de l'astigmatisme sont relativement complexes. L'astigmatisme est une déformation de la vision qui se traduit souvent par une vision floue des lignes selon plusieurs axes. Le flou visuel est global et touche aussi bien la vision de près que celle de loin. Il n'y a pas de distance où la vision est nette.

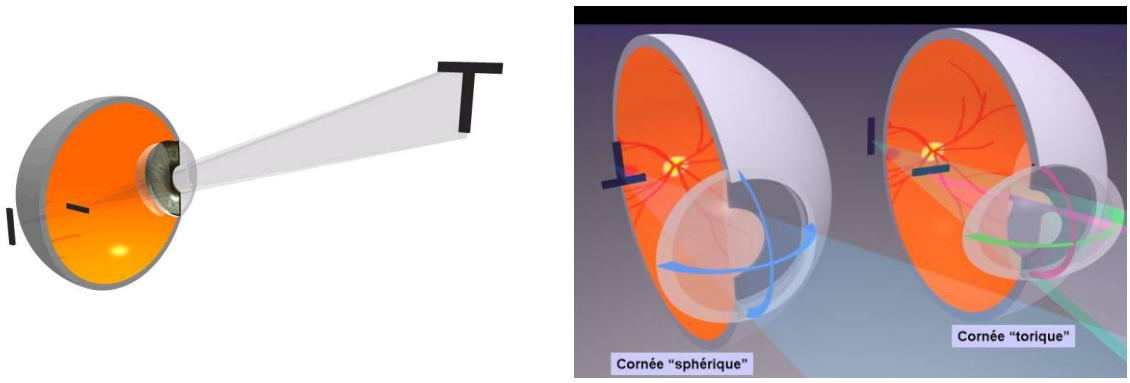


Figure 22 : exemple d'un cas d'astigmatisme

A gauche : exemple d'un T vu par un astigmate sans correction ; A droite : une cornée sphérique est une cornée dont les méridiens ont une courbure correcte tandis qu'une cornée torique est une cornée avec une courbure excessive (d'après Gatinel, 2010).

Il apparaît que les anomalies de la réfraction peuvent perturber la capacité à percevoir les objets de l'environnement. Les pilotes sont régulièrement soumis à des visites médicales afin de vérifier leurs capacités visuelles et de les informer sur la nécessité de porter des lunettes (ou lentilles) de correction.

La presbytie est une anomalie visuelle particulière que l'on peut qualifier de dynamique. Elle correspond à la réduction progressive du pouvoir accommodateur de l'œil c'est-à-dire de la capacité de l'œil à effectuer la mise au point en vision de près. Il devient difficile pour le sujet de travailler à la distance qui lui est habituelle tout en conservant une réserve d'accommodation au moins égale à un tiers de l'amplitude disponible. Elle se traduit par l'apparition d'une gêne croissante à la lecture ou à l'identification de détails fins au sein d'un motif observé à distance proche. Elle est liée à la perte d'élasticité du cristallin qui apparaît avec le vieillissement. Chez un individu déjà atteint d'une autre anomalie de la vision, la presbytie s'ajoute à la précédente de sorte que l'individu peut avoir des problèmes de vision assez importants.

Les dyschromatopsies[6] (ou daltonismes) sont des anomalies de la vision des couleurs déterminées par des gènes récessifs sur le chromosome sexuel X. Ces dyschromatopsies sont de deux types :

[6]Elles peuvent aussi résulter de maladies oculaires.

- L'anomalie trichromatique qui est liée à des substitutions d'acides aminés lors de la méiose donnant une déficience d'une couleur. Ce cas amène principalement à des déficiences pour une couleur en fonction du type de cônes touché ;
- L'anomalie dichromatique (ou daltonisme) qui est liée à l'absence d'un gène conduisant à un manque de iodopsine. Ce cas provoque une cécité partielle (à une couleur, dépendant du type de cônes) et une vision très différente du monde.

1.6. Conclusion

Le pilotage des hélicoptères nécessite l'utilisation d'informations visuelles, essentielles et complétées par les informations proprioceptives (particulièrement dans les phases d'accélération et décélération) et celles d'origine vestibulaire. L'addition de systèmes de vision nocturne pour le pilotage pendant la nuit modifie les informations visuelles utilisables. Le traitement effectué par le système visuel sur les images dépend de la physiologie de l'œil et de la présence ou non de pathologies. L'ensemble des systèmes photorécepteur, oculomoteur et accommodatif sont mis en jeu pour fournir les informations visuelles de base qui sont ensuite traitées et interprétées au niveau du cerveau. Les informations sont traitées selon différents niveaux.

Nous allons expliquer les mécanismes de traitement de ces informations visuelles en fonction du niveau (sensoriel et cognitif), et en fonction de la qualité des images fournies (normale et dégradée).

2. Traitement sensoriel en conditions normale et dégradée

Les images issues des tubes intensificateurs de lumière (IL) sont différentes des images naturellement perçues en vision photopique. Les capteurs ne traduisent pas de manière identique les propriétés physiques des objets, leur donnant parfois des aspects nouveaux, difficiles à reconnaître. Cela modifie les caractéristiques physiques de l'image fournie aux pilotes, mais aussi sur l'interprétation résultante du traitement des informations visuelles reçues.

Dans cette partie, nous allons décrire l'ensemble des caractéristiques et des perceptions sensorielles, modifiées par l'utilisation de DVN, c'est-à-dire :

- la vision des couleurs ;
- la sensibilité à la lumière ;
- la taille du champ visuel ;
- l'acuité visuelle ;
- la sensibilité aux contrastes ;
- la perception du mouvement.

Pour chaque critère étudié, les performances et mécanismes mis en jeu sont décrits en condition normale (vision photopique) et en condition dégradée (vision avec les tubes IL).

2.1. Vision des couleurs

2.1.1. Condition normale

D'une manière générale, la lumière peut être considérée comme une onde électromagnétique sinusoïdale, de fréquence donnée, qui se propage dans le vide et dans les milieux transparents. La lumière elle-même n'est pas colorée : elle engendre des sensations de luminosité et de couleur, par l'intermédiaire des yeux et du système nerveux. La couleur est la perception de cette lumière par l'œil et les aires visuelles V1, V2 et V4 (Zeki, 1973) et elle est liée à la valeur de sa fréquence. Classiquement, la fréquence est peu utilisée et on exprimera plutôt la longueur d'onde, avec une amplitude donnée, exprimée en nanomètres (nm). L'œil humain est souvent incapable de distinguer un jaune monochromatique (une seule longueur d'ondes) d'une composition correspondante de vert et de rouge (jaune monochrome). Des ensembles lumineux, de composition spectrale différente qui produisent la même impression colorée sur l'œil sont appelés couleurs métamères.

La perception visuelle de la couleur est relative à la sensibilité des récepteurs de la rétine. Cette sensibilité de l'œil humain n'est pas la même sur l'ensemble du spectre des longueurs d'onde. Celle - ci s'étend du violet (380 nm) au rouge (780 nm) avec le vert (530 nm) au centre. En vision photopique, basée sur la sensibilité des cônes, le maximum de sensibilité se situe dans le vert-jaune (555 nm). En vision scotopique, il y a un décalage de la sensibilité vers le vert-bleu (507 nm) : c'est l'effet Purkinje (1819 ; 1825). Dans ce cas, ce sont essentiellement les bâtonnets qui sont activés. La sensibilité est exprimée en efficacité relative en fonction de la longueur d'onde (figure 23).

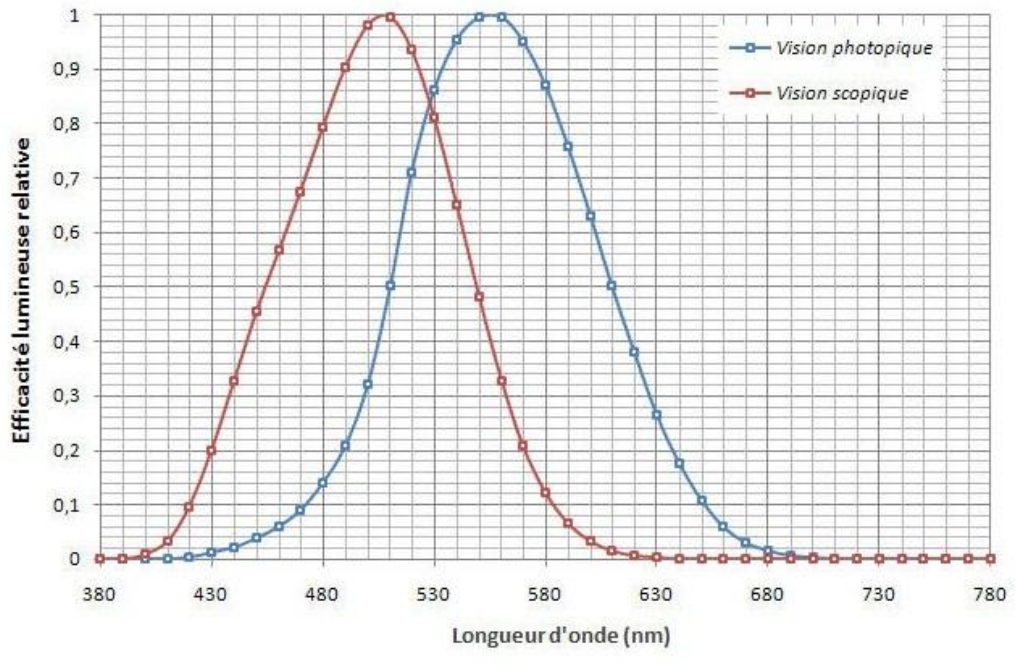


Figure 23 : sensibilité aux longueurs d'onde en vision photopique et scotopique (à partir de CIE, 1924 et 1951)

En observant l'arc-en-ciel, on peut voir que les gouttelettes de pluie, dans le lointain, décomposent la lumière en six couleurs. Newton reproduisit ce phénomène en décomposant la lumière solaire grâce à un prisme optique (un prisme droit en verre à base triangulaire). Il réussit à décomposer la lumière blanche en toutes les différentes couleurs du spectre (Newton, 1672 ; Newton, 1704). Le physicien Young (1802), fit le contraire de Newton en recomposant la lumière. Il fit converger les six couleurs du spectre et obtint la lumière blanche. Il alla même plus loin en démontrant que les six couleurs du spectre pouvaient être réduites à trois. C'est-à-dire qu'il pouvait recomposer la lumière blanche avec ces trois couleurs. Il démontra aussi qu'en les mélangeant deux par deux, il pouvait obtenir les autres. Et c'est ainsi qu'on différencia les couleurs primaires (rouge, vert et bleu) des secondaires (magenta, jaune et

cyan). Von Helmholtz (1867) défendit les idées de Young et la théorie de la vision des couleurs pris le nom de théorie de la trichromie de Young-Helmholtz.
Pour interpréter les résultats sur les mélanges des couleurs, Hering (1964) proposa une théorie sur l'existence dans le cerveau de mécanismes antagonistes : un pour la perception du vert et du rouge, un pour le jaune et le bleu et un pour le noir et le blanc. Ces données furent confirmées par des études neurophysiologiques dans les cellules du noyau genouillé latéral, chez le macaque, dont la vision des couleurs est quasi-identique à la vision humaine : elles ont démontré l'existence de cellules à antagonisme chromatique, les cellules rouge-vert et bleu-jaune (De Valois, Abramov et Jacobs, 1966 ; Hubel et Wiesel, 1968) et un troisième type de cellules avec un antagonisme spatial (Hubel et Wiesel, 1968).

D'un côté, l'étude de la décomposition de la lumière nous apprend que les couleurs pures sont monochromatiques c'est-à-dire que le rouge, le vert et le bleu ont leurs longueurs d'onde caractéristiques. D'un autre côté, le mélange additif de deux couleurs, telles que le vert et le rouge, en produit une troisième, par exemple le jaune. Pour expliquer cette sensation, il faut faire appel à la physiologie de l'œil. Les cônes transforment tout rayonnement de lumière visible en trois types de messages nerveux différents, qui sont acheminés vers le cerveau. Même une lumière monochromatique, comme le vert, est codée par ces trois messages. Or, la rétine est incapable de faire la différence entre un jaune monochromatique (une seule longueur d'onde) et un jaune monochrome (somme de vert et rouge). Chaque type de cônes est excité de la même façon et envoie son message nerveux, identique dans les deux cas vers le cortex visuel primaire. Autrement dit, physiquement, les deux lumières sont différentes car leur composition spectrale est différente mais, l'impression pour l'œil est la même.

2.1.2. Condition dégradée

La couleur des objets, associée au contraste de luminance, aide à organiser et diviser l'environnement visuel (différentes textures, caractéristiques et objets). La couleur est un indice important de l'attention puisqu'il permet d'attirer l'attention, et améliore la recherche visuelle pour des objets naturels saillants ou des éléments codés par couleur sur un écran.
Dans un DVN, la couleur de l'image est déterminée par le type de phosphore utilisé. Le terme « phosphore » désigne une substance qui émet de la lumière quand elle est percutée par des électrons selon la définition de Leverenz (1950). La plupart des DVN utilisent des phosphores verts ou vert-jaunes (Rash, 1982 ; Rash, Ledford et Mora, 1999) à réponse rapide de type P43 (figure 24).

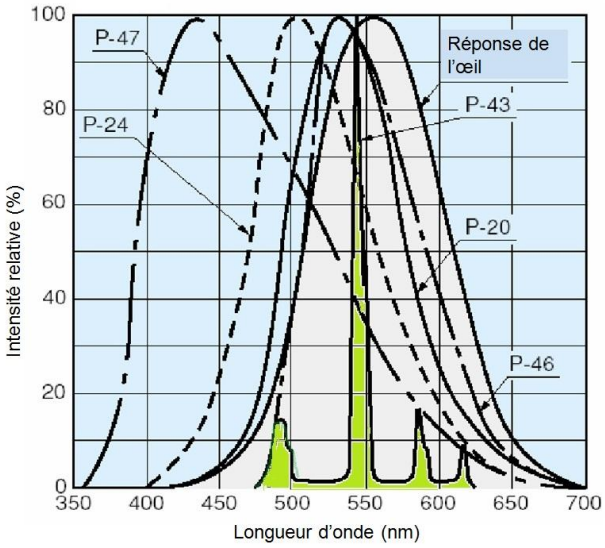


Figure 24 : spectre de transmission de divers phosphores

La courbe en vert représente celle du phosphore 43 (Midavaine, 2004)

L'image présentée est monochrome, dans les dégradés de vert (Verona et Rash, 1990), due à la qualité du phosphore choisi, ce qui est optimal en termes de sensibilité au contraste. En effet, d'après Menu (1986), l'œil présente la meilleure sensibilité aux contrastes dans le vert en vision centrale. En vision périphérique, le vert est la couleur dont les seuils se dégradent le moins vite : aux excentricités extrêmes de 30-40°, le vert est mieux perçu que les autres couleurs. De plus, les informations spatiales impliquées dans la perception des formes sont moins altérées dans le vert, en vision périphérique (nous verrons dans le paragraphe 2.4. ce que sont exactement les fréquences spatiales).

Si une scène, vue en plein jour, est comparée à la même scène vue au travers de DVN (figure 25), il apparaît qu'il est plus difficile d'appréhender la totalité des éléments et caractéristiques de la scène observée dans le cas de DVN.

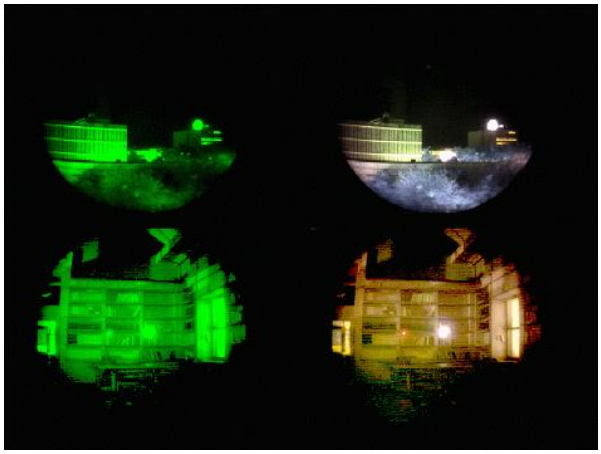


Figure 25 : comparaison d'une scène en vision normale et vue sous DVN

Les images de droite représentent deux scènes de nuit en vision normale. Les images de gauche représentent les mêmes scènes de nuit vues au travers d'un DVN

Une étude d'Essock, Sinai, McCarley, Krebs et DeFord (1999) a mis en évidence que les images vues au travers d'un système de vision nocturne fournissent les informations de bas niveau, nécessaires pour déterminer l'organisation perceptuelle dans une tâche de classification. Cependant, il est plus difficile de reconnaître un objet dans ces conditions que lorsque les images sont colorées.

2.2. La sensibilité à la lumière

2.2.1. Condition normale

La sensibilité en condition photopique s'étend entre 380 et 780 nm, tandis que la sensibilité en condition scotopique ne s'étend qu'entre 380 et 650 nm. Nous sommes plus familiers avec l'apparence des objets et de l'environnement qui nous entoure dans des conditions diurnes.

2.2.2. Condition dégradée

L'apparence d'un objet, sa couleur, son éclat, dépendent de la sélectivité du système d'aide à la vision vis-à-vis des longueurs d'onde. Les DVN sont plus sensibles aux grandes longueurs d'onde du domaine visible dans le rouge et à celui du proche infrarouge, c'est-à-dire entre 625 et 930 nm (Hughes, 2001). L'apparence et le contraste d'un objet observé au travers de DVN dépendent des caractéristiques de sensibilité du dispositif mais aussi de la manière dont les objets réfléchissent ce type de longueurs d'onde.

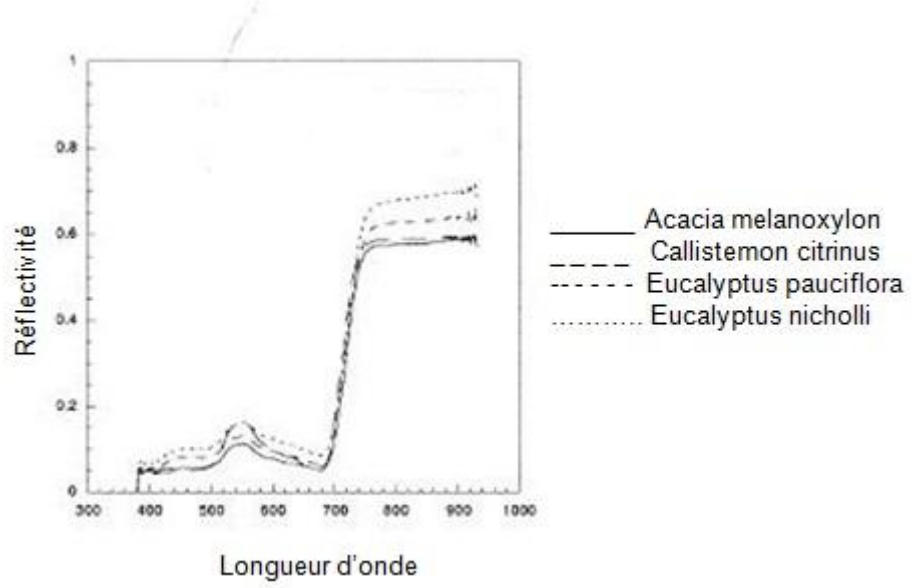


Figure 26 : réflectivité de la végétation (exemple de végétation australienne) (Hughes, 2001)

Hughes (2001) montre un exemple de mesures de réflectivité effectuées sur de la végétation (figure 26). Les résultats montrent que la végétation réfléchit plus la lumière dans la région proche de l'infrarouge que dans le domaine visible. Ceci explique pourquoi la végétation semble plus « brillante » au travers de JVN par rapport à une surface ayant la même réflectivité dans les deux bandes de longueur d'onde (visible et proche infrarouge). Les surfaces réfléchissent différemment les longueurs d'onde proches de l'infrarouge ce qui modifie la perception des objets dans les systèmes de vision nocturne.

2.3. Le champ visuel

2.3.1. Condition normale

Le champ visuel est l'espace visuel vu par un œil immobile, fixant droit devant lui. On décrit un champ visuel par œil. Le champ visuel binoculaire est constitué de la superposition des champs visuels de chaque œil couvrant environ 120° et des champs monoculaires des deux yeux, de champ côté de la tête. Ce champ total est limité à, environ, 200° dans le sens horizontal et 130° verticalement (Panero et Zelnik, 1979).

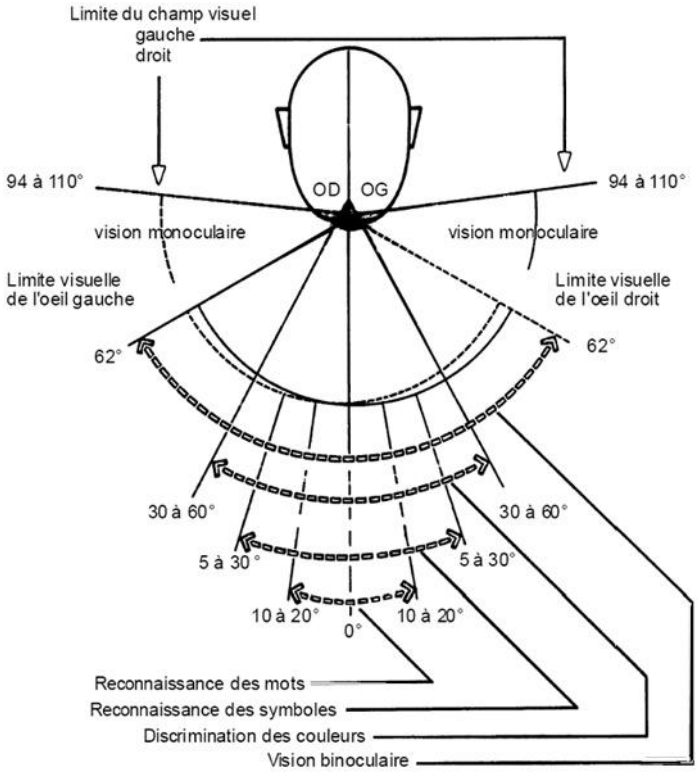


Figure 27 : division du champ visuel dans un plan horizontal
(d'après Panero et Zelnik, 1979)

D'après la figure 27, il apparaît que chaque partie du champ visuel n'assume pas les mêmes fonctions dans la perception visuelle. Le centre du champ correspond à la zone où l'acuité visuelle est la plus fine (surtout au niveau de la fovéa). Cette zone peut être impliquée en particulier dans la reconnaissance des mots, des caractères ou des informations de détails fins. Si cette zone est étendue, l'acuité visuelle est moins précise et il est possible de reconnaitre des informations de détails moins fins comme des symboles. La zone intermédiaire joue plutôt un rôle dans la perception des couleurs. La zone périphérique joue un rôle important dans la vision binoculaire et dans la perception du mouvement.

L'ensemble du champ joue un rôle important dans la détection d'objets en mouvement et/ou saillants (nous reviendrons plus loin sur les aspects de perception du mouvement). Des études ont montré des résultats similaires. Lichtenstein (1963) en utilisant des stimuli se déplaçant à des vitesses différentes a montré que la fovéa est plus sensible au mouvement lent que la périphérie. Sharpe (1974) a montré que la rétine périphérique est plutôt impliquée dans la détection de mouvement rapide (100°/s) alors que la fovéa ne les détecte pas. La rétine centrale est plus spécialisée pour la perception du mouvement que la rétine périphérique. Maintenant, il est certain que le mouvement améliore la vision des stimuli présentés en périphérie (Finlay, 1981). Le sujet, par des mouvements de la tête et des yeux, va alors placer cet objet dans la zone fovéale, pour une étude détaillée. C'est le réflexe de recentrage des yeux décrit précédemment (Paillard, 1979).

2.3.2. Condition dégradée

Dans les systèmes de vision nocturne, le champ visuel est restreint. On parle alors de champ de vision (classiquement dénommé FOV pour Field Of View) et il correspond à l'angle d'affichage de l'image intensifiée. Selon le type de DVN, la taille du champ est variable : pour les systèmes binoculaires classiques (type ANVIS), il peut couvrir un angle d'environ 40° (champ circulaire) (Task, 1992 ; McLean et Rash, 1999 ; Rash, 1999) et, pour les systèmes binoculaires de type panoramiques, il peut couvrir un champ de 100° (horizontal) x 40° (vertical) (Task et Filipovic, 1997 ; Craig et Geiselmann, 1998).

La première conséquence de la réduction du champ de vision naturel est la mise en place par les utilisateurs de stratégies de balayage de la scène. Les mouvements de tête sont beaucoup plus importants que dans des conditions normales de champ non réduit (Kasper et al., 1997). Le changement de comportement des mouvements de la tête par rapport à la normale peut conduire à une diminution de la conscience de la situation et une augmentation de la charge de travail et aussi une réduction de la détection des cibles périphériques (Gauthier et al.,

1987 ; Guitton et al., 1986). L'autre conséquence est la modification des stratégies de coordination œil-tête (Sandor et Leger, 1991). Malgré le fait que l'utilisation de JVN réduise les performances de recherche visuelle dans l'environnement, le champ de vision requis pour la sécurité des vols en hélicoptère n'a pas été établi de manière définitive pour le moment (Wells et Venturino, 1990).

2.4. L'acuité visuelle

2.4.1. Condition normale

Un des aspects le plus important de l'expérience visuelle est notre capacité à discriminer des détails spatiaux fins d'un objet dans le champ visuel, celle-ci étant variable selon la position des objets dans le champ. Cette capacité à percevoir les détails est définie comme l'acuité visuelle, généralement exprimée comme l'inverse du plus petit angle visuel que l'opérateur peut détecter (exprimé en minutes d'angle), pour un objet de contraste lumineux maximal (classiquement noir sur fond blanc). Cela signifie que, par exemple, si un réseau noir et blanc est assez fin, il n'est pas possible de le distinguer d'un champ uniformément gris.

L'acuité ne peut être mesurée directement mais on va évaluer le plus petit angle visuel détectable. De la Hire (1711) a « calculé que la finesse limite de la vision était de 1/800 pied sur la rétine », ce qui correspond à un réseau avec des raies sous tendant une acuité visuelle de 2,86 cycles par milliradian (cy/mrad). Le Grand (1975) attribue cette limite à la structure de la rétine. Des études plus récentes ont mis en évidence les limitations imposées par l'appareil optique qu'est l'œil mais aussi par les facteurs neuronaux. Il apparaît que, en condition normale de vision, la limite d'acuité visuelle de l'œil humain, due à des facteurs optiques, est proche de celle rapportée par De la Hire c'est-à-dire 3,45 cy/mrad. Au-delà de ce seuil, l'œil ne peut percevoir les détails. En condition photopique, les humains sont capables de résoudre des détails fins de moins de 1,76 cy/mrad.

L'acuité peut être évaluée de différentes façons avec trois principales méthodes de mesure :

- la mesure de résolution, c'est-à-dire des opérations de séparation entre 2 stimuli ponctuels ou rectilignes. Il s'agit là de traitement dans le domaine fréquentiel alors que les deux premiers types de mesures sont plutôt de l'ordre de l'évènement spatial unique ;
- la détection d'un point noir, d'une fente noire sur un fond clair, etc. ;
- la reconnaissance d'objets ou de formes, typiquement les mesures réalisées en clinique avec des optotypes.

De nombreux facteurs peuvent influencer la valeur de l'acuité visuelle (Maille, 1999 ; Buser et Imbert, 1987 ; Thomas, 1975):

- le niveau d'illumination ;
- le diamètre de la pupille ;
- l'excentricité sur la rétine ;
- le type de stimuli et l'orientation ;
- la distance d'observation ;
- le niveau d'adaptation à l'obscurité.

Nous verrons dans le paragraphe suivant l'importance de la notion de contraste.

La dimension importante d'un réseau, ou d'un optotype, est sa fréquence spatiale, généralement exprimée en termes d'angle visuel que sous-tend le stimulus (soit des cycles par milliradian (cy/mrad)). Campbell et Robson (1968) ont montré que l'information visuelle est analysée par un certain nombre de canaux sensibles chacun à une gamme limitée de fréquences spatiales, appelés canaux fréquentiels. Les basses fréquences sont impliquées dans la perception des formes globales de la scène tandis que les hautes fréquences spatiales participent à la description des détails fins présents dans l'image (figure 28) (Giraudet et Roumes, 2001).

Figure 28 : contenu fréquentiel d'une image complexe

Une image complexe (au centre) est constituée de basses fréquences spatiales (à gauche) et de hautes fréquences spatiales (à droite) (Hughes, 2001)

Cependant, ces résultats sont issus d'études sur la détection de réseau de type sinusoïdal. L'étude de la fonction de sensibilité aux contrastes a montré que le système visuel humain possède un maximum de sensibilité pour les fréquences entre 2 et 4 cpd (De Valois et De Valois, 1988 in Buffat, 2007). Elle diminue pour les basses et hautes fréquences spatiales. Cependant, la compréhension des informations apportées par les fréquences spatiales dans la perception va au-delà. Nous verrons cela dans le paragraphe 3.

2.4.2. Condition dégradée

Bien que les avancées technologiques de ces dernières années dans le domaine des tubes intensificateurs de lumière soient assez importantes (McLean et Rash, 1999), l'acuité visuelle résultante est encore inférieure à celle obtenue en condition photopique. L'acquisition de cibles est la première tâche de l'opérateur et une diminution de son acuité signifie qu'il va réaliser cette tâche à des distances plus courtes (McLean et Rash, 1999). Selon les générations, il existe des valeurs d'acuité visuelle limite acceptable (c'est-à-dire à atteindre en contraste maximum) : ces standards sont fixés à 0,59 cy/mrad pour les GEN II et à 0,88 cy/mrad pour les GEN III. Actuellement, les effets de la luminance et du contraste sur les performances d'acuité visuelle sont bien connus. L'acuité visuelle diminue quand le niveau d'illumination diminue (Kotulak et Rash, 1992 ; Wiley ; 1989) et Rabin (1992, 1993, 1994a, 1994b, 1995, 1996) a réalisé une exploration importante de l'impact de la diminution du contraste d'un objet sur l'acuité visuelle des opérateurs.

Les détails des objets nous aident à reconnaître ou identifier les objets plus qu'à les détecter. L'identification visuelle de plates-formes, de cibles avec une signification militaire, des obstacles du terrain est fondamentalement une tâche humaine et la meilleure acuité visuelle possible est toujours un avantage pour la réalisation de ces tâches (Donderi, 1994).

2.5.Contraste de luminance et sensibilité au contraste

2.5.1. Condition normale

Le contraste de luminance exprime la capacité du système visuel à détecter des différences de luminance, c'est-à-dire à déterminer l'existence de bords entre des surfaces homogènes. Classiquement, le contraste (c) est exprimé comme le quotient de la différence entre la luminance de l'aire lumineuse (Lmax) et la luminance de l'aire sombre (Lmin) sur la somme de ces deux luminances :

$$c = (Lmax - Lmin) / (Lmax + Lmin)$$

Il varie entre 0 et 1. Le contraste est nul lorsque Lmax = Lmin. Le contraste est maximal lorsque Lmin = 0. La différence relative entre les deux valeurs de luminance peut être aussi utilisée et elle est définie comme le rapport de contraste. Que ce soit le contraste ou le rapport de contraste, ils sont tous les deux exprimés sans unité.

Les contrastes les plus faibles sont plus difficiles à discerner. Le contraste minimal est, pour une fréquence spatiale donnée, la plus petite valeur de contraste nécessaire pour permettre de détecter cet objet. L'inverse du contraste minimum nécessaire pour détecter l'objet est appelé seuil sensibilité au contraste. La sensibilité peut être définie comme l'inverse du contraste

minimum entre une zone claire et une zone plus sombre qui peut être détecté. En dessous de cette valeur, les deux zones semblent homogènes. Pour évaluer la sensibilité au contraste, différentes mires peuvent être utilisées : des mires avec des variations de luminance sinusoïdales ou des variations périodiques non sinusoïdales. Dans le premier cas, la sensibilité au contraste dépend de la fréquence spatiale de la mire utilisée. Dans le second cas, le contraste est souvent exprimé comme dans la première équation et on parle classiquement de contraste de Michelson. La sensibilité au contraste est aussi exprimée par détermination du seuil de détection du contraste (Cs) :

$$Cs = 1 / c$$

Plus la sensibilité au contraste d'un observateur est grande, plus la quantité minimum de contraste qui peut être détectée est petite.

Il existe plusieurs facteurs qui influencent la perception du contraste de manière importante tels que :

- le contraste simultané ;
- les fréquences spatiales ;
- le niveau d'illumination.

Le facteur le plus important est le niveau de contraste de plages contiguës. Il est important de prendre en considération le phénomène de **contraste simultané**, c'est-à-dire qu'une plage donnée, de luminance fixe, apparaît plus ou moins lumineuse selon qu'elle est contiguë à une région elle-même plus ou moins lumineuse (figure 29) (Chevreul, 1839). Ceci peut être expliqué par les mécanismes visuels de bas niveau d'inhibition latérale, où les bordures des champs récepteurs excitent ou inhibent la stimulation du centre de structure centre – ON ou centre – OFF.

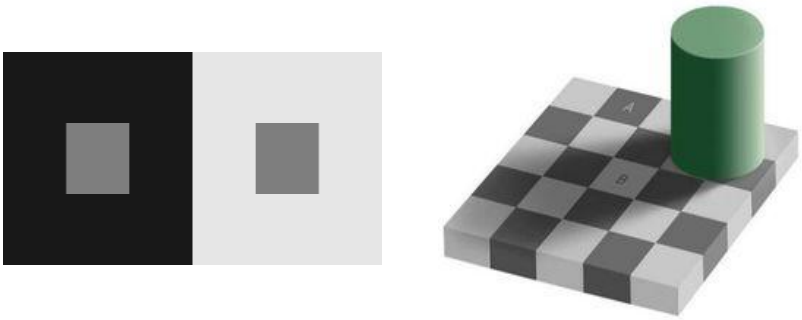


Figure 29 : contraste simultané

A : La zone rectangulaire centrale a la même luminance mais les changements de luminance dans la zone extérieure changent la luminance perçue dans le rectangle central).
B : Echiquier d'Adelson (1995). Les carrés A et B semblent être de couleur différente alors qu'en réalité, ils sont de la même couleur. Cet effet est encore plus visible sur la figure de droite où la teinte grise de la barre du milieu est la même sur toute sa longueur.

Les régions d'intensité lumineuse constante génèrent peu d'information, le cerveau extrapole entre les contours: c'est la base de l'économie du traitement des informations.

Le second facteur essentiel est le contenu en fréquences spatiales. Les individus présentent des différences de sensibilité au contraste selon les fréquences spatiales. Les hautes fréquences spatiales caractérisent la sensibilité aux petits angles visuels et aux détails. Les fréquences plus faibles caractérisent la reconnaissance des formes dans des conditions dégradées ou de flou. Les basses fréquences caractérisent souvent la vision d'images qui sont dégradées par la pauvre résolution d'un capteur. Le seuil de sensibilité au contraste varie en fonction du domaine de fréquences spatiales. Les études sur la sensibilité au contraste (De Palma et Lowry, 1962 ; Patel, 1966 ; Robson, 1966 ; Van Nes et Bouman, 1967 ; Campbell et Robson, 1968 ; Watanabe et al., 1968 ; Sachs et al., 1971 ; Van Meeteren and Vos, 1972 ; Howell et hess, 1978 ; Virsu et Rovamo, 1979 ; Carlson, 1982 ; Rovamo et al., 1992 ; Rovamo et al., 1993) ont toutes permis de tracer des courbes de sensibilité au contraste (c'est-à-dire la variation du contraste en fonction des fréquences spatiales). En condition photopique, elles montrent un maximum de sensibilité de l'œil pour les moyennes fréquences spatiales, entre 2 et 4 cy/deg. Pour les hautes et les basses fréquences, la sensibilité diminue. Menu (1986) met en évidence que la sensibilité aux contrastes est maximale pour le domaine des fréquences spatiales moyennes, c'est-à-dire entre 0,06 et 0,3 cy/mrad.

Le troisième facteur important est le niveau d'illumination. Les bas niveaux de lumière réduisent la sensibilité de manière significative (Patel, 1966 ; Van Nes et Bouman, 1967 ; Van Meeteren and Vos, 1972) et de manière plus importante pour les hautes fréquences spatiales que pour les basses fréquences spatiales.

Les variations de luminosité, comme la détection de contraste de couleur et les différences de texture, sont des éléments pour la distinction des bords, discontinuités ou ponts dans les scènes visuelles.

2.5.2. Condition dégradée

La technologie d'intensification de lumière, utilisée dans les systèmes de vision nocturne, conduit à une dégradation de la luminance et du contraste par rapport aux conditions photopiques, et ceci pour tous les domaines de fréquences spatiales. Hughes (2001) présente une comparaison des performances d'acuité visuelle en fonction du contraste et selon le niveau de luminance. Il y a une diminution de la sensibilité aux contrastes (figure 30) quand le niveau d'illumination diminue. Rabin (1993) montre ainsi que la sensibilité aux contrastes

est deux fois moins importante avec des JVN que sous des conditions comparables, sans système de vision nocturne.

En général, la réduction de la sensibilité aux contrastes est plus importante dans le domaine des hautes fréquences spatiales que dans celui des basses fréquences, donc la perception d'information de détail peut être difficile en condition de faible contraste. Dans les conditions optimales de luminance lors de l'utilisation de DVN (pleine lune), avec les systèmes les plus récents, la résolution maximale est d'environ 1,2 cy/mrad. Dans des conditions de faible luminance (avec les étoiles comme source de lumière), cette résolution peut chuter à 0,3 cy/mrad.

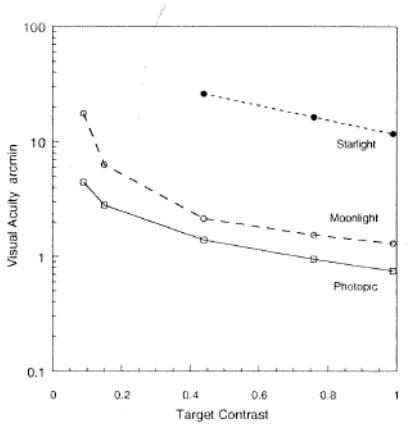


Figure 30 : acuité visuelle en fonction du contraste de la cible

L'acuité visuelle en condition naturelle photopique est comparée aux situations de vision au travers de JVN en condition de luminance de pleine lune ou nuit étoilée (Hughes, 2001)

Les fréquences supérieures à ces valeurs sont « invisibles » au travers des DVN, alors que l'humain est capable de résoudre des fréquences spatiales jusqu'à 2,5 cy/mrad (Farrell et Booth, 1984) dans les conditions photopiques. Cette diminution de la sensibilité aux contrastes a aussi un impact sur l'exploitabilité des images et la difficulté à distinguer des caractéristiques du terrain et les ruptures dans le relief.

2.6. Conclusion sur le traitement sensoriel

La perception visuelle est perturbée par l'utilisation de DVN à intensification de lumière par rapport à la vision de jour. Les images obtenues sont dans les dégradés de vert, dans un champ visuel restreint, avec des images moins contrastées et contenant principalement des basses et moyennes fréquences spatiales. Mais, par rapport à la vision de nuit non aidée, ces DVN permettent aux pilotes d'hélicoptère d'accéder à plus d'informations et de se construire une représentation de leur environnement. Cette représentation est différente de celle qu'ils se sont

construite au cours de leur expérience sensorielle mais ils sont capables de transférer l'apprentissage initial sur ces « nouvelles images ».

Nous allons ci-après expliquer les mécanismes de traitement et d'analyse cognitive de ces informations visuelles, en condition normale et lors de l'utilisation de DVN.

3. Traitement cognitif en conditions normale et dégradée

Les équipages d'hélicoptère qui utilisent des dispositifs de vision nocturne (DVN) sont amenés à développer des compétences spécifiques pour le traitement de ces nouvelles informations de l'environnement, surtout pour détecter, reconnaître, identifier des objets, le relief afin de se déplacer et d'éviter les dangers potentiels dans cet environnement. Il est donc normal de se demander quels sont les mécanismes de traitement cognitif des informations visuelles essentielles pour ces tâches, c'est-à-dire :

- la perception et la reconnaissance des formes ;
- l'accommodation et la convergence ;
- la perception de la profondeur et des distances ;
- la perception des pentes.

Tout comme dans la partie précédente, nous présenterons les mécanismes dans les conditions normales et dans les conditions dégradées, correspondant à l'utilisation de DVN. Puis, nous expliquerons les théories de la constitution des représentations et l'application de ces théories pour les pilotes utilisant des DVN. Nous montrerons enfin l'importance de l'expertise dans l'utilisation des DVN et, plus précisément, dans l'exploitation et le traitement des images issues de ces systèmes.

3.1. La perception et la reconnaissance des objets

3.1.1. Condition normale

3.1.1.1. La perception visuelle

Le système visuel utilise les relations entre les segments de contour visibles pour guider la segmentation de la scène perceptive et dériver la forme de l'objet. Il utilise aussi les relations de surfaces pour établir une continuité de surface (Kellman, 2003). La perception des objets implique un grand nombre de traitements distincts. Kellman (2003) propose un modèle schématique de la perception visuelle des objets avec les processus, représentations et interactions mis en jeu (figure 31).

Interpolations des contours

La partie du traitement des contours va localiser les discontinuités de luminance, de couleur, de texture, de profondeur et de mouvement afin d'identifier les bords et les jonctions. Ceci correspond à l'extraction des caractéristiques et propriétés visuo-spatiales élémentaires,

appelées primitives visuelles, traitement effectué en parallèle. Selon le modèle de Cavanagh (1989), ces primitives peuvent être classées en trois ordres :

1. luminance et couleur ;
2. texture, disparité binoculaire, mouvement ;
3. orientation, taille, courbure, terminaison de ligne, intersection de ligne, …

Le modèle de traitement de l'information visuelle proposée par Treisman (1980) comprend deux niveaux de traitement principaux :

- Le premier correspond au traitement automatique et non conscient de tout le champ visuel, sans focalisation de l'attention sur une zone particulière de l'image. Ce niveau de traitement pré-attentif ;
- Le second nécessite par contre un balayage séquentiel du champ visuel, afin de focaliser l'attention sur telle ou telle partie de la scène visuelle.

Le traitement pré-attentif correspond à l'extraction de ces primitives visuelles permettant la détection des bords et jonctions.

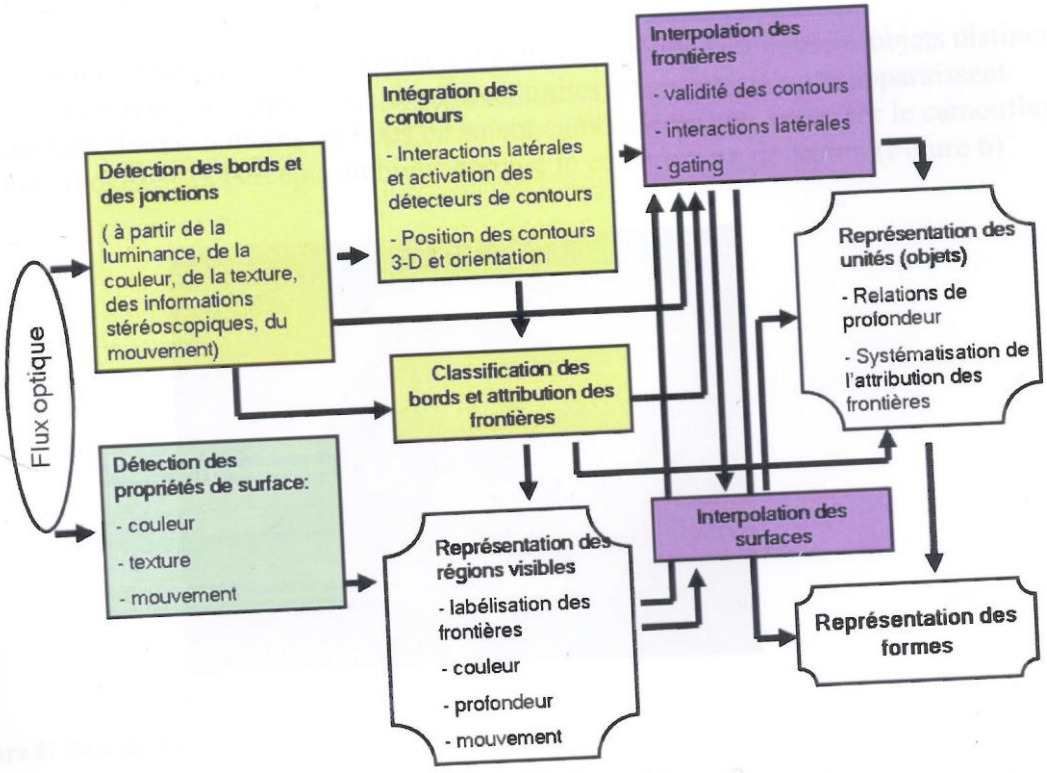


Figure 31 : schéma de principe de la perception visuelle des objets
(Buffat, 2007, d'après Kellman, 2003)

Cette perception globale et synthétique est une des bases de la théorie de la Gestalt selon laquelle la perception d'un ensemble signifiant précède celle de ses parties et propriétés. Cela

implique que nous sommes capables de reconnaitre différentes images dans une variété de conditions, incluant différents niveaux d'éclairement, parce que les relations spatiales entre les composants de l'image sont conservées dans notre cerveau qui analyse l'image.

Nous avons des tendances de base à organiser tout ce que nous voyons. Les psychologues du courant gestaltiste ont identifié des principes spécifiques d'organisation perceptuelle. Les théoriciens gestaltistes, notamment Wertheimer (1923) ont mis en évidence plusieurs autres types de mécanismes de groupement spontané d'éléments ou de composants, appelé regroupement perceptif :

1. La proximité : des points relativement proches peuvent constitués ensemble une forme ;
2. La similitude (ou similarité) de couleur, de luminance, de taille ;
3. Le sort commun : tendance à regrouper les éléments qui se déplacent ensemble, dans la même direction, à la même vitesse ;
4. La bonne continuation (ou bonne figure) : tendance à regrouper dans une même structure les parties ou unités qui semblent être des continuations les unes des autres.

La fermeture, qui permet de regrouper les éléments qui constituent ensemble une entité fermée plutôt qu'ouverte (Koffka, 1935).

Deux autres principes sont apparus après Westheimer (Perkins, 1932). Le premier est qu'une région uniforme aura tendance à être considérée comme représentant un même objet. Il s'agit de la continuité ou phénomène de liage que l'on observe dans les phénomènes de contours illusoires (Kanizsa, 1979, Kellman et Louksides, 1987). Le principe de complétion amodale indique que les éléments contenus dans une structure qui suggère une région seront groupés, même si d'autres lois de la Gestalt s'opposent à ce groupement. Le système visuel est capable de traiter ces objets occlus comme des objets complets uniquement après une certain temps de traitement et cette complétion (Ringach et Shapley, 1996 ;Sekuler, Gold, Murray et Bennett, 2000).

Certains principes régissent le regroupement de certaines parties de stimulus pour former un objet reconnaissable, reléguant les autres parties de la scène au statut de fond. Cette distinction figure (ou objet) versus fond est continue. Les termes « figure » et « fond » sont apparus dans le lexique commun, mais ils sont souvent simplement compris comme différentiant l'objet qui se détache (la figure) de l'ensemble des objets qui se situent à l'arrière-plan (le fond). Dans le simple cas d'une forme noire sur un fond blanc, la ségrégation figure-fond devrait être facile à réaliser, même s'il reste encore à comprendre comment on en arrive à déterminer quelle partie constitue le fond et quelle partie la forme. Mais, dans la

réalité, la situation est plus complexe, les images sont souvent interrompues par des obstacles, confondues dans des environnements chargés eux-mêmes d'informations. La perception des objets exige un des portions d'images appartenant à l'objet, tout en arrivant à les dissocier de celles qui constituent le fond. La différentiation figure-fond est seulement un type d'organisation imposée par le cerveau à des configurations de stimulation, même si elle reste le processus le plus important de la vie quotidienne dans la perception de la forme.

La distinction figure-fond correspond à la définition la plus élémentaire et la plus primitive de la forme perceptive. Ce processus fondamental a été décrit par Rubin (1921) qui a défini que la figure se caractérise par certains traits phénoménaux qui la distinguent du fond (la figure a un caractère d'objet, elle paraît plus proche que le fond, le fond semble se continuer derrière la figure, le contour appartient à la figure).

Rubin (1921) a aussi défini cinq caractéristiques objectives du stimulus influant sur la sélection figure-fond (figure 32).

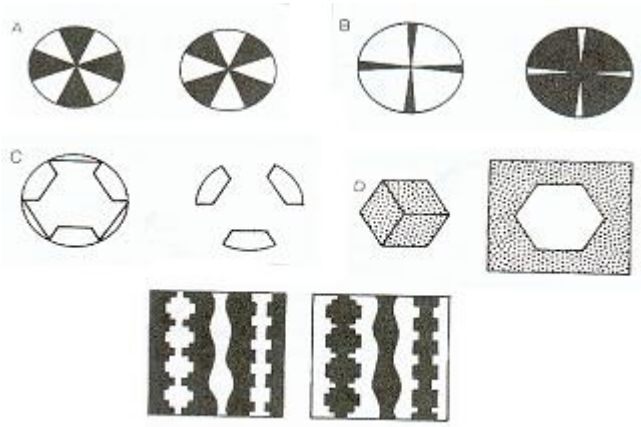


Figure 32 : influences objectives sur la sélection figure-fond

A: l'orientation est la préférence pour la verticalité ou horizontalité plutôt que pour l'oblique; B: la grosseur implique que les formes les plus petites sont préférentiellement définies comme figure; C: une figure incluse (ou circonscrite) a plus de chance d'être définie comme figure; D: l'articulation signifie qu'une même forme avec ses composants internes sera perçue comme figure alors que la même figure sans éléments internes sera perçue comme fond; E: les formes symétriques sont spontanément perçues comme figure. (Rubin, 1921)

Mais il existe d'autres facteurs subjectifs jouant un rôle essentiel sur la perception visuelle des formes, notamment l'expérience antérieure (Leeper, 1935), comme présenté dans la figure 33.

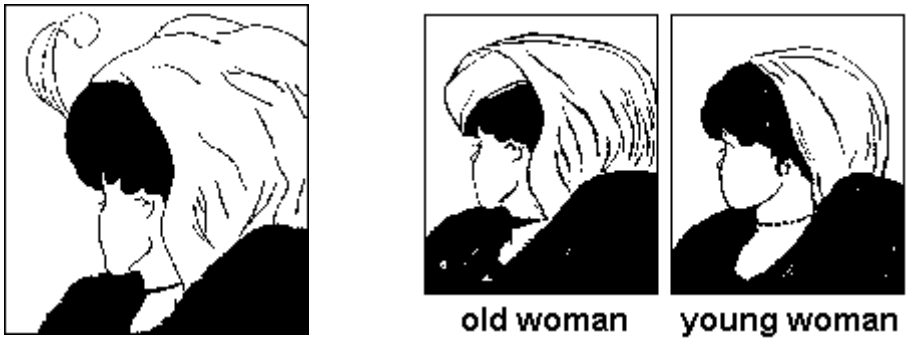


Figure 33 : effets de l'expérience antérieure

La figure peut être perçue comme une jeune femme ou comme une vieille dame. La mémoire joue un rôle prépondérant. Si on la stimule sélectivement par des récits préalables de contes romantiques ou de vieilles sorcières, la perception sera différente (Leeper, 1935)

Interpolation des surfaces

L'interpolation des contours n'est pas le seul processus permettant de relier les éléments de surface visible (Kellman, 2003). Les surfaces jouent un rôle important et complémentaire à l'intégration perceptive des contours.

Aires corticales impliquées

Des travaux réalisés chez le singe macaque ont permis de mieux identifier son organisation et son fonctionnement (Felleman et Van Essen, 1991). Von de Heydt et Peterhans (1989) ont montré que ce sont les neurones de l'aire V2 qui sont sensibles aux illusions et aux contours subjectifs tandis que les cellules de l'aire V1 encodent plutôt les informations de contours définies par les variations de luminance.

Des observations initiales sur l'aire V4 ont montré que les cellules sont sélectives de la couleur (Zeki, 1993). Mais certaines de ces cellules sont sensibles à l'orientation de barres lumineuses (comme V1) ou présentent des réponses similaires à celles des neurones de V2. Il n'existe pas de réelle cohérence dans les résultats.

Les aires inféro-temporales (IT) qui constituent la dernière étape dans le traitement des formes, les neurones de cette aire répondent à une variété de formes et de couleurs (Komatsu et Ideura, 1993, in Wurtz et Kandel, 2000). Ils peuvent aussi coder des formes complexes (Kobakate et Tanaka, 1994, in Wurtz et Kandel, 2000) et même des objets entiers (Pasupathy, 2006, in Buffat, 2007)

3.1.1.2. Les théories de la reconnaissance visuelle des objets

Au cours des premières étapes de traitement, le système visuel extrait un ensemble de caractéristiques locales (orientations, contours par exemple) de l'image rétinienne, considérée

comme une distribution spatiale de luminance. La reconnaissance d'un objet suppose alors une sorte de comparaison entre cette description et une représentation structurale de l'objet. Nous présentons ici deux types de théories courantes sans choisir si l'une ou l'autre est correcte.

Les théories des traits proposent qu'un stimulus visuel est composé d'un petit nombre de caractéristiques ou composants, chacun étant appelé trait distinctif (Matlin, 2005). Par exemple, pour reconnaître les lettres de l'alphabet, Gibson (1969) propose que nous stockons les caractéristiques sur la présence de courbes, de lignes droites, de diagonales, etc. Ces données sont compatibles avec les données neurophysiologiques de Hubel et Wiesel (1965, 1979) qui ont mis en évidence que les neurones du cortex visuel primaire déchargent en présence de lignes lumineuses selon des orientations variables. Les cellules du cortex sont des détecteurs de l'orientation permettant d'identifier certains traits des objets. Cependant, cette théorie ne décrit pas les relations entre les éléments mais uniquement les traits de ceux-ci. De plus, pour des objets plus complexes (objets en 3 dimensions), cela signifie qu'il faut considérer toutes les traits de cet objet ce qui sera une tâche plus difficile que pour des lettres (Palmer, 1999 ; Vecera, 1998). La théorie présentée ci-après constitue une explication sur la reconnaissance de ce type de stimuli plus complexes que nous rencontrons dans notre vie quotidienne.

La distribution spatiale de luminance que constitue l'image rétinienne pourrait être décrite sous la forme d'un spectre bidimensionnel de fréquences spatiales (Bonnet, 1994). Dans une certaine mesure, l'essentiel des traitements visuels précoces de la forme est assimilable à un filtrage (analyse) de fréquences spatiales (Bonnet, 1989a). Le format de stockage des représentations structurales de la forme des objets est de nature fréquentielle pour la reconnaissance qui consiste en un appariement de l'information fréquentielle extraite avec une information fréquentielle stockée. S'il y a appariement, la reconnaissance est effective. Si ce n'est pas le cas, l'objet ne sera pas reconnu.

Les théories structurelles soulignent les relations entre les traits. Par exemple, la lettre H est formée de deux barres verticales connectées en leur milieu par une barre horizontale. Mais passer d'un monde bidimensionnel de symboles à un monde tridimensionnel d'objets entraîne un surcroit de complexité pour identifier et décrire les relations entre les traits. Décrire les objets tridimensionnels en relevant chaque courbe et chaque ligne est assez compliqué. Il serait plus aisé de les décrire en termes de volumes simples tels que des cubes, cylindres, cônes. Biederman (1985) a proposé qu'il existe 35 volumes appelés géons nécessaires pour décrire les objets du monde. D'autres auteurs supposent cependant que ces informations

servent à activer un code structural, une sorte d'alphabet de formes (les géons) permettant l'accès aux représentations structurales des objets. Il y aurait ainsi une étape intermédiaire entre les codages locaux des caractéristiques des formes et l'accès aux représentations structurales des objets.

L'idée présente de grandes similarités avec les modèles d'accès au lexique (Segui, 1989 ; Grainger et Segui, 1990). Les informations de contour présentes dans la stimulation et leur disposition spatiale permettent d'activer certains d'entre eux. Le format de stockage de la représentation structurale d'un objet serait un ensemble donné de géons ainsi que leurs relations spatiales. L'intérêt d'un tel modèle est que l'ensemble des géons nécessaires à une description complète de l'objet peut être supérieur à l'ensemble de ceux qui sont activés par la forme présentée (il y a, par exemple, des parties cachées, non visibles). Il suffit que cet ensemble de géons et leur disposition spatiale respective ne soient compatibles qu'avec un seul objet pour que cet objet soit reconnu.

Cependant, les objets sont moins bien reconnus quand les objets sont présentés d'un point de vue non usuel (O'Reilly et Munakata, 2000). Buffat (2007) montre que la reconnaissance d'un objet est plus facile et plus rapide lorsque l'objet est présenté selon un certain point de vue que selon d'autres. Un tel résultat se comprend parfaitement dans un modèle de reconnaissance par composants structuraux. Ce point de vue correspond à celui qui permet de «voir» l'assemblage des géons le plus caractéristique de la forme donnée de l'objet. De même, on comprend que des objets cylindriques observés juste dans l'axe de leur section ne soient généralement pas identifiables : leur image est celle d'une série de surfaces circulaires concentriques et elle est structurellement compatible avec les représentations de très nombreux objets. La reconnaissance et l'identification des objets mettent en jeu la mémoire à long terme. Reconnaître un objet à partir de sa seule présentation visuelle consiste alors à retrouver, à partir des informations visuelles de forme, la représentation d'objet qui correspond au mieux à cet ensemble d'informations.

3.1.2. Condition dégradée

Lors de l'utilisation des DVN, les tubes IL vont dégrader la qualité des primitives visuelles et les mécanismes décrits précédemment pour la reconnaissance des objets ne sont pas tout à fait valables. Quand un objet ne peut être reconnu, il existe d'autres types d'informations pertinentes à prendre à compte pour l'identifier.

Kosslyn (1995) met en évidence quatre types d'informations pertinentes pour reconnaitre un objet, quand les conditions de vision sont dégradées :

- le mouvement et le déplacement de l'objet ;
- les parties constituantes de l'objet ;
- les propriétés spatiales de l'objet ;
- les contours de l'objet.

3.1.2.1. Mouvement, déplacement

Chaque objet a une manière typique de se mouvoir (Cutting et Proffitt, 1981). Ces particularismes permettent de définir les limites et les « régions » d'un objet (les gestaltistes parlent d'une « loi du destin commun »). Cutting et Proffitt (1981) utilisent une technique qui consiste à placer des lumières au niveau des articulations d'une personne en activité de marche, par exemple, tandis que la pièce est éteinte. Tous les indices de familiarité permettant la reconnaissance sont supprimés afin d'identifier le genre de la personne en activité. Il y a dégradation des informations visuelles. Dès que l'objet (ici la personne) bouge, même si l'image est dégradée, on peut percevoir la structure en trois dimensions de l'objet par son mouvement.

3.1.2.2. Parties constituantes

On peut reconnaître un objet en ne voyant qu'une partie de celui-ci, décomposable elle-même en d'autres parties. Souvent une partie donnée d'un objet représente plus qu'une autre partie à cause de la structure hiérarchique de l'objet (la main représente aussi les doigts et les ongles par exemple).

Nous tentons de faire correspondre un schéma global avec un objet mais pas toujours avec ses parties individuelles qui le constituent. Si l'image est dégradée, de sorte que le schéma global ne peut être atteint, alors ce sont les parties individuelles qui sont utilisées. Biederman et Cooper (1991) ont montré que la présence d'une partie spécifique d'un objet est suffisante pour l'identifier.

3.1.2.3. Propriétés spatiales

Les propriétés des stimuli qui permettent aux figures d'être séparées du fond définissent souvent les parties de l'objet, si la résolution est bonne. On reconnaît plus facilement un dessin qui contient des propriétés non accidentelles ou de base qu'un dessin qui ne fait pas apparaître une de ces propriétés. Les propriétés spatiales d'un objet peuvent être utiles pour le reconnaître (Cave et Kosslyn, 1993). Pour permettre l'identification, les propriétés spatiales doivent caractériser l'objet et ses parties mais pas l'image elle-même. Giraudet et Roumes

(2004) ont aussi mis en évidence l'importance des propriétés spatiales dans les reconnaissances d'objets dans des images dégradées. Pour ces auteurs, ceci traduit la flexibilité du système visuel capable, dans ces conditions, d'extraire les traits distinctifs locaux de la cible.

3.1.2.4. Contours de l'objet

Lorsque les contours d'un objet ne sont pas permanents, l'absence de ce contour physique de délimitation perceptif permet de générer un autre type de contours plus ou moins diffus (car moins délimité) rendant possible l'association d'une forme à l'objet.

3.2. La perception de la profondeur et des distances

Avant de préciser les mécanismes de perception de la profondeur et des distances, nous avons choisi de développer les problématiques liées aux phénomènes d'accommodation et de convergence, qui pourraient être modifiés dans les systèmes de type 2 avec les capteurs IL déportés sur les côtés.

3.2.1. L'accommodation et la convergence

3.2.1.1. Condition normale

La focalisation de l'image est déterminée en continu (activité réflexe), en fonction de la zone où l'observateur fixe le regard. L'accommodation (A) est le processus monoculaire par lequel les changements dans le pouvoir dioptrique du cristallin (c'est-à-dire sa capacité à sa contracter ou à se décontracter) permettent la formation d'une image nette sur la fovéa (Ciuffreda, 1991). Le stimulus primaire de l'accommodation est le flou rétinien (Phillips et Stark, 1977) et la réponse accommodative est exprimée en dioptrie ou en mètres (inverse de la dioptrie). Pour un œil emmétrope, l'accommodation de repos est comprise entre 58 et 67 cm (Leibowitz et Owens, 1975b et 1978, in Wolfe et O'Connell, 1987).

La vergence (V) peut être définie comme le mouvement des yeux dans des directions opposées (Westheimer et Mitchell, 1969) et c'est donc un processus binoculaire : la fixation d'un point de l'espace visuel par les deux yeux suppose que leurs lignes de regard se rejoignent en ce point pour fusionner les deux images rétiniennes. Le stimulus visuel primaire de la convergence est la disparité rétinienne (Stark, Kenyon, Krishnan et Ciuffreda, 1980) et dans ce cas, il s'agit d'une disparité croisée. Le système de vergence est composé de quatre éléments (Maddox, 1893 ; Morgan, 1980) :

- la vergence accommodative, produite par le flou rétinien, comme une réponse synesthésique au système accommodatif ;
- la vergence fusionnelle, aussi connue sous le nom de vergence de disparité ;
- la vergence tonique, correspondant à l'état de repos de l'œil ;
- la vergence proximale, quand le sujet est conscient de la présence d'un objet proche.

En vision normale, accommodation et convergence sont dépendantes de la distance à l'objet et forment un complexe « synesthésique » (Sabin et Ogle, 1958), reflétant en partie leur innervation commune (figure 34).

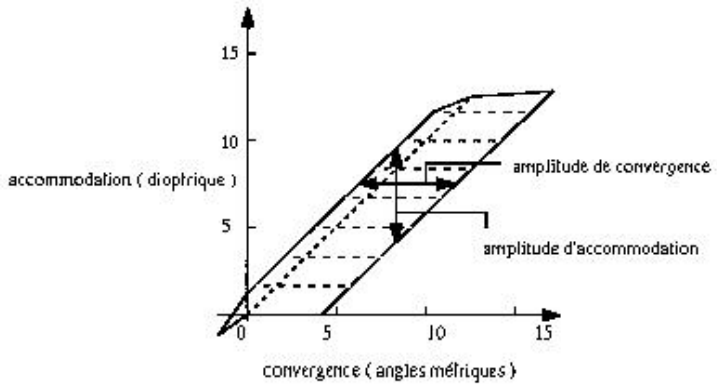


Figure 34 : relation physiologique entre accommodation et convergence

Le mouvement de convergence s'effectue par la contraction coordonnée des muscles extrinsèques de l'œil et est accompagné d'une contraction du muscle ciliaire déterminant l'accommodation correcte pour la distance à laquelle les axes visuels convergent. Il s'établit alors une association physiologique intime des mouvements d'accommodation et de convergence (d'après Gao, 1992)

Due à leurs interconnections, la stimulation de l'une entraîne la réponse de l'autre[7] et la relation liant ces deux phénomènes est linéaire (Alpern et Ellen, 1956 ; Fincham et Walton, 1957). Le mouvement de convergence s'effectue par la contraction coordonnée des muscles extrinsèques de l'œil et est accompagné d'une contraction du muscle ciliaire déterminant l'accommodation correcte pour la distance à laquelle les axes visuels convergent. Il s'établit alors une association physiologique intime des mouvements d'accommodation et de convergence. Pour une bonne acuité visuelle, le système accommodatif maintient la vision nette, par contrôle du tonus des muscles ciliaires du cristallin, tandis que le système de convergence maintient la vision d'une seule et unique image, par contrôle des lignes de regard des yeux. La stimulation optique de l'accommodation modifie la convergence (Alpern et

[7] En l'absence de tout stimulus, vergence et accommodation ont, respectivement, des valeurs résiduelles de –1 à 1 MA (mètres d'angle) et 0.75 à 1.5 D (dioptries).

Ellen, 1956) tandis que la disparité stimule la vergence qui modifie l'accommodation (Fincham et Walton, 1957).

Autour de la relation linéaire, il existe une gamme de variation indépendante de ces phénomènes : ceci permet une certaine amplitude de chaque phénomène appelée dissociation. Au-delà de cette limite, le confort visuel est dégradé et peut se traduire par une perte d'acuité visuelle. Le changement d'accommodation est plus réduit que le changement de vergence : néanmoins, sur une gamme considérable, le sujet a une vision claire, même pour détecter l'ouverture d'objets sous-tendant un angle de 1 minute. Quand la différence entre la vergence et l'accommodation obtenue au-delà de la gamme de tolérance, l'objet apparait flou au sujet, malgré des nouveaux changements de vergence provoquant des changements d'accommodation. Les limites sont atteintes quand aucun nouveau changement de la même direction de vergence ne peut être produit (Fincham et Walton, 1957).

3.2.1.2. Condition dégradée

Dans les DVN de type 1, la distance de focalisation de l'image, qui conditionne la distance d'accommodation, est déterminée par le sujet qui règle les oculaires de manière personnelle. Cela permet à l'observateur de ramener le plan de focalisation à la distance qui lui semble la plus confortable. La dissociation accommodation-vergence est assez réduite et rentre dans le domaine des limites de confort visuel. L'inconvénient de ce principe est que le pilote doit maîtriser la technique d'ajustement des oculaires[8]. Des erreurs d'ajustement à une distance non adaptée vont dégrader l'acuité visuelle et entraîner un déséquilibre de la balance accommodation/convergence (Kotulak et Morse, 1994a). Les erreurs d'ajustement des oculaires des jumelles entraînent une augmentation de l'accommodation tandis que la convergence n'est pas modifiée.

Dans les DVN de type 2, en général, il n'y a pas de réglage personnalisé à l'oculaire. Seuls les réglages à l'objectif pour la mise au point sont possibles. Une distance de focalisation est fixée, cette distance étant considérée acceptable pour tous les utilisateurs potentiels. Parmi ces systèmes, nous nous sommes intéressés aux systèmes avec les capteurs placés de chaque côté de la tête. Dans ce cas, la distance d'accommodation ne varie donc pas puisque le pilote perçoit une image toujours placée à la même distance.

La présence de disparités nécessite par contre des mouvements de vergence pour obtenir une fusion des images droite et gauche dans le plan de fixation image, mouvements d'autant plus importants que les tubes IL sont surécartés. En général, le surécartement des capteurs induit

[8] Il s'agit de faire la mise au point de l'image afin qu'elle soit la plus nette possible.

une augmentation artificielle de l'écartement interpupillaire d'un facteur 4 (figure 35).Dans la littérature scientifique, l'augmentation de la séparation interoculaire est liée à l'hyperstéréoscopie. Celle-ci a été étudiée depuis les années 60 à l'aide d'un téléstéréoscope. Wallach (1963a ; 1963b), Fischer et Ciuffreda (1990), Fisher et Ebenholtz (1986), bien qu'en désaccord sur les mécanismes explicatifs de ce phénomène, relèvent, dans leurs études, une modification de la perception de la distance relative ou de la profondeur relative de l'objet observé. Ceci est dû à une dissociation des phénomènes d'accommodation et de convergence et donc une perturbation de la relation entre les deux phénomènes. Il y a une demande en convergence plus importante alors que l'accommodation reste constante (dans le cas du VDC). Ces mêmes auteurs ont aussi mis en évidence qu'une habituation perceptuelle à de tels réarrangements sensoriels peut se produire. L'explication plausible est qu'il existe des ajustements oculomoteurs et une « recalibration perceptuelle » qui combinent leurs effets sur la perception des distances et de la profondeur (Priot et al., 2007).

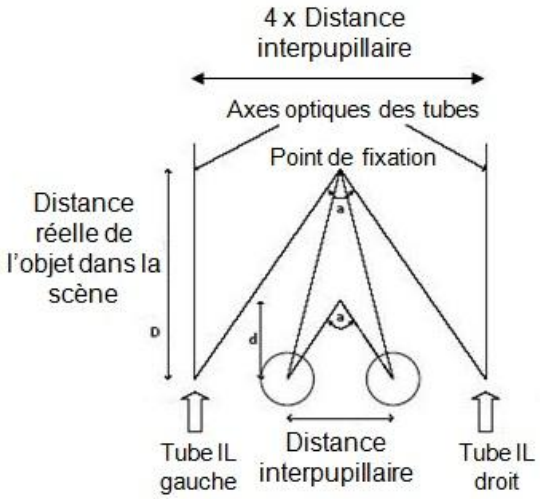


Figure 35 : dissociation accommodation/ convergence dans un VDC

La distance entre les tubes est plus grande que l'IPD. Un observateur fixant une cible à la distance D va accommoder selon cette distance mais il va converger comme si la cible était à la distance d (Priot et al., 2006)

Cependant, différentes études sur la distance la plus adaptée en cas de focalisation fixe ont mis en évidence que cette distance est inférieure à 10 m. Ainsi, Kotulak et Morse (1994b) ont testé des pilotes volontaires sur une tâche d'acuité visuelle, avec la possibilité de faire un ajustement personnalisé des oculaires, pour des mires localisées à 5,8 m. Cette étude a mis en évidence que, en moyenne, les sujets choisissent de se placer à environ 2 m. Dans l'étude de Task (2000) avec des jumelles panoramiques, l'optique utilisée oblige aussi à fixer une distance de focalisation unique des oculaires pour observer un objet placé à plus de 60 m. Ce

travail a mis en évidence qu'une distance de focalisation comprise entre 1 et 4 m semble raisonnable. Gleason et Riegler (2001) ont réalisé une étude sur l'effet de la focalisation des oculaires sur l'acuité visuelle dans le cas de mires placées à 6 m. Ils ont montré que, dans le cas d'une distance unique de focalisation des oculaires, la distance la plus appropriée à l'ensemble des utilisateurs est de 2 m.

3.2.2. La perception de la profondeur

3.2.2.1. Condition normale

L'individu est capable de se construire un certain nombre de connaissances sur l'organisation des objets de l'environnement, à partir des images rétiniennes (Shimon, 1992) avec l'aide de plusieurs types d'indices, monoculaires et binoculaires (Menu, Roumes et Plantier, 1990).
Les indices monoculaires proviennent de l'information issue d'un seul œil. Ces indices se composent de :

- L'occlusion qui correspond au recouvrement partiel d'un objet par un autre, entraînant une illusion de profondeur.
- La grandeur relative des objets, basée principalement sur l'interprétation de la perspective géométrique (ou perspective linéaire). Cette perspective est présente dans notre environnement naturel quand deux lignes parallèles convergent lorsqu'elles s'éloignent de l'observateur (exemple : rails de train). La grandeur relative peut être estimée de deux manières :
    - La hauteur relative qui permet d'estimer la distance des objets selon leur hauteur dans le champ visuel. Ainsi, plus l'objet est éloigné de l'observateur, plus l'image qu'il projette dans le champ visuel est haute.
    - La taille relative d'un objet qui peut également être impliquée dans l'estimation de la distance des objets : plus un objet est petit, plus il semble éloigné et inversement.
- La perspective atmosphérique (ou perspective aérienne) : la nature de l'air (vapeur d'eau, poussière, fumée) peut modifier la perception de la distance et des couleurs de l'environnement. Plus un objet est loin de l'observateur (sur de grandes distances), plus ses contours deviennent flous. C'est le cas par exemple lorsque nous sommes sur une montagne et que nous regardons dans le lointain.
- L'effet de la lumière et des ombres : en effet, les variations de lumière aux bords des objets sont un élément d'évaluation 3D des objets.

- L'effet de la parallaxe de mouvement : au cours d'un déplacement, la vitesse angulaire apparente d'un objet varie en fonction de la distance réelle ce qui donne un mouvement relatif apparent des objets les uns par rapport aux autres. Ce déplacement permet au sujet d'organiser l'environnement qui l'entoure selon différents plans.
- L'accommodation : le degré d'accommodation varie en fonction de la distance au point de fixation. Elle est nulle à l'infini et augmente au fur et à mesure que l'objet se rapproche. Cet indice est insuffisant en l'absence d'autres indices monoculaires pour l'évaluation de la distance relative des objets.

La perspective visuelle est l'ensemble des transformations par lesquelles une portion du monde spatial tridimensionnel est perçue par la surface bidimensionnelle et courbe de l'œil, indépendamment des propriétés stéréoscopiques de la vision binoculaire frontale. Elle est définie comme la projection par laquelle la dimension métrique des objets se trouve convertie en dimension angulaire. L'œil considéré individuellement (vision monoculaire) fonctionne comme une lentille stigmatique qui fait correspondre à chaque point de l'espace du cône de vision un point sur la surface rétinienne. Un même objet apparaît de façon différente à l'œil en fonction de trois paramètres :

- sa distance à l'œil,
- son excentration par rapport à l'axe du regard,
- son inclinaison dans les trois directions.

Au vu de la quantité importante d'éléments monoculaires fournissant des informations tridimensionnelles, il est légitime de se demander si cette somme est suffisante pour rendre compte de l'espace. Or, il est apparu que les indices monoculaires sont insuffisants pour rendre compte de l'espace et de la perception du relief. L'exemple des monophtalmes cité par Menu et al., (1990) permet de répondre à cette question. Un monophtalme est une personne qui n'y voit que d'un seul œil. Les causes sont multiples. Un monophtalme congénital est capable de mettre en place une représentation du monde réel assez bonne à partir d'éléments monoculaires du fait de la grande capacité d'apprentissage lors de l'enfance. Pour un individu devenant monophtalme à l'âge adulte, des difficultés dans la perception 3D apparaissent pour ensuite s'atténuer au fur et à mesure de l'apprentissage mais sans atteindre les mêmes performances qu'un monophtalme congénital. Cette compensation met de 6 à 18 mois à se mettre en place pour une confrontation continuelle à la situation.

Les pilotes se retrouvent dans une situation similaire aux monophtalmes quand ils utilisent un DVN, mais la différence est que cette utilisation est restreinte à la nuit et quelques heures

seulement. Donc, ils ne peuvent espérer atteindre des performances similaires. C'est pour cela que les systèmes binoculaires sont plus indiqués pour le vol de nuit.

La binocularité nécessite l'analyse de deux images différentes (Menu et al., 1990) due à :

- la disparité horizontale,
- la distorsion stéréoscopique.

La disparité horizontale est due au décalage frontal entre les deux yeux ce qui entraîne une différence entre l'image vue par l'œil droit et celle perçue par l'œil gauche, alors qu'ils observent la même scène (figure 36). L'analyse de ces disparités horizontales donne naissance à la sensation de distance relative ou stéréopsie (c'est-à-dire de distance entre les objets, les uns par rapport aux autres) qui est à l'origine de la perception de la profondeur

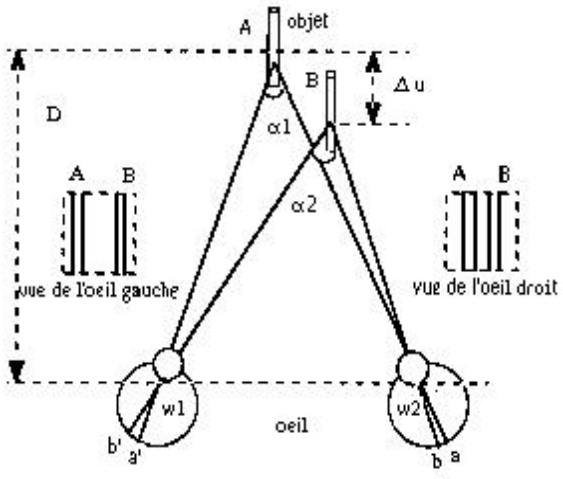


Figure 36 : exemple de disparités binoculaires

A: objet fixé; B: objet non fixé; W1W2: écartement interpupillaire; D: distance de fixation; Δυ: décalage linéaire ente A et B; α 1 - α2: parallaxe stéréoscopique; ab: images de A et de B sur l'œil droit; a'b': images de A et B sur l'œil gauche.

Les objets A et B sont perçus différemment par l'œil gauche et par l'œil droit: les deux images sont différentes (d'après Gao, 1992).

La distorsion stéréoscopique est, quant à elle, issue de deux angles de prise de vue différents (*α1*et *α2)* (Menu et al., 1990).

Pour obtenir une représentation unique de l'environnement, il est nécessaire de réaliser la fusion de ces deux images rétiniennes. Les deux images sont légèrement différentes et l'image obtenue est alors un produit intermédiaire donnant une sensation de relief. En 1858, Panum a mis en évidence l'existence d'une certaine tolérance de disparités horizontales. L'aire de Panum correspond au sous-ensemble de l'espace où la fusion de stimuli distincts est réalisée. Ogle (1950) décrit que la zone de fusion s'étend de 6 à 12 minutes d'angle autour du point de

fixation. Il indique aussi que le seuil stéréoscopique (correspondant à la plus petite disparité interprétée en une différence de distance) est de 5 à 10 secondes d'angle en vision centrale et qu'il augmente avec l'excentricité. Il apparaît important de tenir compte du contenu de l'image d'un point de vue fréquentiel, le système visuel utilisant, pour traiter la disparité, différents canaux fréquentiels. Schor et al. (1984) ont mis en évidence un élargissement de l'aire de Panum avec les basses fréquences spatiales.
Les indices oculomoteurs, accommodation et convergence, jouent aussi un rôle important dans la perception du relief.

3.2.2.2. Condition dégradée

La convergence des yeux et d'autres éléments comme les ombrages, les textures, les formes et tailles des objets connus et observés, sont autant d'éléments qui permettent au système visuel humain d'estimer les profondeurs relatives et absolues. L'obtention de toutes ces informations est naturelle et semble facile dans la perception visuelle au quotidien. Au travers les capteurs de DVN, ces informations deviennent beaucoup plus difficiles à percevoir lorsqu'elles sont disponibles. Cette situation demande aux opérateurs un haut degré d'adaptation perceptive responsable :

- d'un alourdissement de la charge de travail physique et mentale (fatigue visuelle) ;
- de l'élaboration de techniques d'interprétation des images de capteurs ;
- du travail de coopération pour l'interprétation de ces images.

Les premiers VDC développés ont été des systèmes monoculaires avec un champ de vision assez réduit et, par définition, une présentation de l'image intensifiée à un seul œil. Il existe alors une rivalité entre l'œil « aidé » qui voit l'image sur l'écran et l'œil « non aidé » qui voit la scène extérieure. Il en résulte une dégradation de la perception de la qualité de l'image. Les informations extraites de ces images peuvent provoquer des difficultés de reconnaissance de cibles et, plus globalement, une diminution des performances visuelles. La vision binoculaire offre la possibilité d'obtenir de bien meilleures performances visuelles en vision nocturne (Léger et al., 1994). Cependant, les systèmes binoculaires, même à recouvrement partiel, ne permettent pas d'obtenir une véritable vision stéréoscopique dans la mesure où le plan image est fixe.

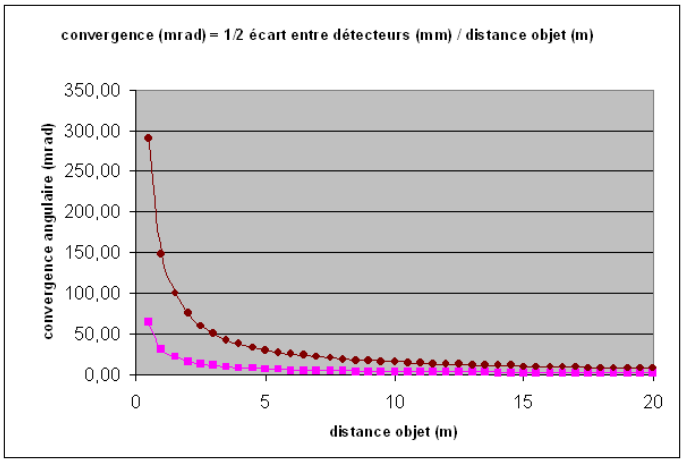


Figure 37 : mesures des disparités binoculaires avec des DVN

En rouge : disparités pour un VDC. En rose : disparités pour des JVN. Au-delà de 5 m, les disparités sont nulles (ou faibles) et similaires pour les deux types de DVN. Les disparités dans les JVN restent faibles jusqu'à 2 m tandis qu'avec le VDC, elles augmentent de manière très importante et pouvant gêner le confort visuel.

Les objets existants dans les scènes observées sont affectés de disparités droite/gauche en fonction de la distance à l'observateur par l'utilisation de DVN. Ce sont des disparités qui servent d'indices pour la vision stéréoscopique. Les axes optiques des capteurs étant parallèles, que ce soit dans les JVN ou dans les visuels de casque, les disparités droite/gauche sont nulles à l'infini, mais s'accroissent en fonction de la proximité des objets regardés par l'opérateur (figure 37). Dans les VDC, le surécartement des capteurs génère une augmentation virtuelle de distance interpupillaire (augmentation d'un facteur 4 ou 5). Les deux images, générées par les capteurs et surimposées sur la visière, sont donc décalées par rapport à la vision directe. La disparité horizontale est alors très importante. Sur la figure 33, on constate que l'augmentation artificielle de l'écart entre les « pupilles », en réalité les objectifs des IL, provoque une augmentation des disparités, en particulier pour les objets proches. Ceci modifie la perception des distances et du relief. Dans ce cas, on parle généralement d'hyperstéréoscopie. Les distances apparaissent plus faibles qu'elles ne le sont en réalité, surtout lors de l'exposition initiale au dispositif. Les explications proposées actuellement pour expliquer ce phénomène sont un conflit entre les mécanismes d'accommodation et de vergence qui sont fortement dissociés dans cette configuration. Le paragraphe 2.3 vous a présenté les bases de ces mécanismes et les effets de la dissociation de ces phénomènes. Dans un VDC, l'augmentation de la distance entre les capteurs est à l'origine d'erreurs d'évaluation de l'altitude, des distances. Ces erreurs vont cependant dans le sens de la sécurité (Roumes, Plantier et Leger, 1998) puisqu'il vaut mieux percevoir des objets plus près qu'ils ne sont en

réalité que plus loin, l'anticipation est trop importante mais permet d'éviter de percuter des obstacles par exemple. L'utilisation de symbologie et la familiarisation avec le phénomène permettent la prise de conscience de cette erreur. Par entraînement, ces erreurs peuvent être réduites. Les essais en vol effectués pour le développement initial d'un VDC ont montré une récupération de performances nominales (celles obtenues avec un système de type 1) en 5 à 8 heures de vol. Après quelques heures d'utilisation, le pilote est donc capable de se construire un modèle d'évaluation des distances en vision surécartée (Priot, Hourlier, Giraudet, Leger et Roumes, 2006). Avant utilisation d'un nouveau DVN, la « congruence » des perceptions attendues et effectives produit un contrôle actif de l'action. Avec l'utilisation d'un nouveau DVN de type 2, les attentes basées sur le modèle des DVN de type 1 ne s'apparient pas avec la perception effective à cause du biais dû à l'hyperstéréoscopie. Le modèle devient invalide et un nouveau modèle DVN type 2 est construit à travers un système de rétro-contrôle.
Les systèmes de type 2 sont extrêmement différents de ceux de type 1 et requièrent un apprentissage spécifique, même pour les pilotes ayant une forte expérience en vol de nuit.

3.2.3. La perception des distances

3.2.3.1. Condition normale

La vision binoculaire permet de percevoir les distances absolues et relatives entre les objets, comme ceci est expliqué dans le paragraphe précédent.
La perception de la distance est le terme incluant les distances de détection et de reconnaissance des objets dans toutes directions par rapport à un observateur. C'est la capacité de voir des objets, de près ou de loin, quel que soit l'angle, de manière précise et rapide : (1) la distance de l'œil d'une personne à un objet particulier; et (2) les distances entre objets spécifiques, peu importe les directions et les distances.
La distance absolue (distance égocentrique) est la distance exacte entre l'œil de l'observateur et l'objet, ou entre les objets observes. La stéréoscopie permet de déterminer la perception de la distance absolue (Viguier, Clément et Trotter, 2001). La taille perçue, la luminance, la texture, la parallaxe de mouvement et les disparités verticales sont d'autres indices potentiels qui peuvent aussi utilisés pour la perception de la distance absolue (Bishop 1989). La convergence oculaire fournit une information directe et non ambigüe sur la distance absolue, chaque distance correspondant à un angle de convergence unique (Richard et Miller, 1969).

La distance relative (distance exocentrique) est l'expression de la distance par rapport à un autre objet de la scène. Par exemple, la voiture bleu est à mi-distance entre ma voiture et la voiture rouge. Donc elle est à double distance de moi.

3.2.3.2. Condition dégradée

La plupart des DVN, que ce soit de type 1 ou de type 2, fournissent une image de l'environnement sans grossissement. Cependant, les utilisateurs de DVN tendent à surestimer les distances (Brickner, 1989) : les objets sont perçus comme étant plus loin qu'ils ne le sont en réalité. Il est assez facile d'imaginer les conséquences et les dangers de telles erreurs de perception dans les phases d'atterrissage, de vols à basse altitude, en présence d'obstacles ou de vol en patrouille. Ces illusions sont liées à un phénomène de myopie instrumentale. En effet, voir à l'aide d'un instrument optique entraîne un état de myopie transitoire. Ceci serait dû à une accommodation excessive (Kotulak et Morse, 1994b). Le cerveau reçoit alors des informations selon lesquelles l'image observée est plus proche que dans la réalité. Par conséquent, l'image rétinienne d'un objet lointain est interprétée par la représentation d'un grand objet tandis que l'image d'un objet proche est interprétée comme étant un petit objet.
On note également un impact des conditions de restriction du champ visuel et de la perception du gradient de texture (Foyle et Kaiser, 1991).
Dans les VDC, du fait du surécartement des capteurs, le cerveau reçoit des informations qui lui indiquent que les yeux sont «de chaque côté de la tête ». Il a été montré qu'il existe un effet de l'hyperstéréoscopie sur la perception des distances et profondeurs relatives, tout au moins lors des premiers temps d'utilisation de ce type de systèmes (cf. chapitre précédent sur la « perception de la profondeur »). Ainsi, des illusions sensorielles sur la perception des distances et hauteurs sont, par exemple, celles d'une sensation d'atterrir dans un bol. Les pilotes ayant la perception que le sol est plus proche qu'il ne l'est en réalité, ils ont cette impression d'atterrir dans le sol comme s'ils étaient en-dessous du niveau du sol mais comme les sensations proprioceptives leur prouvent que l'hélicoptère n'a pas encore touché le sol, ils savent qu'ils n'ont pas atterri d'où cette impression. Plusieurs études (Priot et al, 2006 ; Rash et al., 2007) ont cependant montré qu'une habituation à cet excès de convergence, survient au bout de quelques heures, et qu'une vision correcte comme avec un système de type 1 peut alors être obtenue.

3.3. L'estimation de la pente

3.3.1. Condition normale

L'estimation de la pente se fait à partir de différents types d'informations telles que la ligne de regard (pente optique), des références environnementales comme l'horizon (pente géographique) et des objets ou surfaces adjacentes (pente relative) (Aymeric, 1996 ; Brickner, 1989).

3.3.2. Condition dégradée

Lors de l'utilisation de JVN, des évènements relatifs à des erreurs de perception de la pente ont été rapportés par des pilotes (Brickner, 1989).

Un des phénomènes rapportés est une erreur d'estimation du gradient des pentes à courte distance, en particulier dans les phases d'atterrissage. Pendant cette phase, le pilote concentre en particulier son attention sur la surface d'atterrissage et, à cause du champ de vision réduit, il ne reste au pilote que des indices relatifs pour estimer la pente. De plus, l'utilisation des systèmes de vision nocturne, comme nous l'avons vu précédemment, réduit la résolution et le contraste. Par conséquent, la texture visible des surfaces servant de référence au pilote est assez pauvre induisant de possibles erreurs de perception de la pente.

Un second phénomène est une erreur de perception de l'inclinaison et des pentes pour les objets assez lointains. Il est en effet assez difficile pour les pilotes de distinguer les changements d'altitude du relief et d'estimer les gradients de textures. Cette difficulté est encore plus importante dans les zones désertiques où la texture du terrain est très limitée. Lors des phases où les conditions de visibilité sont bonnes, les pilotes s'appuient principalement sur les indices de perspective géographique pour estimer la pente. Mais, l'utilisation des systèmes de vision nocturne, à cause du champ de vision réduit, de la résolution et du contraste diminué, limite l'accès visuel à ce type d'information, en particulier dans les conditions de basse luminance.

Stuart et al. (2007) rapportent de quelle manière une modification de la profondeur va modifier la perception de la pente. Pour les VDC, il existe aussi des erreurs de perception de la pente (figure 38). Stuart et al. (2007) ont mis en évidence, en condition contrôlée, que la perception de la pente est modifiée par l'hyperstéréoscopie, mais de manière moins importante que les disparités binoculaires permettent de le prédire.

Comme pour la perception des distances, il y a habituation à cette modification de la perception au bout de 5 à 8h.

Il faut aussi ajouter que la vue du monde offerte par l'utilisation de JVN ou VDC augmente la reconnaissance des objets par rapport à des conditions de vision nocturne sans systèmes

d'aide. L'orientation spatiale générale est maintenue par le balayage régulier de la scène par le pilote.

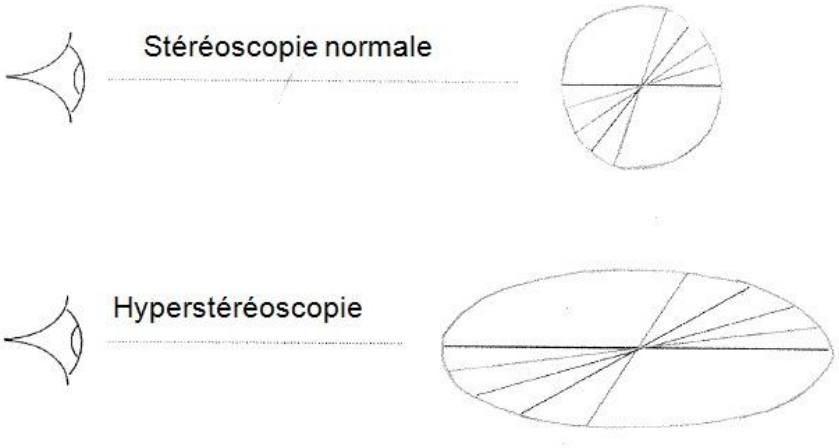


Figure 38 : effet de la stéréoscopie sur la perception de la pente
En haut, le cas d'une distance interpupillaire normale ; en bas, le cas de l'hyperstéréoscopie (Stuart, 2007)

3.4. Tâches de perception visuelle

Il existe différentes tâches utilisées pour évaluer la perception visuelle. Ces tâches se différencient en termes de processus impliqués et de mécanismes mis en jeu par la perception. Les paradigmes associés à ces tâches sont bien formalisés. Il existe une hiérarchie de ces tâches (Buffat, 2007) que nous allons présentés maintenant.

3.4.1. Détection

Le sujet doit répondre à la question « objet présent »/« objet absent ».Cette tâche est étant celle de plus bas niveau dans la hiérarchie des processus puisqu'elle nécessite le moins d'information spécifique à l'objet. Ce découpage hiérarchique est cependant remis en question, notamment la segmentation conduisant à la détection et à la catégorisation est remise en question par certains faits expérimentaux (Grill-Spector et Kanwisher, 2005). Ces auteurs ont mis en évidence qu'il n'y a pas de différence de temps de traitement entre les processus de détection et ceux de catégorisation. La détection correspond au premier niveau de traitement dans le modèle de Treisman (1980).

3.4.2. Catégorisation

Dans cette tâche, le sujet doit classer un objet cible dans une catégorie, par une procédure de choix forcé. On peut ainsi demander de classer les images naturelles selon le critère suivant : artificiel vs naturel.

La tâche de catégorisation permet d'évaluer la capacité d'organisation des connaissances car, dans l'environnement dans lequel nous vivons, les objets et évènements prennent du sens par leur organisation. Elle constitue une des tâches essentielle de l'intelligence humaine (Hahn et Ramscar, 2001, in Buffat, 2007). Grill-Spector et Kanwisher (2005) ont réalisé plusieurs expériences mettant en évidence que le temps de traitement entre détection et catégorisation sont identiques, ce qui remet en question cette hiérarchie.

3.4.3. Discrimination

Le but de la discrimination est de distinguer deux conditions. La tâche peut être d'évaluer quel est l'objet cible par rapport à un objet distracteur très similaire ou identifier si des cibles sont identiques ou différentes. Il est possible d'effectuer un tâche identique/différent avec un intervalle temporal ou à alternative spatiale (Buffat, 2007).

3.4.4. Reconnaissance

Il s'agit d'identifier, pour le sujet, si l'objet-cible, a déjà été rencontrée ou non. Ce sont des tâches classiquement utilisées pour les études sur la mémoire où l'on demande au sujet de retrouver parmi une liste d'items ceux qui sont nouveaux et/ou connus, donc qui font parties des éléments mémorisés. Elle appartient au deuxième niveau de traitement dans le modèle de Treisman (1980). La reconnaissance survient après la perception de la forme et elle implique une contribution de l'expérience passée à l'expérience présente, contrairement à la perception. Par conséquent, il est nécessaire d'avoir une trace durable de l'expérience passée au moment de la perception présente. On parle de trace mnésique. La reconnaissance est basée sur l'acceptation inconsciente d'une correspondance entre la trace et le percept. Il existe encore des controverses pour savoir si la reconnaissance est basée sur des traitements sériels ou parallèles (Rousselet, 2003 ; Treisman, 1980).

3.4.5. Identification

Dans cette tâche, le sujet doit préciser l'identité de l'objet-cible, le plus souvent par dénomination. Cette tâche, très courante, pose le problème des interférences avec les réseaux sémantiques, activés pour la dénomination. Comme la reconnaissance, elle appartient au deuxième niveau du modèle de Treisman et nécessité la mise en jeu de l'attention.

Ces différents phénomènes, et notamment la Détection, la Reconnaissance et l'Identification constituent les trois étapes du modèle DRI (Ealet, 2004).

3.5. Mémoire et représentation

3.5.1. Mémoire

La reconnaissance et l'identification des objets sont fortement liées à la mémoire et plus précisément aux représentations des objets qui sont stockées dans notre mémoire. Pour les pilotes d'hélicoptères utilisant des DVN, il est nécessaire de se créer de nouvelles représentations des objets. Au départ, les jeunes pilotes utilisant des DVN comparent ce qu'ils voient aux représentations qu'ils ont des objets en condition normale. Petit à petit, par essais-erreurs, ils vont se constituer des représentations de ces mêmes objets, grâce aux tubes IL.

Une des premières théories récentes de l'organisation de la mémoire est proposée par Atkinson et Schiffrin (1968). Selon cette théorie, il existe trois sortes de mémoire (figure 39) :

- les registres sensoriels qui mémorisent l'information jusqu'à 1 seconde ;
- la mémoire à court terme (MCT) qui est éphémère et réduite en capacité. Le maintien des informations est inférieur à 1 minute ;
- la mémoire à long terme (MLT) qui est plus ou moins permanente et de grande capacité. Les informations présentes en mémoire court terme peuvent être stockées en mémoire à long terme en fonction du temps passé en mémoire court terme.

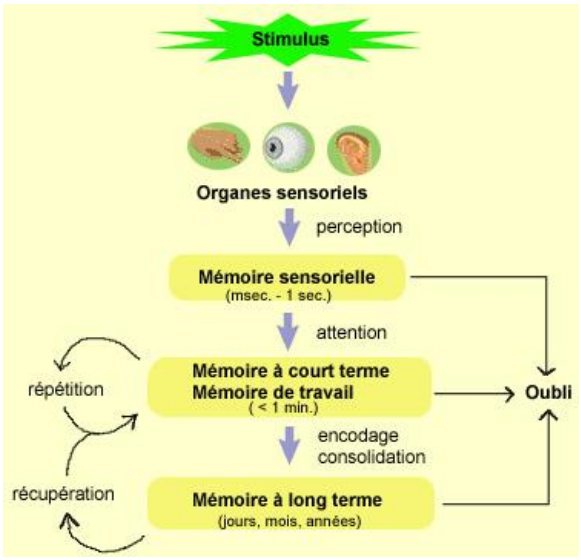


Figure 39 : description du modèle d'Atkinson et Schiffrin (1968)

Le registre à court terme est l'élément central du modèle car il traite les informations et contrôle le passage des informations des registres sensoriels vers la mémoire à long terme.

Ce modèle suppose un traitement sériel de l'information, c'est-à-dire que des dommages dans un système provoquent des troubles aux niveaux suivants. Selon ce modèle, tout patient avec un déficit en mémoire à court terme devrait présenter des déficits à long terme. Hors, il existe des patients avec des déficits en MCT sans déficit en MLT. Cette théorie a été depuis refutée.
En 1974, Baddeley et Hitch montrent que la mémoire à court terme est un élément majeur du fonctionnement cognitif et sert de zone de travail (mémoire de travail), zone dans laquelle les informations qu'elle contient sont manipulées. La mémoire de travail est un système hiérarchisé en plusieurs sous-systèmes articulés (figure 40).

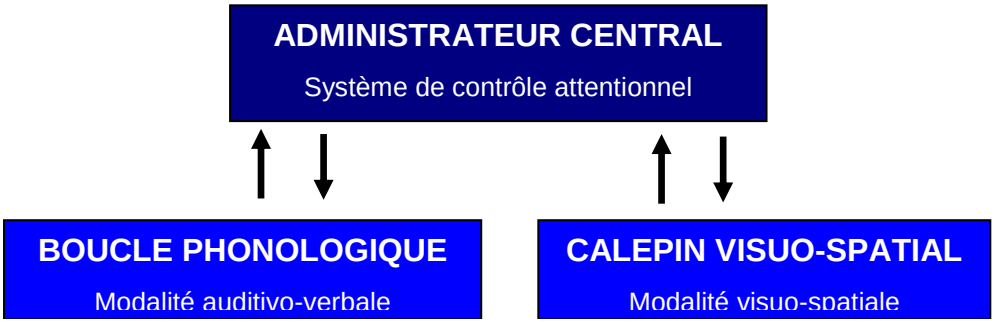


Figure 40 : mémoire de travail dans le modèle de Baddeley et Hitch
(d'après Baddeley et Hitch, 1974)

L'administrateur central est un rôle de système de contrôle attentionnel: il sélectionne, coordonne et contrôle les opérations de traitement effectuées par les systèmes esclaves, que sont la boucle phonologiques et le calepin visuo-spatial. Ces derniers stockent les informations de manière spécifique en fonction de la nature du matériel. La boucle phonologique stocke les informations verbales (mémoire des sons) et le calepin visuo-spatial les informations non verbales (mémoire visuelle et spatiale). Ce sont les informations visuo-spatiales qui sont essentielles dans les activités de pilotage et ces informations sont sélectionnées et traitées au niveau de l'administrateur central. La sélection est possible par la mise en jeu de l'attention visuelle.

3.5.2. Rôle de l'attention visuelle

L'homme est capable de détecter rapidement des objets et de diriger son regard vers des zones qui lui semblent essentielles. Ce phénomène est rapide parce qu'il y a codage, au niveau central, des informations présentes sur la rétine ce qui permet de réduire le nombre d'informations (gradient de couleur, d'intensité, cohérence temporelle). De plus, le mécanisme d'attention visuelle permet de sélectionner, parmi un ensemble d'informations,

celles qui paraissent être les plus importantes. Dans le cas de la perception visuelle, l'attention joue le rôle d'un « filtre » sur l'ensemble des informations codées dans le cerveau.

Triesch et al. (2003) ont démontré qu'il existe un rôle important de la tâche réalisée sur l'attention portée à notre environnement. Par exemple, lors d'un déplacement en voiture sur un trajet connu, notre attention visuelle n'est pas focalisée sur les panneaux, mais uniquement sur les objets nécessaires à la navigation. C'est ainsi que Triesch et al. ont montré la prépondérance des mécanismes descendants (perception active) dans la conduite automobile : la majorité des sujets testés ne détectent pas le changement des panneaux de vitesse sur leur trajet.

Les mécanismes descendants *(top-down)* illustrent le contrôle de la partie décisionnelle sur la sélection et les zones de recherche perceptive et donc du déplacement oculaire. Ce sont les mécanismes basés sur nos connaissances, c'est-à-dire les représentations stockées en mémoire à long terme (Hollingworth, 2004 ; Hollingworth et Henderson, 2002).

Les mécanismes ascendants *(bottom-up)* sont mis en avant lorsque ce sont les éléments perceptifs présents dans le champ visuel qui dictent leurs lois de déplacement oculaire. Le système visuel humain tient compte des événements imprévus *(de type bottom-up)* mais également de la tâche en cours *(de type top-down)* pour contrôler les prises d'informations.

Les stratégies hybrides tentent d'apporter une solution en intégrant ces deux mécanismes de contrôle de l'attention visuelle. C'est ce qu'on appelle *« scheduling problem »* (Hayhoe, 2000 ; Hayhoe et al., 2002 ; Jovancevic et al., 2006), qui pose la question suivante : comment détecter des événements imprévus, tout en focalisant son attention sur ce qui est nécessaire pour la tâche en cours?

3.5.3. Représentations

Malgré l'existence de plusieurs théories de la mémoire, force est de constater qu'il existe une transformation, un codage de l'information sensorielle que nous captons avant son maintien. Là aussi, plusieurs théories existent quant au codage de cette information et sa représentation. Selon Rensink (2000), à partir des informations de la rétine, notre système visuel serait capable de construire des structures locales complexes (des relations entres gradients, entre couleurs).

Comme indiqué sur la figure 41, ces structures ne sont pas des objets dans notre mémoire, elles ne sont que des motifs (appelés proto-objets). A partir d'une représentation abstraite du lieu (gist) où nous sommes (un port, une rue, une gare), nous nous préparons à un certain arrangement spatial des informations (layout) : il s'agit d'un processus non attentionnel qui

fournit une contrainte sur les objets que l'on s'attend à percevoir et leur localisation. C'est à ce moment que le processus attentionnel viendrait capturer un ensemble de structures qui formerait un objet.

L'approche représentationnelle de Marr (1982) stipule, au contraire, que l'objectif du système visuel est la création d'une structure complète de la scène, indépendante du point de vue (allocentrique). La théorie de Marr-Nishihara (1978) est basée sur l'idée que les processus visuels « bottom-up » suffisent à la construction des représentations et que les processus visuels de bas niveaux se terminent par la construction d'une représentation 2D½ suffisante pour la reconnaissance visuelle. Ces processus ne font pas partie de la cognition visuelle et ne sont donc pas influencés par les connaissances ou les intentions du sujet (processus « top-down). Au cours d'une première étape (esquisse primitive), le système construit une représentation dans laquelle sont détectées les variations de luminance donc les bords et les contours. Une seconde étape (esquisse intermédiaire 2D½) comprend les indices de profondeur et d'orientation des surfaces visibles en utilisant les informations de texture et la disparité rétinienne. Ces deux niveaux fournissent une représentation centrée sur l'utilisateur mais il n'y pas de reconnaissance des objets, qui fait appel aux connaissances du sujet.

Dans les deux cas, la construction d'une représentation se ferait à travers les différentes fixations que nous avons lorsque nous explorons visuellement notre environnement.

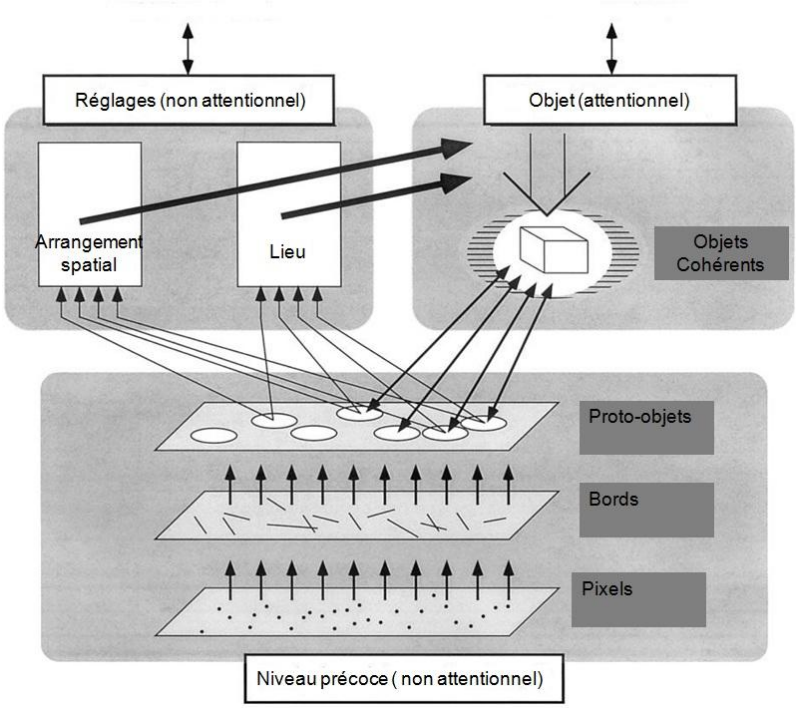


Figure 41 : modèle du traitement des informations visuelles de Rensink (2000)

Les processus visuels sont découpés en 3 systèmes indépendants : i) la vision précoce: système de bas niveau qui crée des structures volatiles hautement détaillées appelées proto-objets ; ii) la vision attentionnelle: système de faible capacité permettant la formation d'objets cohérent ; iii) la vision non-attentionnelle: système de faible capacité permettant l'établissement d'un contexte pour guider l'attention focalisée.

3.6. Le traitement cognitif de la perception visuelle

Il existe plusieurs niveaux de traitement de l'information visuelle, comme nous l'avons vu précédemment, avec des informations de bas niveau et d'autres de plus haut niveau mais de capacité plus restreinte. Le modèle de Kosslyn (1995) est intéressant pour nous parce qu'il décrit un ensemble de sous-systèmes spécialisés pour une fonction dans la perception visuelle. Ces sous-systèmes sont en interaction avec un système de référence et les différentes structures de la mémoire visuelle afin de comparer sa perception aux représentations stockées en mémoire à long terme. Parmi ces sous-systèmes, certains jouent un rôle important dans le traitement des images dégradées.

3.6.1. Le sous-système de cartographie « spatiotopique »

La spatiotopie traduit la mise en relation d'espace. Comme la rétinotopie définit la représentation des zones de la rétine au niveau cérébral, il existe une représentation des espaces au niveau cérébral. Les informations visuelles sont transformées en coordonnées stables basées sur l'analyse en trois dimensions de l'objet en spécifiant un lieu, une taille, une orientation, pour chaque objet. Cela aide à identifier les objets. Ainsi, peut-on reconnaître un objet même s'il est présenté sous un angle différent.

3.6.2. Un sous-système d'encodage des relations

Il est également possible de reconnaître un objet en repérant sa position par rapport à un autre objet. Si les coordonnées spatiotopiques sont utilisées, elles peuvent être relatives au corps ou à un autre objet. Les objets sont enregistrés par rapport à un référentiel avec des coordonnées cartésiennes (dans un espace cartésien, à l'aide de vecteurs) ou polaires (dans un plan, à l'aide d'angles et de distances par rapport à l'axe polaire, équivalent de l'axe des abscisses). Ces coordonnées peuvent êtres inclues dans le processus qui guide l'action ou assorties aux représentations spatiales intervenant dans la reconnaissance. Les coordonnées locales peuvent êtres utilisées pour spécifier les parties par rapport à une autre ou les coordonnées globales peuvent spécifier le lieu par rapport à un référentiel unique. Les possibilités du système de référence sont nombreuses et dépendent de la façon dont est présenté l'objet.

3.6.3. Un sous-système distinct

Ce sous-système produit des représentations explicites de coordonnées. Une carte générale peut être utilisée par d'autres sous-systèmes comme ceux utilisés lors de la navigation ou dans l'encodage des informations spatiales en mémoire ou dans la transformation des images.

3.6.4. Deux structures de mémoire visuelle

Il est intéressant d'établir un système qui permet d'identifier un objet comme membre d'une classe et un second qui enregistre l'objet comme exemple spécifique. Un seul et même système ne peut faire les deux. Le sous-système d'activation de patterns « exemple » encode des exemples spécifiques de stimulus alors que le sous système d'activation des patterns « catégorie » encode des classes d'objets. Quand les images sont dégradées, des informations qui, d'habitude, paraissent peu importantes deviennent primordiales dans l'identification d'objets.

3.6.5. Conclusion

Les mouvements, parties, propriétés spatiales des objets, formes d'exemples ou de catégories sont utilisés pour reconnaître les objets. Il faut retenir l'implication des trois sous-systèmes de traitement cités ci-dessus dans la reconnaissance d'objets dans des images dégradées.

3.7. Prise de décision

3.7.1. Définition

Chaque jour, nous prenons des décisions et nous devons émettre des jugements sur des situations pour cela. Par exemple, en conduite automobile, pour dépasser un véhicule située devant nous, il faut évaluer la situation afin de savoir si la visibilité et la distance sont suffisantes pour prendre de la vitesse, effectuer le dépassement et se rabattre afin qu'un véhicule ne se présente face à nous.

Une tâche de prise de décision est une tâche dans laquelle :

- Une personne doit sélectionner une option parmi un nombre d'alternatives,
- Il y a une quantité d'informations disponibles en lien avec cette option ;
- Le taux de rafraichissement est relativement lent (supérieur à 1 seconde) ;
- Le choix associé à cette option est incertain c'est-à-dire qu'il n'est pas certain que ce soit la meilleure option.

Ceci implique un risque et une personne qui prend de bonnes décisions est effectivement capable d'associer les risques à chaque option (Medin et Ross, 1992). La prise de décision est généralement décomposée en 3 phases, chacune pouvant être divisée en sous-phases :

1. La première pour l'acquisition et de perception des informations ou indices significatifs pour la décision ;

2. La seconde pour la génération et la sélection d'hypothèses ou d'évaluations de situation à partir des indices, en observant l'état courant du système et l'état futur significat if pour la décision ;
3. La troisième pour la planification et la sélection des choix à faire, sur la base de l'état inféré, et des couts et valeurs des différents résultats.

3.7.2. Modèles de prise de décision

Les premiers travaux se sont focalisés sur l'étude de la prise de décision rationnelle et optimale (Fischhoff, 1982, Luce et Raiffa, 1957). Leur hypothèse est qu'il est possible de définir les valeurs de coûts et de bénéfices associés aux différents choix et ainsi prédire, par modèle mathématique, les choix que les gens feront. L'option choisie sera celle avec le bénéfice maximal et le coût minimal. Ces modèles sont aussi appelés modèles normatifs et ils sont centrés sur le concept d'utilité. Cette théorie de la valeur attendue est relativement limitée parce qu'il est rapidement devenu clair que la plupart des choix dans la vie ont différentes valeurs selon les personnes, ce dont ce modèle ne tient pas compte (Wickens, Lee, Liu et Becker, 2004). Cet aspect de la prise de décision humaine a mené au développement de la théorie de l'utilité attendue subjective. Dans ce modèle, chaque choix qu'une personne fait est associé à un résultat et chaque résultat est associé à une probabilité et à certaine utilité subjective. Il appartient à la catégorie des modèles descriptifs.

3.7.3. Heuristiques et biais

Pour prendre une décision, nous nous appuyons sur des heuristiques qui sont des stratégies générales qui s'appliquent à de nombreuses situations. Elles sont très puissantes et efficaces (Gigerenzer et Todd, 1999) mais elles ne garantissent pas la meilleure solution (Kahnemann, Slovic et Tversky, 1982). Elles mènent parfois à des erreurs et des flous car elles simplifient les situations.

Le processus de prise de décision, décrit précédemment, dépend des limites des ressources cognitives. Il existe des biais dans l'utilisation des heuristiques, résultant des limitations de ces ressources. Ces biais sont présents au niveau des 3 étapes du processus de prise de décision.

Dans l'étape de perception et d'utilisation des indices, il faut tenir compte de la capacité limitée de la mémoire de travail, de l'effet de primauté du premier indice (Adelman, Bresnick, Black, Marvin et Sak, 1996), de l'inattention porté aux indices suivants, de la saillance des indices (Endsley, 1995 ; Wickens et Holland, 2000), de la valeur accordée aux indices

incertains (Johnson, Cavanagh, Spooner et Samet, 1973 ;Schum, 1975 ; Wickens et Holland, 2000).

Dans la seconde étape de génération d'hypothèse, d'évaluation et de sélection, il est essentiel de prendre en compte la capacité de la mémoire de travail à générer des hypothèses est limitée, la disponibilité des hypothèses et de l'heuristique (si elle a été utilisée récemment ou de manière régulière) (Rasmussen, 1981), la représentativité de l'heuristique (si elle ressemble à une situation déjà rencontrée) (Anderson, 1990), l'excès de confiance (les sujets font confiance aux solutions qu'ils utilisent souvent et qui sont en mémoire de travail sans se demander si c'est adapté à leur situation) (Wickens et al., 2004), l'effet de tunnel cognitif (il s'agit de cas de persistance dans lerreur basé sur un indice de départ qui n'était pas le bon) (Cook et Woods, 1994) et le biais de confirmation (les sujets cherchent à confirmer leur hypothèse uniquement et non pas à la réfuter, même si cela amène à un diagnostic plus efficace (Einhorn et Hogarth, 1978 ; Schustack et Sternberg, 1981).

Dans la dernière étape de sélection de l'action, il faut prendre en considération la capacité de la mémoire à long terme à récupérer un petit nombre d'actions (Wickens et al., 2004), la disponibilité des actions (Wickens et al., 2004), la disponibilité des résultats possibles (Wickens et al., 2004) et le biais de cadrage (c'est l'influence du cadre ou de la présentation sur le jugement de la personne) (Kahnemann et Tversky, 1984).

3.7.4. Importance du contexte

Cette importante liste de biais dans l'utilisation d'heuristiques de prise de décision suggère que nos décisions ne sont pas efficaces dans toutes les situations. Cependant, nous prenons, dans la plupart des situations, de bonnes décisions. D'une part, parce que les heuristiques sont précises dans la plupart des cas. D'autre part, parce que nous sommes capables de nous adapter aux situations grâce à nos expériences et à nos capacités de traitement de l'information.

Comprendre comment la prise de décision s'adapte aux caractéristiques de la personne et de la situation est critique pour améliorer nos mécanismes de prise de décision. Rasmussen (1963, 1986, 1993) a proposé un modèle du comportement basé sur la distinction automatismes, règles et connaissances pour décrire les processus de prise de décision en fonction du niveau d'expertise et de la nature de la décision. Ce modèle intègre les différents niveaux d'expertise (Fitts, 1964, Anderson, 1983), les différents types d'erreurs (Reason, 1990).

3.8. Novices et experts

L'utilisation de DVN dégrade les images fournies et utilisées par les pilotes d'hélicoptères pour extraire des informations sur l'environnement. Ces informations sont la base de la création de nouvelles représentations des objets et obligent les pilotes à mettre en place de nouvelles compétences pour interpréter ces images.

Les termes d'expertise, habileté et compétence dans la tâche sont très proches avec quelques nuances que les traductions anglais-français ont bien du mal à rendre. Le concept d'habileté (« skill ») est employé par les anglais pour désigner une conduite adaptée au mieux à l'objectif. De Mont-Mollin (1984) préfère parler de compétence car il voit, dans cette notion, l'héritage des habiletés sensori-motrices de base. Les informaticiens américains utilisent le terme d'expertise pour désigner le savoir nécessaire pour communiquer avec une machine pour avoir le même résultat dans l'action qu'un sujet « habile ». Leplat (1986) a fermé le débat en montrant la synonymie des termes : l'expertise correspond à un certain niveau d'habileté et de compétences. L'expertise est actuellement définie comme une performance constamment supérieure dans un ensemble de tâches pertinentes pour une habilité ou compétence, qui a été acquise par une pratique volontaire d'une période d'au moins 10 ans (Ericsson et Lehmann, 1996).

3.8.1.1. Modèles d'acquisition de l'expertise

Les premiers modèles de résolutions de problèmes (Newell et Simon, 1972) soulignaient les procédures générales de recherche utilisant des heuristiques, comme l'analyse des moyens à mettre à mettre en place pour atteindre un but (« moyen-fin »), pour orienter l'investigation. Des modèles plus récents indiquent que, avec de la pratique, nous pouvons apprendre des solutions spécifiques qui remplacent les heuristiques moins efficaces (Gick, 1986). Nous tentons d'abord de construire une représentation du problème en le reliant à nos connaissances antérieures. Si une relation a été trouvée avec ces connaissances, un schéma peut être activé (un schéma est un regroupement organisé de connaissances relatives à un problème particulier). Quand il est activé, la solution est exécutée. Si aucun schéma n'est activé, il faut rechercher une solution. Cela peut se faire par l'utilisation de stratégies générales (qui s'applique à de nombreuses situations mais qui ne conduit pas toujours à une solution) comme l'analyse moyen-fin (Atwood et Polson, 1976 ; Simon et Reed, 1976), par la recherche d'un problème similaire qui pourrait fournir une solution utile ou en planifiant la solution par décomposition du problème en sous-problèmes.

Des études sur la résolution d'équation mathématiques (Larkin, McDermott, Simon et Simon, 1980 ; Sweller, Mawer et Ward, 1983) ont montré que les novices passent petit à petit d'une stratégie de moyen-fin à un travail prospectif, c'est-à-dire la sélection des informations pertinentes pour résoudre un problème, dans un ordre qui correspond à la succession requise par la solution.

Levison (1983) décrit l'acquisition de l'expertise par un modèle d'acquisition du comportement optimal (Optimal Control Model), qui suppose une référence (le comportement optimal) et présente les paramètres sur lequel le sujet progresse pour atteindre ce niveau :

- maîtriser le bruit du canal (attention partagée) ;
- progresser dans le délai de traitement séparant la prise en compte de l'information et la mise en jeu de la réponse ;
- progresser dans le délai d'exécution de la réponse ;
- progresser dans la maîtrise de l'habileté de la réponse.

L'expert est celui qui atteint le comportement optimal. Ce modèle, axé sur l'idée de performance optimale, ne tient pas compte du contexte de travail et fait l'économie des processus mentaux sous-jacents.

Un autre type de modèle s'intéresse justement à l'évolution des connaissances (et pas des comportements). Anderson (1985) a décrit un modèle d'acquisition en trois étapes :

- l'étape cognitive ;
- l'étape associative : les erreurs de compréhension initiale sont éliminées. Des renforcements sont créés entre connaissances « utiles ». La connaissance déclarative est transformée en connaissance procédurale. A l'issue de cette phase, l'opérateur possède des connaissances spécifiques et l'opérateur est compétent dans sa tâche ;
- l'étape procédurale : la procédure devient de plus en plus autonome et rapide. Le gain se fait sur deux dimensions : vitesse et habileté.

C'est ce type de modèle que nous privilégierons dans la suite de notre étude.

3.8.1.2. Capacités mnésiques

Nous savons que les experts ont des capacités mnésique différentes par rapports aux novices (Ericsson et Kintsch, 1995 ; Ericsson et Lehmann, 1996 ; Noice, 1992 ; Simon et Gobet, 2000) :

- Les experts possèdent une structure de connaissances, soigneusement apprises, bien organisée. Cette structure peut être stockée en MLT donc elle est facilement accessible pour la mémoire de travail.

- Les experts ont plus d'images visuelles vivantes pour les éléments dont ils doivent se rappeler ;
- Ils ont plus de probabilité de réorganiser le nouveau matériel dont ils doivent se souvenir, en formant des regroupements (« chunks ») significatifs que lient ensemble les éléments significatifs.
- Les experts sont meilleurs dans la reconstruction de portions manquantes d'information du matériel qui est partiellement rappelé.

3.8.1.3. Résolution de problème

Mais, il existe aussi des différences entre experts et novices dans les phases de résolutions de problèmes. Tout d'abord, ils diffèrent de manière importantes au niveau des connaissances de base ou des schémas (Matlin, 2005). La différence de performance s'explique par le fait que les novices ont un manque important de connaissances de base par rapport aux experts dans le domaine testé. A contrario, les experts possèdent les schémas adaptés pour comprendre le sujet clairement et ils arrivent à réaliser une tâche correctement s'ils ont eu un entraînement dans des situations variées et significatives (Barnett et Kolowski, 2002).

De plus, les experts diffèrent des novices par rapport à la mémoire des informations liées à la sphère de leur expertise (Matlin, 2005). La mémoire des experts peut utiliser des indices retrouvés dans la MCT pour accéder à un champ plus large et plus stable d'information en MLT.

Les novices et les experts représentent aussi les problèmes différemment. Les novices se focalisent sur les traits de surface tandis que les experts se focalisent sont capables de se construire des représentations sur des idées abstraites, appelées traits structuraux (Fergusson-Hessler et De Jong, 1987 ; Matlin, 2005).

Quand les experts rencontrent un nouveau problème dans la sphère de leur domaine d'expertise, ils sont plus à même de mettre en place une heuristique efficace pour parvenir à leurs fins. Ils vont pouvoir diviser le problème en plusieurs sous-problèmes, qu'ils vont résoudre dans un ordre spécifique (Matlin, 2005).

Les experts sont plus rapides que les experts et ils résolvent les problèmes plus précisément. Leurs opérations deviennent automatiques et une situation particulière va stimuler et provoquer une réponse rapide (Matlin, 2005).

3.8.1.4. Utilisation d'un DVN

L'acquisition des connaissances par les pilotes d'hélicoptères utilisant les DVN se fait sur le même principe. Lors des premiers vols, les pilotes évoluent dans l'environnement et les instructeurs les laissent commettre des erreurs, tout en respectant la sécurité, afin qu'ils acquièrent leurs connaissances par essais-erreurs. Ensuite, les connaissances utiles des représentations des objets sont conservées et au final, la reconnaissance sous DVN se fait plus rapidement et de manière plus exacte.

L'utilisation de DVN fournit aux pilotes une représentation de leur environnement différente de celle qu'ils se sont constituée pendant leur expérience. Réaliser des tâches la nuit, de la même manière qu'on les exécute le jour, couplé aux limitations des DVN, exige plus ressources perceptrices et cognitives. Donc, il est nécessaire de fournir, pour assurer la sécurité, un entraînement réaliste, avec une fréquence régulière, pour que des habitudes puissent se mettre en place, afin de réduire la charge de travail. Les connaissances et les expertises acquises dans ces conditions de nuit, assez « rares » sont périssables. C'est une fonction à entretenir et à pratiquer (Ciavarelli, Kishore et Baer, 1994, in Ruffner, Antonio, Joralmon et Martin, 2001 ; Ruffner, Piccione et Woodward, 1997, in Ruffner, Antonio, Joralmon et Martin, 2001 ; Dyer et Young, 1998).

3.9. Conclusion sur le traitement cognitif

Nous avons d'abord vu comment le système visuel perçoit les objets de l'environnement, c'est-à-dire la perception de l'espace, les distances entre autres par l'intermédiaire des mécanismes d'accommodation et de convergence. Associer une forme à un objet, puis déterminer si la forme suivante est une autre manifestation du même objet ou, « carrément » un autre objet, est un ensemble de tâches que nous réalisons quotidiennement sans y prêter réellement attention. Mais certaines personnes, contraintes par des conditions de travail aux limites de la sécurité, doivent remettre en cause ce qui nous paraît si naturel. Les pilotes d'hélicoptères se trouvent ainsi confrontés à des images difficiles à interpréter, produites par des DVN dont le fonctionnement est basé sur des principes physiques différents de la photo-réception. Leur efficacité opérationnelle dépend alors de façon aiguë de capacités perceptives qui dépassent les notions élémentaires d'acuité visuelle.

Nous avons ensuit présenté la nature des représentations des objets, à partir de quelles informations elles se construisent, et comment nous faisons appel à celles qui sont stockées en mémoire pour la reconnaissance d'objets. La question de l'importance des différents niveaux d'information dans la construction d'une représentation de type proto-objet, située entre la forme et l'objet reste ouverte. Il apparait de plus en plus important de s'interroger sur l'intérêt

de tester dans une condition plus écologique la perception visuelle. Simultanément, un des problèmes les plus difficiles à résoudre pour les modèles de perception visuelle, est celui de la variabilité, qui est d'autant plus important que les conditions sont écologiques.

Enfin, nous avons montré l'importance de l'expertise dans le traitement des images issues des tubes IL.

Nous allons maintenant présenter les méthodologies existantes pour tester les DVN, ces méthodes étant divisées en différents niveaux, en fonction du type d'informations auxquelles nous pouvons accéder.

- CHAPITRE 3 -

ANALYSE DE L'EXISTANT SUR LES METHODOLOGIES

Pendant le développement d'un dispositif de vision nocturne (DVN), il est nécessaire d'évaluer et tester les performances opérationnelles indirectement au travers de mesures physiques, représentatives de la performance attendue des systèmes ou directement avec « l'homme dans la boucle ». Ces phases de test doivent avoir lieu assez tôt dans la phase de développement, le but étant de fournir une qualification la plus complète possible, avant les premiers vols. Il n'existe pas de grille d'évaluation unique pour tous les DVN. Un certain nombre de paramètres de base est cependant à considérer pour un plan d'évaluation minutieux.

Le principe des DVN est de créer une image source (IL) reproduisant la scène observée. Cette image est ensuite relayée par des éléments optiques produisant une image finale visible par l'utilisateur. L'image fournie par ces systèmes est liée à la qualité des tubes IL mais aussi aux capacités et contraintes propres de l'utilisateur. L'image et le dispositif doivent donc être décrits sur la base de paramètres physiques, mais également physiologiques et cognitifs. Actuellement, les caractérisations physique et optique de ces différents systèmes, habituellement traitées par les opticiens, prédominent largement. Les dimensions physiologiques et cognitives, qui leur sont étrangères, sont souvent explorées d'une manière relativement empirique. Elles restent cependant fondamentales dans l'évaluation de ces systèmes.

La majeure partie de ces évaluations est généralement effectuée en laboratoire. L'avantage est l'obtention de résultats relativement reproductibles. L'autre avantage est de mener des investigations dans un environnement contrôlé utilisant une batterie de tests sensibles, ce qui n'est généralement que très difficilement réalisable en environnement réel. Il est intéressant de mener des expérimentations dans un environnement contrôlé afin d'obtenir des résultats reproductibles mais de maîtriser au mieux les variables de l'environnement d'évaluation. L'utilisation de systèmes d'aide à la vision implique que l'on se réfère à une source lumineuse (source primaire) qui éclaire une surface (source secondaire), et qui est donc la variable d'environnement la plus importante à maîtriser. Avant de présenter ces différentes catégories de tests, il est donc intéressant de considérer les aspects radiométriques et photométriques de

l'environnement d'évaluation et d'exposer brièvement quelques points relatifs aux variables fondamentales du stimulus lumineux et aux lois de la photométrie.

1. Variables fondamentales du stimulus lumineux

Il faut d'abord distinguer les phénomènes physiques des phénomènes perceptifs. L'intensité lumineuse, est l'expression de la quantité de lumière entrant dans l'œil, et la luminosité, correspond à la perception produite par cette lumière. L'intensité lumineuse peut être mesurée objectivement tandis que la luminosité est plus difficilement quantifiable, parce qu'en rapport avec une subjectivité de l'observateur.

Il est d'usage de préciser les variables du stimulus lumineux en se fondant sur des définitions relatives à une énergie rayonnante, indépendamment du fait que cette énergie crée une sensation visuelle. Le but de la radiométrie et de la photométrie est de caractériser, respectivement, théoriquement et expérimentalement des rayonnements optiques.

1.1. Domaine radiométrique

La lumière est considérée comme une énergie qui se propage (théorie ondulatoire de la lumière) et est définie à partir de grandeurs dites « énergétiques ». Les principales unités radiométriques sont :

- Le flux énergétique ϕ qui correspond à la quantité d'énergie lumineuse qui traverse une surface pendant une unité de temps pour une source ponctuelle. Il s'exprime en watt (W) ;
- L'intensité énergétique J est le flux émis par une source ponctuelle par unité d'angle solide dans la direction considérée. Elle s'exprime en watt par stéradian (W/Sr) ;
- La luminance énergétique B (ou radiance ou brillance énergétique) représente le flux émis dans un angle solide élémentaire centré sur une direction donnée par une source étendue de surface élémentaire projetée dans le plan normal à la direction de la mesure. Elle s'exprime en watt par stéradian par mètre carré ($W/Sr/m^2$) ;
- L'éclairement énergétique D (ou irradiance) est le flux énergétique reçu par unité de surface. Il s'exprime en watt par mètre carré (W/m^2).

1.2. Domaine photométrique

La lumière est considérée comme un stimulus, c'est-à-dire qu'il s'agit de l'étude de la stimulation visuelle du point de vue de la perception par l'œil humain. Pour cela, il convient d'établir la courbe de sensibilité relative du récepteur visuel qu'est l'œil. Le but est de

quantifier la stimulation visuelle vue par un œil « standard » dont la courbe a été établie par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) à partir d'un grand nombre d'individus. Elle montre que la sensibilité maximale de l'œil humain en vision de jour se situe à une longueur d'onde de 555 nanomètres (nm). Cette courbe prend des valeurs nulles en dehors de plage de 400 à 700 nm.

Les principales unités photométriques sont :

- Le flux lumineux F quantifie la stimulation visuelle perçue par l'œil standard, il dépend du récepteur et de la nature du rayonnement. L'unité du flux lumineux est le lumen (Lm) ;
- L'intensité lumineuse I représente la quantité de lumière émise par toute la surface dans une direction donnée (source ponctuelle). L'unité utilisée est le candela (Cd) ;
- La luminance lumineuse B représente (brillance lumineuse) le flux de photons par unité d'angle solide et par unité de surface de la source perpendiculaire à la direction considérée (source étendue). Elle s'exprime en candela par mètre carré (Cd/m^2) ;
- L'éclairement lumineux D (ou illuminance ou émittance) représente le flux lumineux reçu par unité de surface. L'unité utilisée est le lux (Lx). L'éclairement lumineux d'une surface ne laisse en rien présager de la quantité de lumière réémise par la surface, qui dépend de la nature de la surface et notamment de sa couleur, mais aussi des longueurs d'onde du rayon incident. On définit une courbe de réflectance de la surface (ou albédo) pour rendre compte de ce fait.

	Unités radiométriques			Unités photométriques		
Flux	flux énergétique	ϕ	watt (W)	flux lumineux	F	lumen (Lm)
Intensité	intensité énergétique	J	watt par stéradian (W/Sr)	intensité lumineuse	I	candela (Cd)
Luminance	luminance énergétique	B	watt par stéradian par mètre carré ($W/Sr/m^2$)	luminance lumineuse	B	candela par mètre carré (Cd/m^2)
Eclairement	éclairement énergétique	D	watt par mètre carré (W/m^2)	éclairement lumineux	D	lux (Lx)

Tableau 1 : tableau récapitulatif des unités radiométriques et photométriques

2. Evaluation en laboratoire

La conception d'un système de vision nocturne exige de prendre en considération un nombre important de critères, ce qui conduit à deux approches différentes: la première basée sur les caractéristiques physiques des sous-systèmes et la seconde basée sur les performances obtenues par les opérateurs avec les systèmes. Les paramètres et méthodologies de tests recommandés sont de nature optique, sensorielle ou cognitive. Les tests optiques sont associés aux caractéristiques physiques du système, c'est-à-dire les aberrations optiques, les disparités propres aux systèmes binoculaires, le maximum de luminance, etc. Les paramètres de tests sensoriels ou cognitifs sont associés à la performance visuelle de l'opérateur, les premiers se référant aux fonctions visuelles basiques (c'est-à-dire acuité visuelle, discrimination des couleurs, stéréoscopie et champ visuel) et le dernier adressant les tâches perceptuelles de haut niveau qui requièrent une intégration spatiale et/ou temporelle des indices visuels primaires (c'est-à-dire charge de travail, identification de cibles, perception de la profondeur, etc.). Ces différents tests ont été organisés en ordre de priorité, selon leur importance dans la vérification des performances du DVN. Ce classement a été effectué par un groupe de travail (Research and Technology Group) de l'OTAN (HFM-091/RTG-027). Le rapport issu de ce groupe (AC/323 (HFM-091) TP/76, 2008) recommande l'utilisation à trois types de test :

- physiques ;
- sensoriels ;
- cognitifs.

Les tests de haut rang sont des tests critiques dont la mesure est requise. Un rang moyen implique que ce test est recommandé et important. Un rang bas implique que le test est utile mais optionnel.

2.1. Les tests optiques

Actuellement, la caractérisation physique et optique de ces différents systèmes est facilement réalisable. Il existe plusieurs critères bien connus pour qualifier la qualité d'une image. Ces tests sont divisés en deux parties selon l'architecture optique du DVN (type 1 ou 2). Au sein de chaque type de DVN, il faut différencier les systèmes monoculaires et binoculaires.

Nous nous intéressons uniquement aux tests effectués sur les DVN binoculaires puisque ce sont des types de systèmes que nous allons évaluer. Les tests sont relativement similaires pour les JVN et les VDC. Dans le tableau 1, tous les tests optiques sont répertoriés pour les systèmes binoculaires de type 1 ou de type 2. Les tests optiques recommandés, à effectuer de manière systématique sont les mesures répertoriées dans le tableau 1.

Ces tests sont effectués au niveau industriel par les opticiens et différents experts du domaine, par passage sur divers bancs de réglage et de mesures. Nous verrons dans la deuxième partie quels sont les tests physiques qui sont réalisés chez Thales.

Tubes Intensificateurs de Lumière			
JVN (ou type 1)		VDC (ou type 2)	
Test	Priorité	Test	Priorité
Recouvrement binoculaire	Moyenne	Recouvrement binoculaire	Moyenne
Aberration chromatique	Basse	Aberration chromatique	Basse
Taille et forme de la pupille de sortie	Moyenne	Taille et forme de la pupille de sortie	Moyenne
Réflexions étrangères	Moyenne	Réflexions étrangères	Moyenne
Gamme de focalisation des oculaires	Moyenne	Gamme de focalisation des oculaires	Moyenne
Champ de vision	Haute	Champ de vision	Haute
Halos	Haute	Halos	Haute
Défauts des tubes IL	Haute	Défauts des tubes IL	Haute
Rotation de l'image	Moyenne	Rotation de l'image	Moyenne
Disparités de rotation de l'image	Moyenne	Disparités de rotation de l'image	Moyenne
Disparités de taille de l'image	Moyenne	Disparités de taille de l'image	Moyenne
Distance Interpupillaire	Moyenne	Distance Interpupillaire	Moyenne
Disparité de luminance	Moyenne	Disparité de luminance	Moyenne
Gain de luminance	Haute	Gain de luminance	Haute
Uniformité de luminance	Moyenne	Uniformité de luminance	Moyenne
Agrandissement	Haute	Agrandissement	Haute
Disparité d'agrandissement	Haute	Disparité d'agrandissement	Haute
Luminance maximale	Moyenne	Luminance maximale	Moyenne
Modulation de contraste	Haute	Modulation de contraste	Haute
		Neutralité	Haute
Gamme de focalisation des objectifs	Haute	Gamme de focalisation des objectifs	Haute
		Transmission source significative	Moyenne
Disparités d'alignement des axes optiques	Haute	Disparités d'alignement des axes optiques	Haut
Relief de l'œil physique	Haute	Relief de l'œil physique	Haute
Disparité de déviation prismatique	Haute	Disparité de déviation prismatique	Haute
		Pouvoir de réfraction	Haute
Résolution	Haute	Résolution	Haute
Distorsion	Basse	Distorsion	Basse
		Transmittance de luminance see-through	Haute
		Transmittance spectrale See-through	Moyenne

Tableau 2 : tests optiques
(d'après HFM-091/RTG-027, 2008)

2.2. Les tests sensoriels

Il s'agit des tests effectués pour évaluer les performances des sujets. Ces tests sont peu nombreux et communs aux JVN et VDC. Les tests sensoriels principaux à effectuer sont l'évaluation de l'acuité visuelle et la sensibilité aux contrastes (tableau 2).

Tubes Intensificateurs de Lumière			
JVN ou type 1		VDC ou type 2	
Test	Priorité	Test	Priorité
Sensibilité aux contrastes	Haute	Discrimination des couleurs	Moyenne
Stéréoscopie	Moyenne	Sensibilité aux contrastes	Haute
Acuité visuelle	Haute	Stéréoscopie	Moyenne
Champ de vision	Moyenne	Acuité visuelle	Haute
		Champ de vision	Moyenne

Tableau 3 : tests sensoriels
(d'après HFM-091/RTG-027, 2008)

Pour évaluer l'acuité visuelle et la sensibilité aux contrastes, la méthode classique consiste à présenter des tableaux d'optotypes (figures, lettres chiffres) au sujet. Il s'agit d'étudier un évènement spatial ponctuel. Les principales mires utilisées sont les mires USAF 1951, les E de Snellen et les anneaux de Landolt (National Academy of Science, 1980) (tableau 3).

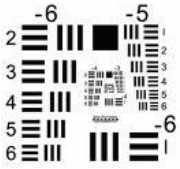
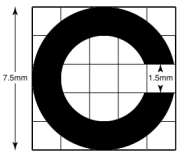
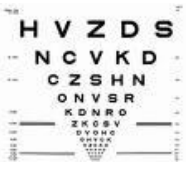
Types de stimuli	**USAF 1951**	**Anneaux de Landolt**	**Pelli-Robson**	**BaileyLovie**	**E de Snellen**
Chance	subjectif	1/8	1/26	1/26	¼
			Sémantique	Sémantique	
Exemple					

Tableau 4 : optotypes utilisables pour les mesures de tests sensoriels

Quel que soit le type de mires utilisé, il s'agit pour le sujet de déterminer, lors de l'utilisation de systèmes de vision nocturne, quel est l'élément le plus petit qu'il arrive à distinguer, c'est-à-dire de déterminer son acuité visuelle limite. Ceci permet de déterminer une fréquence de résolution spatiale pour une distance donnée, une luminance donnée et un contraste donné.

L'acuité visuelle est généralement exprimée en cycles par degré ou milliradian. Elle peut aussi s'exprimer en acuité de Snellen, unité principalement utilisée aux Etats-Unis, et exprimée en fraction du type 20/xx (sachant qu'une acuité de 20/20 correspond à 1,76 cy/mrad) (tableau 4). Il est possible d'effectuer cette évaluation pour différents niveaux de luminance et de contraste.

Notation de Snellen (à 20 pieds)	Angle visuel (minutes d'angles)	Valeur en cycles par milliradian
20/1600	80	0,02
20/1200	60	0,03
20/800	40	0,04
20/500	25	0,07
20/400	20	0,08
20/320	16	0,11
20/250	12,5	0,14
20/200	10	0,17
20/160	8	0,215
20/125	6,3	0,27
20/100	5	0,34
20/80	4	0,43
20/63	3,2	0,49
20/50	2,5	0,69
20/40	2	0,86
20/32	1,60	1,07
20/25	1,25	1,35
20/20	1	1,72

Tableau 5 : table d'équivalence entre les différentes notations de l'acuité visuelle

Utilisée principalement aux Etats-Unis, la « USAF 1951 Tri- Bar Resolution Chart » (tableau 3) contient 7 groupes de 6 éléments. Chaque élément est composé d'une paire de motifs de 3 barres, un motif orienté verticalement et un orienté horizontalement. Le premier élément de chaque groupe est exactement le double du premier élément du groupe suivant plus petit. Un facteur de conversion est utilisé pour convertir le numéro de l'élément et du groupe en résolution du système d'aide à la vision. Un inconvénient potentiel de ce type de mire est que l'écart entre la taille des barres est relativement grand (12,25 %) (Task, 2001). Ceci limite la précision avec laquelle on détermine la capacité de résolution spatiale d'un oculaire de jumelles, en particulier si un observateur est utilisé. Il n'est pas possible de contrôler si la réponse indiquée par le sujet est réellement le plus petit élément perçu ou non.

Il est possible d'utiliser également les E de Snellen: on parle d'ailleurs d'acuité de Snellen. Cette mire est souvent utilisée aux Etats-Unis par les ophtalmologistes pour évaluer l'acuité visuelle des patients. L'espace entre les barres est utilisée pour exprimer la fréquence spatiale du stimulus. En France, c'est l'échelle de Monoyer qui est généralement utilisée par les ophtalmologistes. Pour les contrôles d'aptitude visuelle des pilotes, on utilise les anneaux de Landolt, équivalents à des « C », où la taille angulaire de l'ouverture est fixée et le contraste spécifié. Le but de l'observateur est de détecter l'orientation de l'ouverture du « C ». Pinkus et Task (1997) ont utilisé ces stimuli pour déterminer l'acuité visuelle à travers les JVN comme une fonction des niveaux d'illumination ambiante nocturne. Souvent, les résultats sont convertis en acuité de Snellen (20/xx). L'avantage de ce type de stimuli est de pouvoir jouer sur la taille des anneaux, le contraste de l'image et l'orientation de l'ouverture.
Nous avons décidé de ne pas utilisé les mires de Pelli-Robson (acuité visuelle uniquement) et Bailey-Lovie (contraste uniquement) pour éliminer la composante sémantique. Les E de Snellen, dont le principe est similaire à celui des anneaux de Landolt puisqu'il faut détecter l'orientation du E, n'ont pas été choisis car la probabilité de trouver la bonne réponse par hasard est au minimum de 1 sur 4 alors qu'elle est de 1 sur 8 avec les anneaux. Pour les différentes évaluations, nous avons décidé d'utiliser les anneaux de Landolt.

2.3. Les tests cognitifs

Une analyse des équipements limitée à la prise en compte des propriétés sensorielles humaines peut s'avérer insuffisante au regard de la sécurité d'emploi. La gamme des méthodes d'évaluation des fonctions cognitives est encore assez limitée (tableau 5). Selon Roumes, « son extension repose sur la prise en compte de données théoriques récentes relatives aux images naturelles (Rousselet, 2003 ; Buffat, 2007) et sur la transposition de méthodes de quantification de la perception aux spécificités du contexte opérationnel ».
Au niveau cognitif, les principaux tests sont l'évaluation de la distance et celle de la pente. Une des approches développées pour l'évaluation de la distance se fait à partir de vidéos enregistrées pendant des vols et affichées à travers les optiques du système (Roumes et al, 1998 ; Léger et al., 1998). Cette estimation est basée sur une tâche de double-distance que ce soit pour une estimation des distances horizontales ou verticales (c'est-à-dire la hauteur). Il s'agit pour le pilote de se positionner activement, avec son hélicoptère, pour qu'un repère proche se trouve à mi-distance entre sa propre position et un repère lointain, la distance définie auparavant entre deux repères étant variable (figure 42). Il s'agit dans ce cas

d'évaluation de double distance. La technique est identique pour une estimation dans le plan vertical (double hauteur).

Tubes Intensificateurs de Lumière	
VDC et JVN	
Test	Priorité
Estimation des distances	Haute
Estimation des pentes	Haute
Perception de cibles (DRI)	Moyenne
Estimation de la vitesse	Haute
Charge de travail	Haute

Tableau 6 : tests cognitifs
(d'après HFM-091/RTG-027, 2008)

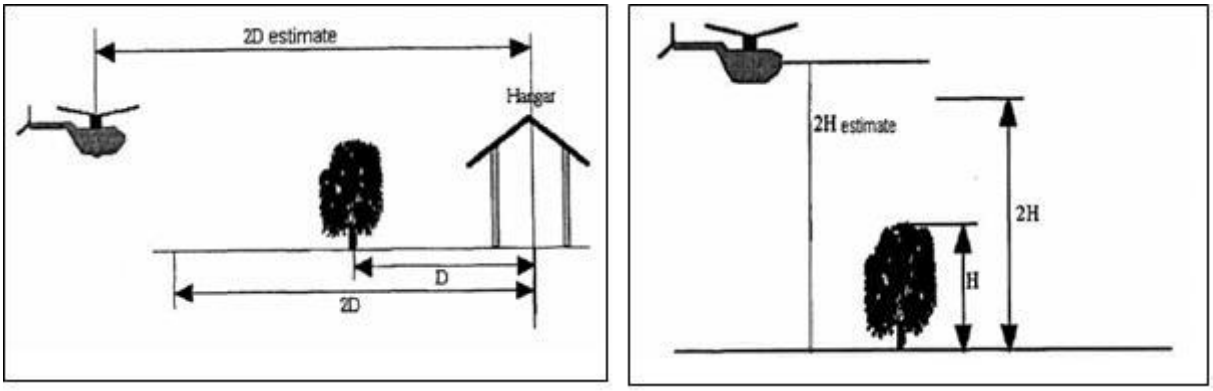


Figure 42 : estimation de la double distance et de la double hauteur (Roumes et al., 1998).

2.4. Conclusions

L'avantage des mesures, de laboratoire est de donner des résultats reproductibles, malgré la variabilité interindividuelle assez importante avec ce type de systèmes. Ces différents tests permettent d'obtenir des résultats qui peuvent être comparés à des standards établis sur des bases physiques ou sensorielles mais ils sont assez loin de la réalité opérationnelle. Ces mesures ne sont pas toujours prédictives de la réalité opérationnelle et demeurent éloignées des tâches auxquelles le pilote est confronté pendant ses vols. Elles ne font pas référence aux critères d'utilisabilité ou de pertinence perceptuelle. Elles restent caractéristiques du côté amont du système anthropotechnique et ne reflètent que partiellement la pertinence opérationnelle. Ces mesures sont faites à l'aide d'images fixes et simples, sans rendu réaliste,

et qui ne permettent pas de combiner les différentes dimensions de la vision en condition écologique.

3. Evaluations en vol

Puisque les évaluations en laboratoire ne permettent pas une évaluation complète des performances d'un système de vision nocturne, les essais en vol constituent une étape indispensable pour déterminer les performances opérationnelles d'un système.

Comme en laboratoire, les tests doivent inclure des paramètres opérationnels, les risques de douleur et fatigue, les problèmes de sécurité et la prise en compte des facteurs humains dans l'ensemble. Il est possible d'adapter aux conditions d'essais en vol des méthodologies spécifiques fondées, dans une certaine mesure, sur des techniques de laboratoire (Roumes et al., 1998). L'intérêt est de remplacer l'estimation verbale de la distance et de l'altitude, qui est subjective, par des métriques plus objectives. L'utilisation de telles méthodes plus orientées action que perception ont cependant des limites dans la mesure où les règles de sécurité doivent être respectées.

Dans la plupart des cas, les manœuvres effectuées en vol pendant les phases d'évaluation sont similaires à celles effectuées en opération par les pilotes (Sebbaghi, 2007). Il y a évaluation des systèmes dans les phases de roulage, décollage, d'approche et d'atterrissage, ainsi que des différentes phases de navigation.

Il faut être conscient que les évaluations menées en conditions réelles ne permettent généralement qu'un contrôle extrêmement limité des variables d'environnement, car elles se déroulent en environnement réel sur lequel l'expérimentateur n'a pas de contrôle. Et aussi parce qu'en voulant contrôler trop de variables il y aurait intrusion dans l'activité de l'opérateur et ce ne serait plus l'activité réelle qui serait évaluée. L'expérience acquise dans les quinze dernières années montre les difficultés à prédire en laboratoire les résultats obtenus en vol et à obtenir en condition opérationnelle des résultats dont l'interprétation est totalement fiable.

4. Conclusion pour les évaluations opérationnelles en laboratoire

Améliorer les capacités de prédiction des solutions techniques employées pour évaluer les DVN représente un grand intérêt pour les industriels en termes de cout mais en terme de recherche et développement pour améliorer les performances de leurs futurs dispositifs.

A l'heure actuelle et avec les méthodes utilisées aujourd'hui, les concepteurs doivent attendre les essais en extérieur ou en vol pour avoir des tests prédictifs de la réalité opérationnelle.

Ceci intervient généralement tardivement dans le processus. Plus une modification intervient tardivement dans le processus de conception d'un système, plus elle est difficile à mettre en œuvre. De plus, les méthodes actuelles ne permettent pas de tester l'ensemble des variables du système « image/ amplificateur/ sujet » afin d'obtenir une amélioration de performance et un meilleur confort perceptif de l'utilisateur.

Pour améliorer la prédictivité des méthodes, il faut donc introduire la notion de contexte et d'environnement opérationnel qui modifie la perception des images. La réalisation d'évaluations en laboratoire présente l'avantage d'avoir des résultats relativement reproductibles mais difficiles à relier avec les performances opérationnelles obtenues lors des essais en vol.

Le but de cette étude est de mettre en place et de valider une méthodologie utilisant des critères d'évaluation des systèmes de vision nocturne qui permettent d'améliorer la prédictivité de la performance opérationnelle sans perdre l'intérêt d'un environnement bien contrôlé. Pour cela, nous allons utiliser des images ayant un sens par rapport à la réalité opérationnelle des pilotes d'hélicoptères, c'est-à-dire des scènes similaires à celles vues en vol par les pilotes et dont les caractéristiques optiques sont mesurables. Dans les parties suivantes, nous allons expliquer brièvement quelles sont les méthodologies optiques utilisées pour caractériser les DVN. Nous allons aussi présenter les méthodologies sensorielles et cognitives développées dans le cadre de cette étude afin d'évaluer les systèmes de vision nocturne pour pilotes d'hélicoptères avec des opérateurs, dans des conditions de laboratoire avec des tâches en lien avec leur activité de pilotage.

PARTIE 2: METHODOLOGIE PHYSIQUE

« La difficulté de réussir ne fait qu'ajouter à la nécessité d'apprendre ».

Beaumarchais

Concevoir des systèmes de vision nocturne (DVN) requiert de prendre en considération et d'évaluer une multitude de critères, dans le but d'obtenir un système qui répond aux exigences d'utilisation et de confort de l'opérateur. Nous avons vu dans la première partie qu'il existe trois catégories de tests recommandés pour caractériser les systèmes de visionique : ceux de nature physique, sensorielle et cognitive.

Cette partie concerne les méthodologies physiques, en rapport avec le domaine de l'ingénierie de conception des systèmes. C'est le domaine de compétences des opticiens et des experts des technologies d'intensification de lumière. Dans le cadre du présent travail, l'approche expérimentale des méthodologies de mesure physique n'a pas d'objet. Cependant, pour assurer une bonne compréhension des enjeux, il est utile de s'intéresser et de décrire les méthodologies de mesure utilisées pour l'évaluation physique des DVN.

Dans cette partie, nous présenterons tout d'abord les recommandations émises par le groupe de travail de l'OTAN pour caractériser les systèmes de vision nocturne à base d'intensification de lumière. Dans une seconde partie, les moyens mis en place par Thales Avionique, compte tenu de ces recommandations, seront sommairement décrites.

1. Présentation des mesures physiques recommandées

Les tests optiques sont associés aux caractéristiques physiques du DVN telles que définies dans la première partie. Il existe un grand nombre de tests possibles pour les systèmes de vision nocturne. La taxonomie des méthodologies existantes est divisée en quatre catégories en fonction du type de DVN (type 1 ou type 2) et de capteurs (IL ou écran). Ce sont les tests utilisés pour l'intensification de lumière qui nous intéressent, dans notre étude.

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 3 de la première partie, ces tests sont classés par rang de priorité. Pour les systèmes à intensification de lumière, il existe une quinzaine de tests de haut rang dont les mesures sont considérées comme étant critique[9]. Les tests prioritairement recommandés (c'est-à-dire de rang le plus haut) sont listés dans le tableau 7.

[9] Il existe quelques différences entre les systèmes de type 1 et de type 2.

Tests
Champ de vision
Défauts des tubes
Halos
Gain de luminance
Agrandissement
Disparité d'amplification
Modulation de contraste
Neutralité
Gamme de focalisation de l'objectif
Disparité d'alignement des tubes
Tirage d'anneau
Disparité de déviation prismatique
Pouvoir de réfraction
Résolution
Transmission de luminance
Parallaxe

Tableau 7 : liste des tests prioritaires recommandés par le groupe de travail de l'OTAN (d'après HFM-091/RTG-027, 2008)

2. Réalisation des mesures recommandées

L'ensemble des mesures recommandées n'a pas toujours besoin d'être totalement réalisé, par exemple du fait que certaines mesures sont effectuées par le fournisseur des tubes IL (tableau 2). D'autres sont plus spécifiques à ces systèmes de visionique (type 2 en particulier).

Tests	Mesures réalisées
Disparité d'amplification	Définition par conception : pas de mesure
Gamme de focalisation de l'objectif	
Tirage d'anneau	
Disparité de déviation prismatique	
Pouvoir de réfraction	
Halos	Uniquement chez fournisseur
Défauts des tubes	Chez fournisseur et Thales
Disparité d'alignement des tubes	
Champ de vision	Chez Thales
Gain de luminance	
Résolution	
Modulation de contraste	Remplacée par FTM
Transmission de luminance	Pas de mesure

Tableau 8 : récapitulatif des mesures à effectuer et des modes de réalisation

De plus, certains tests ne sont pas effectués car certaines caractéristiques sont définies lors de la conception optique. Ces aspects ne sont pas mesurés, donc les tolérances de fabrications doivent être cohérentes avec les tolérances humaines (Farrell et Booth, 1984). Les caractéristiques définies par conception (tableau 8) et non mesurées sont :

- La gamme de réglage des objectifs. Les objectifs sont des bagues de réglage avec deux butées. Sur l'ensemble de cette course, la position correspondant à l'infini et la dynamique est réglée par mesures chez le fournisseur. Cette performance est peu sensible à la variation ;
- Le tirage d'anneau. Ceci correspond à la distance entre le dernier élément optique et l'œil. Il est défini en CAO (Conception Assistée par Ordinateur) afin de permettre le port de lunettes et d'équipement RBNC (Radiologique Nucléaire Bactériologique Chimique) ;
- La présence de déviation prismatique. C'est la déviation des rayons due à l'existence de la visière. La surface de la visière étant courbe, il y a déviation des rayons et les objets sont vus un peu plus près qu'ils ne le sont en réalité ;
- Le pouvoir de réfraction. L'ensemble du système optique que constitue le système de vision nocturne produit une image à une distance donnée. C'est l'effet de focalisation du système. Dans les systèmes de type 2, ce pouvoir est généralement fixe puisqu'il n'y pas de réglage possible à l'oculaire ;
- L'absence d'agrandissement et les disparités d'agrandissement. Ce système est conçu pour qu'il n'y ait pas d'agrandissement.

Il n'existe qu'un nombre limité de sociétés fabricant des tubes. Certaines mesures sont alors effectuées chez le fournisseur, telles que la mesure :

- des halos ;
- des défauts des tubes ;
- de la disparité d'alignement des tubes.

Thales, fabricant de DVN de type 2, a orienté la mise en place de ses moyens de mesure pour ce type de système. Des bancs de mesure ont été développés pour répondre à ces besoins spécifiques. Aucune information ne peut être fournie sur ces bancs par souci de confidentialité.

Pour les études entreprises, ce sont donc les tests recommandés issus du groupe HFM-91/RTG-027 qui apparaissent le plus pertinents que nous allons présenter plus en détail, à savoir les mesures :

- du champ de vision ;
- des défauts des tubes ;
- du gain de luminance ;
- des disparités binoculaires ;
- de la fonction de transfert de modulation ;
- de la mesure de résolution.

2.1. Champ de vision

L'objectif de cette mesure est de déterminer l'angle de vue maximal du DVN, sur l'axe vertical et horizontal. Il faut vérifier que le champ de vision spécifié correspond au champ réel (Rash et al., 1996). Pour cela, il faut mesurer que l'augmentation du tirage d'anneau de 10mm ne modifie pas de manière significative la taille du champ de vision. Le tirage d'anneau est la distance qui sépare la pupille de sortie de la lentille la plus proche de l'œil de l'observateur. On peut aussi parler de dégagement oculaire.

L'appareil utilisé inclut une table de rotation sur laquelle sont placés un photomètre, une source de lumière uniforme à 2856K (collimateur) et un enregistreur de signal (figure 43).

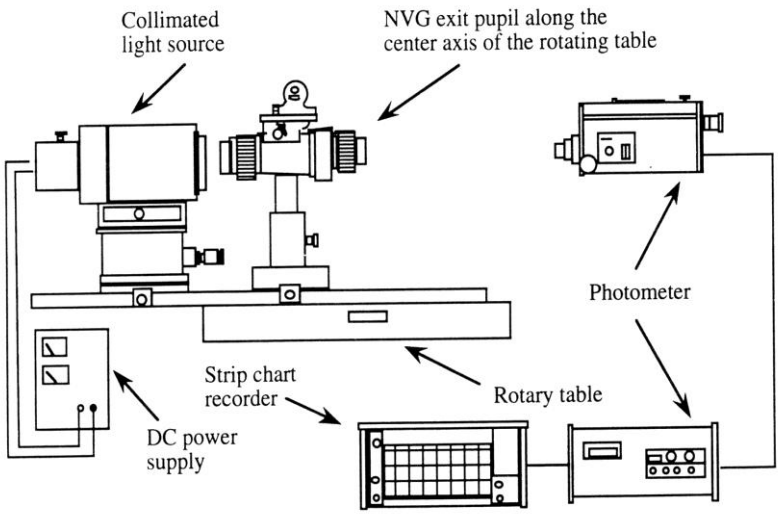


Figure 43 : dispositif de test du champ de vision pour un DVN à intensification de lumière (d'après HFM-091/RTG-027, 2008)

Le collimateur est placé devant les objectifs du DVN, au plus près et centré par rapport au champ de vision. Il est réglé pour fournir une illumination équivalente à une nuit de pleine lune afin d'obtenir la luminance maximale en sortie des tubes IL. Le photomètre permet de mesurer la luminance en sortie des tubes au travers des oculaires. Le photomètre ne pouvant faire des mesures que sur des angles assez réduits, il faut effectuer plusieurs mesures dans le champ. Le photomètre reste fixe tandis que le DVN et le collimateur sont mobiles.
La figure 44 montre un exemple d'enregistrement effectué avec cet appareillage.

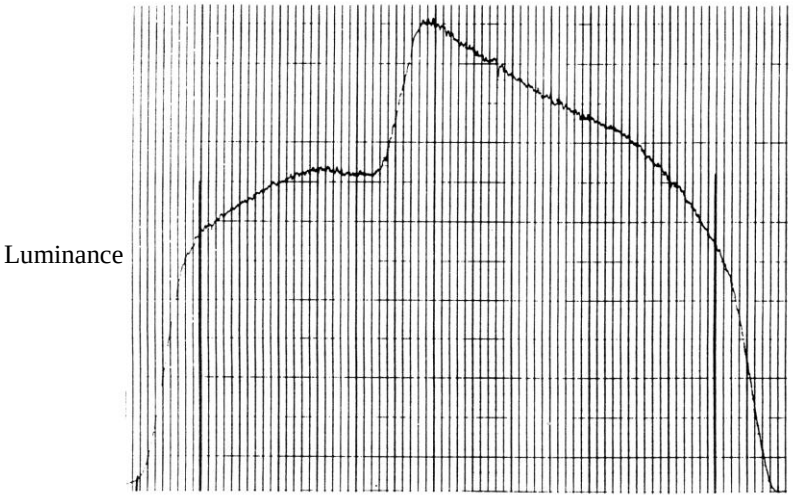


Figure 44 : Exemple de tracé de signal enregistré pour la mesure du champ de vision (d'après HFM-091/RTG-027, 2008)

L'angle de rotation de la table et le signal enregistré permettent ensuite de transformer les mesures enregistrées en degrés et donc d'exprimer la taille du champ de vision.

2.2. Défauts des tubes

L'objectif est de déterminer la présence de « tâches » sombres dans le champ de vision des tubes intensificateurs de lumière non liés à l'image entrante. Le but est d'assurer qu'il n'y a pas de défauts visibles de taille trop importante dans les tubes IL (MIL-I-49428(CR), 1989).

Taille des tâches (mrad)	Nombre de tâches dans la zone suivante		
	Cercle de 206 mrad de diamètre	Anneau compris entre cercles de 206 et 562 mrad de diamètre	Anneau compris entre cercle de 562 mrad diamètre et le diamètre de l'écran total
8,5 ou plus	0	0	0
5,6 to 8,4	0	1	2
2,8 to 5,5	0	2	3

Tableau 9 : critère de mesures des défauts des tubes (d'après AC/323 (HFM-091) TP/76)

Le critère consiste à mesurer le nombre de « tâches » sombres et leur localisation (tableau 9).
Le dispositif est composé de :

- une mire avec des lignes noires sur un fond blanc, représentant des cercles. Ils correspondent aux diamètres de référence (tableau 9) ;
- une source lumineuse ;
- une caméra avec un angle de vision suffisamment large pour photographier le champ de vue entier et assez sensible pour enregistrer l'image issue du DVN ;
- un support à la caméra et au DVN ;
- une mire avec une série de taches circulaires incluant les tailles de taches.

Le DVN est placé à la distance qui permet de produire les cercles requis à l'aide de la mire. La caméra est placée à la place des yeux de l'opérateur et fournit une image de la mire avec les anneaux, vue au travers du DVN. La mire est ensuite remplacée par la seconde mire avec les taches sombres. L'image de cette dernière est ensuite insérée dans le champ de la première image. Si le nombre de taches sombres détectées, leur taille et/ou leur position n'atteignent pas les critères fixés, l'image issue du tube IL est considérée non acceptable.

2.3. Gain de luminance

L'objectif est de déterminer :

- le maximum de luminance en sortie du système pour une luminance d'entrée sur l'ensemble du champ (Rash et al., 1996);
- le gain d'éclairement pour les luminances d'entrée qui sont inférieures au niveau requis pour activer le contrôle automatique de gain (Rash et al., 1996).

La luminance et le gain de luminance sont des mesures permettant d'exprimer la relation entre la luminance de sortie du DVN et la luminance d'entrée.
La luminance est la mesure de la luminance de sortie maximale, régulée par le contrôle automatique de gain. Elle donne une indication sur la possibilité de voir aisément une image intensifiée, dans une zone bien éclairée, pour un opérateur. Elle est obtenue pour des niveaux de luminance d'entrée spécifiques, exprimés en candela par mètre carré (tableau 9).
Le gain de luminance est le rapport entre la luminance de sortie et la luminance d'entrée quand le DVN est opérationnel et dans la zone d'éclairement où le contrôle automatique de gain commence à opérer. Le gain de luminance est une fraction sans dimension obtenue aux mêmes niveaux de lumière d'entrée.

Pour les deux mesures, la procédure nécessite :

- une source lumineuse pouvant fournir une gamme de luminance comprise entre 3,5.10 $^{-6}$ cd/m² et 0,07 cd/m². La source de lumière doit avoir la distribution spectrale d'un corps noir avec une température d'émission de 2856 K (sphère intégrante, collimateur, …) ;
- un photomètre qui doit avoir une sensibilité inférieure à 3,5.0^{-5} cd/m².

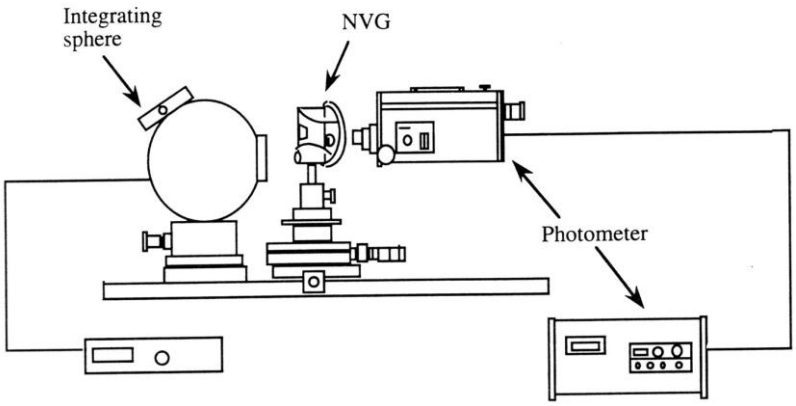


Figure 45 : dispositif expérimental pour mesure le gain de luminance (d'après HFM-091/RTG-027, 2008)

Pour des résultats précis il est essentiel de contrôler la sortie de la source lumineuse, en maintenant la bonne température de couleur[10] et la maîtrise de l'uniformité de luminance dans le champ.

Pour cette procédure seulement, le photomètre utilisé est modifié pour avoir une ouverture de 7 mm sur sa lentille objectif. Cette valeur est celle du diamètre le plus large que l'œil peut atteindre, dans des conditions de basse luminance. Le photomètre est placé devant la source lumineuse pour vérifier son calibrage et assurer que les valeurs de luminance émises sont correctes pour les valeurs d'ouverture correspondantes (figure 45). Le DVN à évaluer est placé avec la lentille objective aussi près que possible de la source lumineuse. L'ouverture limite du photomètre est placée à la position attendue de l'œil et dirigée vers le centre du champ de vision du DVN.

Une fois que tous les composants ont été placés, la source lumineuse est ajustée pour produire une luminance d'entrée au niveau des objectifs du DVN d'environ 3,5.10^{-5} cd/m² (HFM-

[10] Il faut noter que les résultats sont valables pour une température de couleur d'une lampe standard spécifique. Quand la distribution spectrale ou la température de couleur de la source lumineuse sont différents, d'autres résultats seront obtenus.

091/RTG-027, 2008). La luminance de sortie est mesurée et enregistrée par le photomètre. L'ouverture de la source lumineuse est alors ajustée pour produire une luminance plus haute. La luminance de sortie est de nouveau enregistrée. Cette action est répétée jusqu'à ce que la lampe atteigne sa capacité de luminance maximale, soit environ 0,07 cd/m² (HFM-091/RTG-027, 2008). Le pas entre les niveaux de luminance doit être moins grand aux niveaux inférieurs et plus grand pour les niveaux plus hauts. Le changement de valeur d'un facteur deux est un bon compromis pour limiter la procédure à un nombre raisonnable de points de données et fournir l'espacement d'intervalle suffisamment excellent pour de ne pas manquer les effets intéressants.

Les résultats de cette mesure peuvent être présentés sous forme de tableau (tableau 10) avec trois colonnes de données : la luminance d'entrée, la luminance de sortie et le rapport de la luminance de sortie sur la luminance d'entrée appelé aussi gain de luminosité, défini précédemment (tableau 10). Les données brutes peuvent aussi être représentées sous forme de graphique (figure 46), avec la luminance de sortie en fonction de la luminance d'entrée. La valeur de luminance de sortie maximale obtenue est alors enregistrée comme la luminosité maximale fournie par le DVN.

Luminance d'entrée (cd/m²)	**Luminance de sortie (cd/m²)**	**Gain de luminance**
$3{,}76.10^{-5}$	0,07	1862
$7{,}88.10^{-5}$	0,14	1777
$1{,}57.10^{-4}$	0,27	1720
$3{,}15.10^{-4}$	0,58	1841
$6{,}3.10^{-4}$	1,20	1905
$1{,}26.10^{-3}$	2,47	1960
$2{,}51.10^{-3}$	4,21	1677
$5{,}04.10^{-3}$	4,25	843
$1{,}01.10^{-2}$	4,28	424
$2{,}01.10^{-2}$	4,32	215
$4{,}04.10^{-2}$	4,35	107
$8{,}05.10^{-2}$	4,35	54

Tableau 10 : exemples de données de gain de luminance
(d'après HFM-091/RTG-027, 2008)

Le gain de luminance peut aussi être obtenu graphiquement en fonction de luminance d'entrée (figure 47). Ce graphique fournit des informations sur la manière dont le DVN amplifie la lumière. La courbe de luminance de sortie montrée dans la figure 46, qui est aussi obtenue de cette procédure, fournit une indication sur la quantité de lumière que l'observateur perçoit à l'oculaire. Puisque l'acuité visuelle de l'observateur varie considérablement avec le niveau de

lumière, la dernière courbe fournit des indications quant à la capacité visuelle de l'observateur à extraire des informations clefs de la scène telle qu'elle est fournie par le DVN.

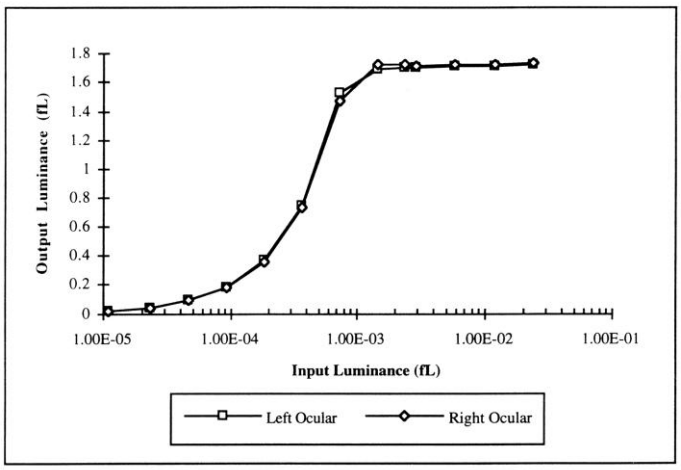


Figure 46 : luminance de sortie en fonction de la luminance d'entrée (d'après HFM-091/RTG-027, 2008)

Le tableau 10 et les figures 46 et 47 indiquent que la luminosité et le gain de luminosité sont affectés par le niveau de luminance d'entrée, bien qu'ils soient typiquement enregistrés seulement à des valeurs spécifiques, la luminosité à la valeur maximale et le gain de luminosité à une luminance d'entrée d'environ $1{,}26.10^{-3}$ cd/m². Cela peut induire en erreur car les DVN sont souvent exploités à des niveaux de lumière autres que ceux utilisés pour ces mesures.

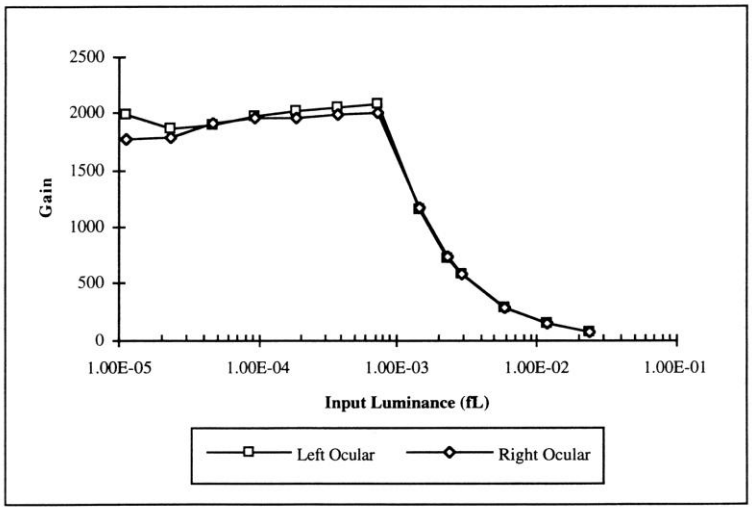


Figure 47 : gain de luminance en fonction de la luminance d'entrée (d'après HFM-091/RTG-027, 2008)

2.4. Disparités binoculaires

L'objectif est de mesurer la différence de position horizontale et verticale de l'image intensifiée produite par les deux canaux optiques du DVN (Rash et al., 1996). Le but est d'ajuster la superposition des images droite et gauche par rapport à l'image paysage. La déviation est généralement exprimée en milliradian (mrad).

La déviation verticale maximale entre les centres des écrans ou les points centraux correspondants pour les images IL ne doit pas excéder 1,8 mrad. La déviation horizontale maximale entre les centres des écrans ou les points centraux correspondants pour les images IL ne doit pas excéder plus de 5 mrad (Farrell et Booth, 1984 ; HFM-091/RTG-027, 2008).

L'utilisateur doit avoir un contrôle de mouvement de l'affichage vertical et horizontal pour obtenir ces critères d'alignement avec 2 générateurs d'image. Si l'utilisateur a des ajustements d'alignement à effectuer, l'alignement sera réalisable, approximativement, entre le milieu et les ¾ de la gamme totale de réglage du positionnement tant horizontal que vertical. Une gamme d'ajustement de l'alignement par l'utilisateur de +5 mrad est suggérée, en vertical et en horizontal. Si les ajustements sont dans des incréments fixes, les incréments seront de moins d'1 mrad et de préférence de 0,5 mrad.

Comme la combinaison des lentilles objectives, des optiques, des tubes IL et des lentilles oculaires des DVN est relativement complexe, il est possible d'avoir une disparité entre l'axe optique d'entrée et l'axe optique de sortie. Ainsi, les objets qui sont à un point particulier dans l'espace peuvent sembler être à un point différent quand ils sont vus avec un DVN. Le paramètre mesuré est la différence angulaire relative entre l'axe optique de la lentille objective et l'axe optique de la lentille oculaire.

L'équipement exigé pour cette mesure inclut :

- une table rotatoire, sur laquelle est monté le DVN ;
- un collimateur émettant un spot lumineux de petite taille ;
- une petite caméra CCD (Charged Coupled Device) ;
- un moniteur vidéo ;
- un compas numérique pour mesurer précisément la distance sur le moniteur vidéo.

La figure 48 présente la disposition de l'équipement pour cette mesure.

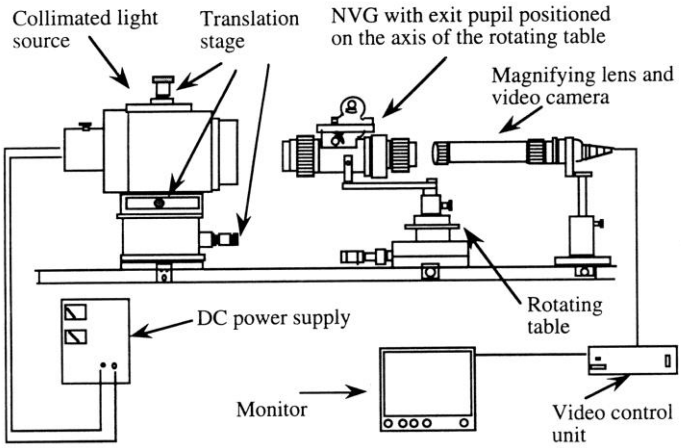


Figure 48 : dispositif expérimental pour la mesure de disparités binoculaires (d'après HFM-091/RTG-027, 2008)

Pour conduire cette mesure correctement, la caméra doit être adaptée avec une lentille de grande longueur focale, sur l'ordre de 100 à 120 millimètres. Cela permet que la caméra soit plus sensible aux défauts optiques, en créant un spot lumineux plus grand et à des plus grands mouvements sur le moniteur vidéo, plus faciles à mesurer précisément. On doit aussi connaître le champ de vision de la caméra pour convertir la distance linéaire sur le moniteur en unité de déviation angulaire.

La caméra vidéo est ajustée devant le collimateur, sans le DVN, jusqu'à ce que le petit spot lumineux apparaisse dans le centre du moniteur vidéo. Cela permet d'aligner l'axe optique de la caméra vidéo avec le collimateur. Le DVN est alors monté sur la table de rotation entre la caméra vidéo et le collimateur tel que l'axe de rotation de la table est directement au-dessous de la position de l'œil. La caméra est alors ajustée pour placer sa lentille objective directement sur l'axe de la table de rotation. Le spot de lumière dans le collimateur devrait maintenant être visible sur le moniteur quand il est vu au travers du DVN. Si le spot n'est plus au centre du moniteur vidéo, les axes optiques de sortie et d'entrée du DVN ne sont pas dans l'alignement. En connaissant le champ de vision angulaire de la caméra vidéo et la distance linéaire verticale et horizontale de déplacement du spot de lumière par rapport au centre du moniteur vidéo, l'erreur de déviation angulaire verticale et horizontale peut être calculée.

Après que l'erreur d'alignement des axes ait été enregistrée, la table de rotation est alors tournée dans le sens des aiguilles d'une montre et en sens inverse, jusqu'à ce qu'une ligne ait été parcourue à travers le champ de vision complet. À chaque angle du champ, la position verticale et horizontale du spot de lumière sur le moniteur vidéo est mesurée et enregistrée.

L'erreur d'alignement de l'axe optique de sortie et d'entrée peut être déterminée à partir de la position zéro de la compensation angulaire. La compensation dans les dimensions verticales et horizontales (figure 49) est la somme des erreurs d'alignement vertical et horizontal.
La somme représentant l'erreur d'alignement angulaire entre les deux axes d'observation, le 0 est aussi déterminée en prenant la racine carrée de la somme des compensations verticale et horizontale :

$$O = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

où, Y est la compensation angulaire verticale en degrés et

X est la compensation angulaire horizontale en degrés.

Cette mesure peut être enregistrée en milliradians, degrés ou minutes d'arc.

Horizontal Position degrees	Vertical Offset milliradians	Horizontal Offset milliradians
-15	-6.977	-3.189
-14	-6.284	-2.903
-13	-5.365	-2.549
-12	-4.625	-2.580
-11	-3.575	-2.331
-10	-3.170	-2.357
-9	-2.370	-2.057
-8	-1.775	-1.686
-7	-1.324	-1.643
-6	-1.025	-1.177
-5	-0.765	-0.917
-4	-0.559	-0.700
-3	-0.339	-0.426
-2	-0.165	-0.286
-1	-0.015	-0.197
0	0.0	0.0
1	0.068	0.166
2	0.570	0.354
3	0.823	0.466
4	0.904	0.523
5	1.134	0.889
6	1.466	1.174
7	1.800	1.143
8	2.362	1.383
9	2.863	1.394
10	3.491	1.783
11	3.922	2.154
12	4.929	1.866
13	5.137	1.880
14	5.395	1.871
15	4.559	2.040

Figure 49 : données issues de la procédure de mesures géométriques (d'après HFM-091/RTG-027, 2008)

2.5. Fonction de Transfert de Modulation (FTM)

L'objectif est de déterminer la FTM d'un DVN à basse, moyenne et haute luminance au centre et à un point à 75% du bord du champ de vision. Cette mesure est effectuée sur l'ensemble du dispositif, de l'image source à l'image finale, en passant par tous les composants optiques du système (Rash et al., 1996).

L'ensemble du système capteur/électronique ne doit pas diminuer la FTM (ou résolution limite) de plus de 10% aux niveaux de luminance indiqués dans la conception de la ligne de regard (NATO HFM-091/RTG-027, 2008). Des diminutions de FTM hors axe et en périphérie du champ doivent être inférieures au pourcentage déterminé par le fabricant.

Un appareil photo numérique monochrome avec un téléobjectif et un iris de 5 mm est utilisé. Il est relié à un ordinateur, un logiciel de capture d'image et le programme d'analyse d'image.

L'appareil photo numérique monochrome affiche une seule ligne verticale ou horizontale au milieu de la zone d'affichage; l'image est capturée et stockée sur un ordinateur pour analyse. De plus, une image de taille égale, prise avec la lentille, est enregistrée pour déterminer la quantité de bruit sombre. L'agrandissement d'image est 9.54 pour 1 (nombre de pixels dans l'image capturée pour chaque pixel dans la zone d'affichage). Pour obtenir une fonction, une région d'intérêt de 100 par 512 est enregistrée au milieu de l'image et est moyennée pour rapporter un tableau de 1 par 512. Un soin particulier est apporté pour assurer que la ligne verticale ou horizontale est correctement alignée sur « la région » d'intérêt d'afin de ne pas contaminer les résultats.

La FTM est présentée comme un graphique dépeignant le facteur de transfert de modulation pour des fréquences spatiales sur une gamme à partir de zéro où le facteur de transfert de modulation s'approche du zéro (figure 50).

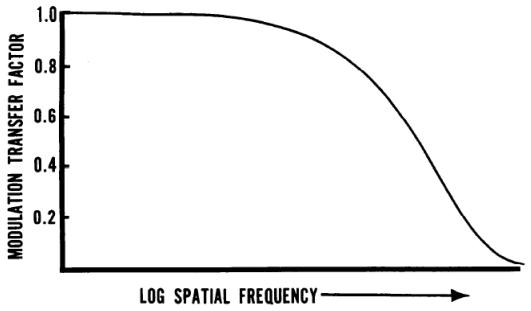


Figure 50 : courbe typique de la fonction de transfert de modulation (FTM)

2.6. Résolution

L'objectif est de déterminer la capacité de résolution du DVN dans l'axe et hors de l'axe. La résolution est une mesure de la capacité d'un système d'imagerie à reproduire une image le plus finement possible (Rash et al., 1996).

Un minimum de 1,2 cy/mrad est demandé au centre du champ et 0,8 cy/mrad à 14° d'excentricité (NATO HFM-091/RTG-027, 2008 ; MIL-A-49425, 1992).

Les objets suivants sont exigés pour exécuter ce test : une pièce où la lumière est contrôlée ou une zone de travail d'au moins de 25 pieds de long, soit 7,50 mètres, une mire de test appropriée comme la mire « USAF 1951 tri-bar » (figure 9), de contraste moyen à haut, une source de lumière pour éclairer la mire et le fond visible dans le champ de vision du DVN, à un niveau suffisant pour fournir la luminance de sortie maximale, une caméra avec une lentille de grande longueur focale (par exemple, 150 mm) pour photographier la mire vue au travers du DVN.

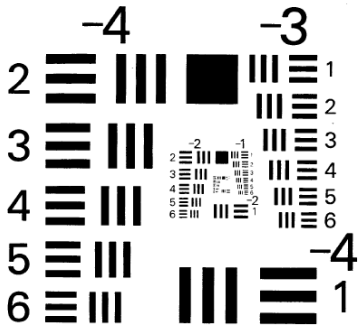


Figure 51 : mire de résolution USAF 1951

La mesure de l'acuité visuelle peut être un processus long et ennuyeux. L'utilisation de sujets humains est une complication parce qu'ils doivent être formés à l'utilisation des DVN et doivent être relativement familiers avec le système et la procédure d'évaluation.

Les données de résolution sont obtenues en utilisant la mire de résolution. La mire USAF 1951 (figure 51) consiste en grand nombre d'éléments, englobant une vaste gamme de tailles, divisées en groupe de six éléments. Ces derniers augmentent progressivement en taille (diminuant en fréquence spatiale) aux intervalles relatifs d'approximativement 12 %. Chaque élément contient deux modèles, chacun composé de trois barres sombres et séparé par des espaces blancs, de largeur égale; un modèle est horizontal et l'autre vertical. Chaque groupe est identifié par un numéro différent, tandis que les éléments dans chaque groupe sont

numérotés de 1 à 6. Pour une distance d'observation donnée, les nombres de groupe/élément peuvent être convertis en valeurs d'acuité visuelles (tableau 11).

Le diagramme est placé 6 mètres des lentilles objectives du DVN et est illuminé avec la lumière suffisante afin que la luminance de sortie du DVN soit presque à son maximum. Le centre de la mire est placé au centre du champ de vision du DVN pour obtenir les meilleures mesures d'acuité visuelles « dans l'axe ».

GROUP	ELEMENT	RESOLUTION (cy/mrad)
-4	1	0,38
-4	2	0,43
-4	3	0,48
-4	4	0,54
-4	5	0,60
-4	6	0,68
-3	1	0,76
-3	2	0,86
-3	3	0,96
-3	4	1,08
-3	5	1,21
-3	6	1,36
-2	1	1,52
-2	2	1,71
-2	3	1,92
-2	4	2,15
-2	5	2,42
-2	6	2,71
-1	1	3,04
-1	2	3,40
-1	3	3,82
-1	4	4,30
-1	5	4,84
-1	6	5,46

Tableau 11 : conversion de la mire de résolution USAF 1951 en unités de résolution

Chaque numéro de chaque groupe et d'élément est converti en unités de résolution spatiale. Les valeurs indiquées ici sont valables pour une mire placée à 6 m (ou 12 pieds)

La lentille objective de la caméra est placée à la position de la pupille de sortie du DVN et une photographie de la mire vue au travers du DVN est faite. La photographie est agrandie pour voir facilement le groupe et l'élément vertical et horizontal le plus petit qui peut être résolu (les barres noires et blanches sont séparées). Le groupe et le numéro de l'élément pour la tri-barre verticale et horizontale la plus petite sont enregistrés et sont convertis en valeur de résolution utilisant le tableau 5.

Pour vérifier que la qualité de la caméra est suffisante pour faire ces mesures, la caméra peut être placée avec sa lentille objective à 6 mètres de la mire et une photographie de celle-ci est prise. Après, cette photographie est agrandie pour que l'élément qui est au moins 3 tailles en dessous de celui qui a été résolu avec le DVN puisse être résolu. Si c'est le cas, alors la caméra et la lentille objective sont appropriées pour faire les mesures de résolution. En plus de la mesure de résolution « dans l'axe », la procédure est répétée avec la mire placée à 14 degrés « hors-axe » dans chacune des 4 directions : en haut, en bas, gauche, droite.

3. Conclusion

Les recommandations issues du groupe HFM-91/RTG-027, montrent l'existence d'une liste assez exhaustive des critères physiques à évaluer pour la conception d'un DVN, de type 1 ou de type 2 utilisant l'intensification de lumière. Dans le cadre des études réalisées, il est apparu important de maitriser les techniques de mesures utilisées. Cependant, ce sont les plus pertinentes par rapport à nos études qui ont été détaillées dans ce chapitre.

Les mesures physiques permettent de s'assurer que les tolérances de fabrication et les performances optiques des DVN demeurent compatibles des caractéristiques de la vision humaine. Cependant, ce type de tests ne permet pas d'évaluer les performances visuelles d'opérateurs utilisant les DVN.

Il convient donc maintenant de considérer la mesure directe des performances obtenues par les utilisateurs, ce qui nous emmène à nous intéresser aux méthodologies de nature sensorielle.

PARTIE 3: METHODOLOGIES SENSORIELLES

« Ils ne savaient pas que c'était impossible alors ils l'ont fait. »

Mark Twain

Les dispositifs de vision nocturne (DVN) nécessitent de de prendre en compte des aspects variés : mécaniques, opto-mécaniques et optiques lors de leur conception. Dans la partie méthodologie physique, les test et critères les plus utilisés ont été présentés. Une première catégorie de critères, centrée sur l'instrumentation, concerne plus particulièrement les caractéristiques physiques des sous-systèmes du DVN, c'est-à-dire les différentes composantes telles que les objectifs, les tubes intensificateurs de lumière (IL), etc. Il existe une diversité très importante de tests optiques caractérisant les aspects physiques des systèmes de visionique. La seconde catégorie, moins développée, est associée aux performances visuelles de l'utilisateur dans l'usage du système de visionique. Elle se décompose en deux sous-parties :

- les paramètres sensoriels qui se réfèrent essentiellement à l'aspect de sensibilité spatiale de la fonction visuelle (acuité, contraste, …);
- les paramètres cognitifs qui sont liés aux tâches perceptuelles de haut niveau nécessitant l'intégration spatiale et/ou temporelle des indices visuels primaires.

D'après cette constatation, le groupe de travail technique « Facteurs humains et médecine » de l'organisation de recherche et technologie de l'OTAN (HFM-091/RTG-027), recommande, dans son rapport AC/323(HFM-091)TP/76, l'usage de paramètres et méthodologies de tests de nature (i) optique, (ii) sensorielle et (iii) cognitive.

Le but de cette partie est de présenter les méthodologies sensorielles qui sont développées actuellement, en milieu industriel, pour étudier les systèmes de vision nocturne.

Dans le cadre des activités industrielles, il est généralement demandé de valider, avec des opérateurs naïfs ou experts, des systèmes de vision nocturne (type 1 et type 2) en cours de développement et/ou de validation opérationnelle.

Pour cela, ce sont des méthodes sensorielles qui ont été utilisées avec des mesures :

- d'acuité visuelle ;
- de sensibilité aux contrastes.

Dans la caractérisation sensorielle des systèmes de vision nocturne, les méthodologies d'évaluation de l'acuité visuelle sont classiques et bien codifiées.

Les mesures d'acuité visuelle étaient déjà réalisées dans l'industrie avec des mires USAF 1951, standard américain servant de référence pour les clients et les militaires. La consigne donnée au sujet est d'indiquer le numéro du groupe et de l'élément le plus petit dont il arrive à distinguer l'alternance noir-blanc avec 3 bandes noires. Ces mires ont un inconvénient majeur : elles permettent d'obtenir uniquement des réponses subjectives de la part des

opérateurs. Il n'est pas possible de contrôler si le sujet perçoit réellement cette alternance ou non.

Les mesures d'acuité visuelle ne fournissent cependant que des informations de résolution spatiale limite. De nombreux auteurs (Kotulak et Rash, 1992 ; Levine et Rash, 1989; Riegler, Whiteley, Task et Schueren, 1991 ; Wiley, 1989) ont mis en évidence l'effet du niveau de luminance et du contraste sur l'acuité visuelle.

D'autres tests sensoriels, comme la mesure de la sensibilité aux contrastes avec des systèmes de vision nocturne, n'ont été que relativement peu développés en pratique. Ils méritent une exploration plus détaillée et c'est pour cela que nous avons mis en place une méthode de mesure du contraste.

Dans la partie suivante sont présentées deux études. Le chapitre 1 concerne des mesures d'acuité visuelle effectuées sur 12 sujets afin d'évaluer l'impact de l'augmentation de l'écart interpupillaire sur l'acuité visuelle notamment à courte distance. Le chapitre 2 présente une nouvelle méthode développée pour évaluer la sensibilité aux contrastes avec des systèmes de vision nocturne à intensification de lumière.

- CHAPITRE 1 -

MESURES D'ACUITE VISUELLE

Par rapport à ceux de type 1, les systèmes de type 2 permettent une amélioration des aspects biomécaniques, en particulier une meilleure répartition des masses portées par la tête. Surtout, ils améliorent la vision de la scène extérieure puisque l'image intensifiée est projetée sur une visière semi-transparente, en superposition sur le paysage. Ainsi que nous l'avons vu, ceci nécessite de déplacer les tubes Il, généralement sur les côtés de l'équipement de tête. L'augmentation de l'écart entre les tubes provoque une augmentation "artificielle" de la distance interpupillaire. Ceci conduit à une situation d'augmentation de la séparation interoculaire, ou « hyperstéréoscopie » dans le domaine des systèmes de visionique.

Ces systèmes de type 2, avec des tubes IL déportés sur les côtés, génèrent un ratio de ±4 entre la distance interpupillaire naturelle (classiquement appelé IPD pour InterPupillary Distance) et l'écart des tubes (voir figure 35 dans la partie 1).

L'augmentation de l'écart interoculaire est connue pour modifier la relation entre accommodation et convergence, comme défini précédemment dans la partie état de l'art. Les systèmes de type 2 ont une distance de focalisation non ajustable au niveau de l'oculaire. Quant aux objectifs, ils sont généralement focalisés à l'infini lors d'une utilisation opérationnelle. Par conséquent, la situation devrait théoriquement mener à un conflit accommodation/convergence. La fusion binoculaire des images droite et gauche requiert de mettre en oeuvre des mouvements de vergence, en particulier pour les objets situés à courte distance. L'amplitude angulaire des mouvements de vergence est directement liée à la distance de l'œil à l'objet et à la distance entre les senseurs. Plus les objets sont proches, plus la demande en convergence va augmenter (figure 52).

D'un point de vue opérationnel, à courte distance, les pilotes rapportent plus de difficultés à utiliser les informations visuelles fournies par les systèmes de type 2 que par ceux de type 1. Généralement, ils peuvent utiliser sans difficulté les systèmes de type 1 jusqu'à 2 mètres, tandis que cela devient plus difficile avec les systèmes de type 2 dès 5 mètres.

Kotulak et Morse (1994b) ont réalisé une étude sur les effets de l'ajustement de la focalisation avec des systèmes de vision nocturne. Ils montrent que l'hyperstéréoscopie « perturbe la balance accommodation-convergence », en particulier quand le point de fixation est à moins

de 5 mètres. Ceci pourrait expliquer les différences de perception, rapportées par les pilotes, entre les systèmes de type 1 et 2.

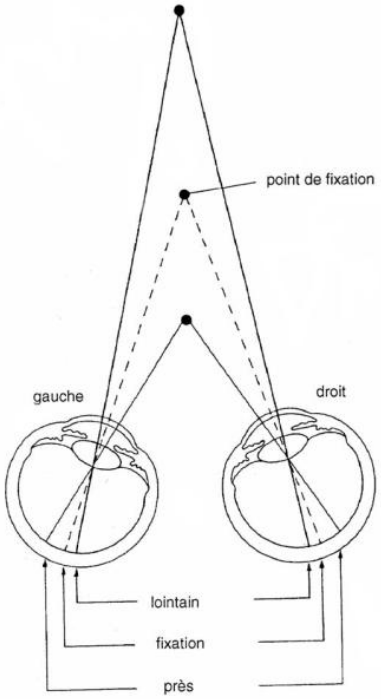


Figure 52 : schéma explicatif des mécanismes de la convergence

La ligne en pointillé représente l'axe de convergence des yeux pour un point de fixation donné. Quand l'objet est plus près, il est nécessaire de converger les yeux de manière plus importante. Inversement, quand l'objet est plus loin, la convergence est moins importante.

De manière très intéressante, ces auteurs montrent que « des erreurs d'ajustement des objectifs augmentent l'accommodation par rapport à la convergence, tandis qu'en hyperstéréoscopie, la convergence est augmentée par rapport à l'accommodation. Un résultat paradoxal est que, dans les systèmes hyperstéréoscopiques, les erreurs de réglage de focalisation pourrait réduire le conflit entre accommodation et convergence et ainsi restaurer la relation normale entre les deux ». De plus, en étudiant les collimateurs têtes moyennes (CTM), Menu, Seigneur, Barrault, Pradella et Batejat (1984) montrent que la performance de l'opérateur est optimisée quand la collimation est réglée à 4 mètres.

A partir de ces différentes études, nous avons posé l'hypothèse que la modification de la distance de focalisation de l'oculaire dans les systèmes de type 2 pourrait réduire le conflit entre accommodation et convergence. Pour améliorer la compréhension de ces mécanismes et vérifier notre hypothèse, une expérimentation a été menée pour explorer l'effet du conflit accommodation/vergence dans les systèmes de type 2. Pour cela, nous avons mesuré les effets des réglages de la distance de focalisation de l'oculaire sur l'acuité visuelle.

1. Etudes sur l'hyperstéréoscopie

Quelques considérations sur les mécanismes de base impliqués dans l'hyperstéréoscopie, et spécifiquement dans les problèmes d'accommodation/vergence, sont rappelées ci-dessous. Cette partie s'appuie sur la revue détaillée de la littérature présentée par Priot et al. (2006) sur la séparation interoculaire augmentée et sa relation avec l'hyperstéréoscopie dans les visuels de casque.

La plupart des études sur l'hyperstéréoscopie ont été réalisées à l'aide d'un téléstéréoscope. Il s'agit d'un dispositif optique et plus précisément d'un stéréoscope binoculaire qui permet de présenter une image en 3 dimensions (stéréoscopique) d'une image (ou d'un objet) distante.

Helmholtz fut le premier, en 1857, à mettre au point un téléstéréoscope afin d'augmenter le relief des objets distants. Ce dispositif permettait d'augmenter la disparité binoculaire et la profondeur apparente des objets 3D en augmentant « virtuellement » la distance interpupillaire effective des sujets. Helmholtz pensait que les sujets voyaient une reproduction exacte et réduite du monde extérieur.

Wallach, Moore et Davidson (1963) ont été les premiers à avoir exploré la modification de la perception de la profondeur, en utilisant un téléstéréoscope. L'arrangement optique permettait d'augmenter les disparités binoculaires. La convergence pour les objets 3D était altérée : les points de l'objet semblaient plus proches de l'axe de convergence, nécessitant plus de convergence, ou plus loin, nécessitant moins de convergence. Wallach a rapporté qu'il existait une adaptation perceptuelle (recalibration), suite à ce réarrangement, et que la modification de la profondeur perçue était rapide, partielle (atteignant 20% du maximum théorique), cumulative (temps d'exposition) et transférable à d'autres objets.

Fisher et Ebenholtz (1986) ont utilisé un protocole pré-exposition/exposition/post-exposition avec le système optique de Wallach (convergence augmentée). Ils ont mis en évidence que l'adaptation de la perception de la profondeur était une conséquence secondaire des changements dans la perception de la distance. Ils ont aussi suggéré que les répercussions sur la profondeur et de la distance dérivent de l'adaptation oculomotrice (système accommodatif ou son couplage avec le système de vergence).

En opposition avec la théorie de recalibration de Wallach, Fisher et Ciuffreda (1990) ont proposé une hypothèse selon laquelle l'adaptation serait basée sur les propriétés physiologiques du système oculomoteur. Ils ont étudié la perception des distances et de la profondeur, l'accommodation tonique[11], la vergence tonique[12] et le gain de vergence

[11] C'est l'état de réfraction de l'œil humain en l'absence de toute stimulation visuelle

accommodative (CA/C)[13] pendant 30 minutes suite à la vision au travers du téléstéréoscope. Le téléstéréoscope induit un conflit oculomoteur potentiel entre accommodation et vergence, conduisant à des changements de gain dans le couplage entre accommodation et vergence. Le système optique utilisé pour cette expérimentation permettait d'augmenter la convergence d'un facteur deux tandis que le stimulus accommodatif restait fixe. Une augmentation de la profondeur et de la distance est observée après exposition. Il n'y a pas de modification de la vergence accommodative mais il y a une forte augmentation de la vergence tonique.

D'après le modèle de contrôle de l'accommodation et de la convergence proposé par Schor (1979) et Schor, Wood et Ogawa (1984), les systèmes de vergence et d'accommodation sont composés d'éléments rapides (ou phasiques) et lents (correspondants aux éléments toniques). La composante lente fusionnelle du système de vergence se met en place pendant une convergence soutenue (plus de 30 secondes) et montre une relaxation incomplète après occlusion d'un œil. Les changements des niveaux absolus d'accommodation et de vergence pourraient modifier la perception de la distance.

Judge et Miles (1985) ont mis en évidence que le rapport AC/A augmente après une exposition de 30 minutes à des lunettes périscopiques, similaires à un téléstéréoscope. Dans une autre étude (Miles et Judge, 1987), ces auteurs ont obtenu des résultats similaires c'est-à-dire une diminution du gain de la réponse accommodative vergente et une augmentation de la vergence accommodative. Il y a aussi un déplacement vertical des courbes de réponses de vergence accommodative de quelques sujets.

Bobier et McRae (1996) ont démontré que les changements dans le couplage entre accommodation et vergence sont uniquement obtenus lors d'une fixation alternée, pendant une période d'exposition au téléstéréoscope. Si la fixation est maintenue pendant l'exposition, dans une petite gamme de distance, la modification de la vergence tonique est suffisante pour contrecarrer le conflit entre accommodation et vergence.

Des différences interindividuelles significatives dans l'adaptation oculomotrice sont présentes dans la plupart des études.

Quel que soit mécanisme précis mis en jeu (recalibration perceptuelle ou adaptation physiologique du système oculomoteur), il semble y avoir « ré-interprétation » des indices

[12] Cela correspond au tonus de base, à l'état d'absence de fixation où les yeux sont relativement parallèles.

[13] La vergence accommodative est liée à la fixation. Elle correspond à la convergence mise en jeu par l'accommodation. Le gain accommodation-vergence, caractérisé par le rapport CA/A, est défini par la magnitude de la réponse en vergence associée à une unité de changement en accommodation. Il existe aussi un état d'accommodation mis en jeu par la convergence appelée accommodation vergente (?) dont le gain s'exprime ainsi : AC/A.

oculomoteurs (vergence et accommodation) pour la distance et des indices de disparités binoculaires pour la profondeur.
Une étude récente de Rogers (2003) souligne le rôle de la perspective différentielle dans le processus de recalibration de la vision après exposition à un téléstéréoscope.

2. Méthodes

Deux expérimentations ont été menées successivement dans le même environnement mais en utilisant un protocole différent. Les deux expérimentations ont été menées pour comprendre les effets du conflit accommodation-convergence quand les objectifs sont focalisés : à la distance de l'objet et à l'infini.
La partie commune des méthodes sera tout d'abord décrite, puis nous présenterons les aspects spécifiques de chaque expérimentation.

2.1. Matériel

Le dispositif utilisé est basé sur le principe du téléstéréoscope (figure 53). Un support optique spécifique comportant des miroirs et un système de type 1 (génération 3 - Omnibus IV) est utilisé dans les expérimentations afin de permettre de varier la séparation interoculaire. Une batterie externe permet le fonctionnement du DVN. Le support inclut une mentonnière et un support frontal pour maintenir la position du sujet par rapport aux oculaires des Jumelles de Vision Nocturne (JVN). Les miroirs sont placés devant les JVN pour simuler une augmentation « virtuelle » de la distance interpupillaire. Il y a deux paires de miroirs :

- une paire de miroirs fixes orientés à 45° placés devant les tubes IL,
- une seconde paire de miroirs mobiles et réglables qui permettent d'augmenter ou diminuer la distance interpupillaire en modifiant la distance entre les deux images monoculaires.

Dans les conditions « distance interpupillaire augmentée », la distance entre les miroirs est fixée et elle est identique pour tous les sujets. Dans la condition « distance nominale » (utilisation simple des JVN), la paire de miroirs fixes est retirée de l'axe de vue. Dans tous les cas, les sujets peuvent ajuster librement la distance interpupillaire avant de commencer l'expérience. Avant de commencer une session, l'alignement optique des tubes est vérifié à l'aide d'un collimateur.

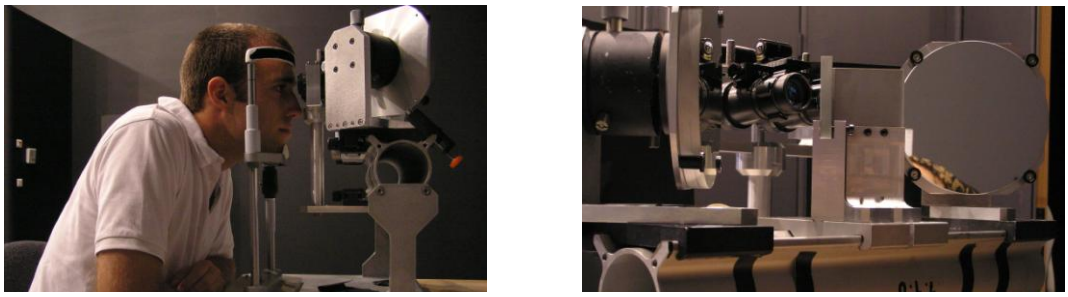


Figure 53 : téléstéréoscope utilisé pour les deux expériences

A droite : la mentonnière et l'appui frontal permettent de maintenir la position du sujet. A gauche : deux paires de miroirs permettant d'augmenter virtuellement la distance interpupillaire.

2.2. Stimuli

Les stimuli utilisés sont des mires d'anneaux de Landolt, générées par ordinateur (figure 54) et imprimées en haute qualité. La mire est composée de 50 anneaux organisés en 10 lignes (différentes tailles pour tester l'acuité visuelle) et 5 colonnes (différents contrastes). L'orientation de l'ouverture est déterminée aléatoirement par le logiciel de génération parmi les 8 orientations possibles. Les sujets indiquent verbalement l'orientation de l'ouverture. Pour la première expérimentation, la valeur d'acuité visuelle est comprise entre 0,4 et 1,3 cycles par milliradian (cy/mrad) c'est-à-dire que la taille de l'ouverture est comprise entre 1,25 et 0,38 milliradian (mrad).

Pour la seconde expérimentation, la mire utilisée est légèrement différente. Elle est composée de 55 anneaux : 5 colonnes pour les différents niveaux de contraste et 11 lignes pour les différents niveaux de résolution. Les valeurs de résolution sont comprises entre 0,2 et 0,7 cy/mrad (taille de l'ouverture comprise entre 2,5 et 0,65 mrad).

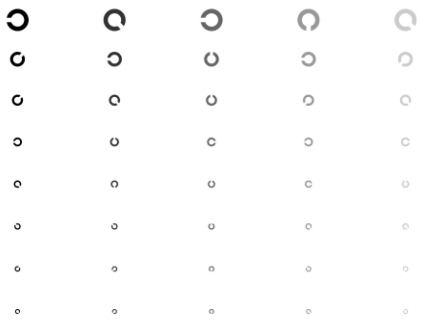


Figure 54 : exemple de mires utilisées pour l'expérience 1

Colonne: variation du contraste. Ligne: variation de l'acuité visuelle.

2.3. Niveaux de luminance

Les mires sont éclairées par une source lumineuse calibrée (corps noir : lampe à incandescence, température de couleur 2856K) (MIL-L-85762A, 1986). Des diaphragmes métalliques avec différents diamètres d'ouverture ont été utilisés pour obtenir les différents niveaux d'éclairement. La luminance la plus haute utilisée dans les expérimentations est équivalente à une nuit 1 tandis que la luminance la plus faible correspond à une nuit 3 (voir plus loin pour les définitions de ces niveaux : *nuit 1* = L1 et *nuit 3* = L2).

Entre les deux expérimentations, la source a été recalibrée conduisant à des valeurs de luminance légèrement différentes (table 12), exprimées en candela par mètre carré (cd/m²).

	Expérimentation 1	Expérimentation 2
Nuit 1	1,46 E^{-2} cd/m²	1,82 E^{-2} cd/m²
Nuit 3	1,03 E^{-3} cd/m²	2,48 E^{-3} cd/m²

Tableau 12 : niveaux de luminance pour les deux expérimentations

2.4. Protocoles expérimentaux

2.4.1. Expérimentation 1

2.4.1.1. Sujets

12 sujets, âgés de 20 à 42 ans, ont participé à cette expérimentation (2 femmes et 10 hommes). Ils ont tous une acuité visuelle normale de 20/20 minimum, sans correction.

2.4.1.2. Protocole

Chaque session est réalisée dans une salle noire (salle complètement hermétique à la lumière extérieure). Le sujet est assis à une table sur laquelle sont placés un support optique et la paire de JVN. L'ensemble de ce dispositif est fixe. Il est possible pour le sujet de régler le siège à la bonne hauteur pour avoir une vision confortable et se placer bien en face des tubes IL.

Au début de chaque session, le sujet est laissé dans l'obscurité pendant approximativement 10 minutes. Ensuite, il règle la mentonnière et l'écart entre les tubes des JVN. Enfin, il vérifie le réglage de la focalisation des objectifs des JVN. Les objectifs sont réglés, l'un après l'autre, dans la condition de nuit la plus claire. Le sujet sélectionne le plus petit anneau dont il voit clairement l'ouverture et ajuste le réglage le plus précisément possible. Cette étape est répétée pour chaque œil.

Le but de l'expérimentation étant de quantifier les effets de l'hyperstéréoscopie par rapport à une paire de jumelles de vision nocturne classique; aucun réglage à l'oculaire, par les sujets, n'est possible. La distance de focalisation de l'oculaire est réglée avec un dioptomètre, par un opticien, avant le début de l'expérimentation

L'expérimentation comporte 4 sessions, en fonction du réglage de la distance de focalisation de l'oculaire, avec une répétition de chaque condition. Pour les sessions 1 et 2, la distance est réglée à 10 mètres. Pour les sessions 3 et 4, elle est réglée à 4 mètres. Chaque sujet complète une session par jour.

Le critère choisi est la mesure d'acuité visuelle (AV), exprimée en cycle par milliradian (cy/mrad). Le sujet indique, pour chaque colonne, tous les anneaux jusqu'à la ligne correspondant au plus petit anneau dont l'ouverture est détectée. Le sujet doit aussi indiquer l'orientation de l'ouverture. Aucune information ne lui est fournie sur la justesse de sa réponse. Différentes mires sont utilisées pendant l'expérimentation pour éviter la mémorisation de l'orientation des cibles par les sujets.

Au total, l'acuité visuelle est déterminée pour 36 configurations (tableau 13) :

- deux niveaux de luminance (*L1* = $1{,}46^{E-2}$ cd/m² et *L2* = $1{,}03^{E-3}$ cd/m²) ;
- deux distances de focalisation de l'oculaire ou distances optiques (DO1 = 10 m et DO2 = 4 m) ;
- trois distances physiques entre le sujet et la mire (DP1 = 2 m, DP2 = 4 m et DP3 = 6 m) ;
- trois conditions de distance interpupillaire ou écartement (E1 = 60 mm, E2 = 184 mm et E3 = 304 mm) ;
- cinq niveaux de contraste (C1 = 100%, C2 = 80%, C3 = 60%, C4 = 40%, C5 = 20%).

Variables	**Valeurs des variables**				
Luminance L (cd/m²)	*L1* = $1{,}46E^{-2}$	*L2* = $1{,}03E^{-3}$			
Distance optique DO (m)	DO1 = 10	DO2 = 4			
Distance physique DP (m)	DP1 = 2	DP2 = 4	DP3 = 6		
Distance interpupillaire E (mm)	E1 = 60	E2 = 184	E3 = 304		
Contraste C (%)	C1 = 100	C2 = 80	C3 = 60	C4 = 40	C5 = 20

Tableau 13 : récapitulatif des variables et des valeurs de chaque variable testées

Chaque session est composée de 18 mesures dont l'ordre est contrebalancé entre les sujets. La session 2 est une répétition de la session 1, mais les 18 mesures sont testées dans un ordre différent. C'est le même principe qui est utilisé pour les sessions 3 et 4. Chaque sujet effectue l'ensemble des 36 mesures. Il y a seulement une session par jour pour chaque sujet pour éviter l'excès de fatigue.

2.4.2. Seconde expérimentation

2.4.2.1. Sujets

Quatre sujets (masculins), âgés de 22 à 33 ans, ont participé à cette expérimentation. Ils ont tous une acuité visuelle normale de 10/10 minimum, sans correction.

2.4.2.2. Protocole

Il s'agit ici de tester les effets du conflit vergence/accommodation dans des conditions similaires de celles de vol, c'est-à-dire quand les objectifs sont réglés à l'infini.
Au début de chaque session, le sujet effectue une mesure d'acuité visuelle limite à 6 mètres. Il s'agit d'une mesure d'acuité visuelle avec les objectifs focalisés à la distance d'observation. Cette mesure permet de vérifier le bon fonctionnement du système de vision nocturne.
Ensuite, pour chaque sujet et chaque session, les objectifs sont réglés à l'infini par l'expérimentateur, avec la même procédure que les pilotes avant de voler (RTCA/DO-925). Après adaptation à l'obscurité pendant approximativement 10 minutes, les sujets ajustent la mentonnière et l'écart entre les tubes IL.
L'ajustement de la distance focalisation de l'oculaire est possible dans la condition d'IPD normale. Quand l'écart interpupillaire est augmenté, l'ajustement n'est pas permis (la distance de focalisation de l'image est fixée à 10m).
L'expérimentation comporte deux sessions (une session par jour). La session 1 est réalisée avec un écart interpupillaire normal, alors que dans la session 2, la séparation interoculaire est plus grande (304 mm).
En résumé, l'acuité visuelle des sujets est déterminée en vision binoculaire pour 16 configurations différentes (tableau 14) :

- deux luminances ($L1$ = 1.82^{E}-2 cd/m² et $L2$ = 2.48^{E}-3 cd/m²) ;
- deux distances physiques (DP1 = 3 m et DP2 = 6 m) ;
- deux distances interpupillaires ou écartement (E1 = 60 et E2 = 304 mm) ;
- deux niveaux de contraste (C1 = 100% et C2 = 60%).

Variables	Valeurs des variables	
Luminance L (cd/m²)	*L1* = 1.82E^{-2}	*L2* = 2.48E^{-3}
Distance physique DP (m)	DP1 = 3	DP2 = 6
Distance interpupillaire E (mm)	E1 = 60	E2 = 304
Contraste C (%)	C1 = 100	C2 = 60

Tableau 14 : récapitulatif des variables et des valeurs de chaque variable testées

Chaque sujet réalise les 16 mesures dans un ordre pseudo-aléatoire, sans répétition. Chaque session comporte 8 mesures, dont l'ordre de présentation est contrebalancé entre les sujets.
Les critères (acuité visuelle) et le protocole de mesure sont identiques à l'expérience 1, bien qu'une mire différente ait été employée pour s'adapter à la défocalisation des objectifs.

3. Résultats

Les résultats sont présentés séparément pour les deux expérimentations. Les valeurs correspondent à la moyenne des deux essais. Pour la première, les résultats obtenus pour la haute et la basse luminance sont présentés aussi de manière séparée. Les données sont analysées par des ANOVAs et des tests à posteriori de Bonferroni-Dunn.

3.1. Expérimentation 1

3.1.1. Nuit 1

Tous les résultats sont présentés dans le tableau 15 mais seuls quelques résultats sont montrés sur la figure 55. Avec une distance de focalisation de l'oculaire réglée à 10 mètres, il n'y a aucune différence d'acuité visuelle entre les trois conditions de distances interpupillaire pour les distances physiques de 6 et 4 mètres. Cependant, à la distance relativement proche (c'est-à-dire 2 mètres), l'augmentation de l'IPD provoque une diminution significative de l'acuité visuelle. L'effet de la distance physique est significatif pour touts les niveaux de contrastes sauf le contraste maximal où seule une tendance se dégage (contraste 100% : $F(2) = 2,45$; $p = 0,09$; contraste 60% : $F(2) = 4,14$; $p < 0,05$).

C (%)	DP (m)	DO1=10 (m)			DO2=4 (m)		
		E1=60 (mm)	E2=184 (mm)	E3=304 (mm)	E1=60 (mm)	E2=184 (mm)	E3=304 (mm)
100	2	1,20	1,12	1,07	1,28	1,18	1,16
	4	1,16	1,17	1,14	1,23	1,21	1,18
	6	1,17	1,17	1,19	1,23	1,20	1,18
80	2	1,14	1,08	1,00	1,18	1,16	1,10
	4	1,13	1,13	1,12	1,22	1,19	1,13
	6	1,14	1,10	1,08	1,22	1,18	1,21
60	2	1,07	1,02	0,93	1,13	1,09	1,07
	4	1,07	1,05	1,00	1,18	1,14	1,06
	6	1,08	1,03	1,04	1,18	1,13	1,18
40	2	0,97	0,92	0,83	1,10	0,99	0,95
	4	1,00	1,00	0,95	1,11	1,08	1,03
	6	0,96	0,95	0,97	1,12	1,08	1,08
20	2	0,75	0,75	0,68	0,90	0,83	0,78
	4	0,84	0,84	0,85	1,00	0,95	0,88
	6	0,85	0,83	0,83	1,01	0,95	0,94

Tableau 15 : acuité visuelle en nuit 1 (1,46^{E}-2 d/m²)

C : contraste en pourcentage ; DP : distance physique en mètres ; DO : distance optique en mètres ; E : écartement en millimètres. Les données sont exprimées en cycles par milliradians.

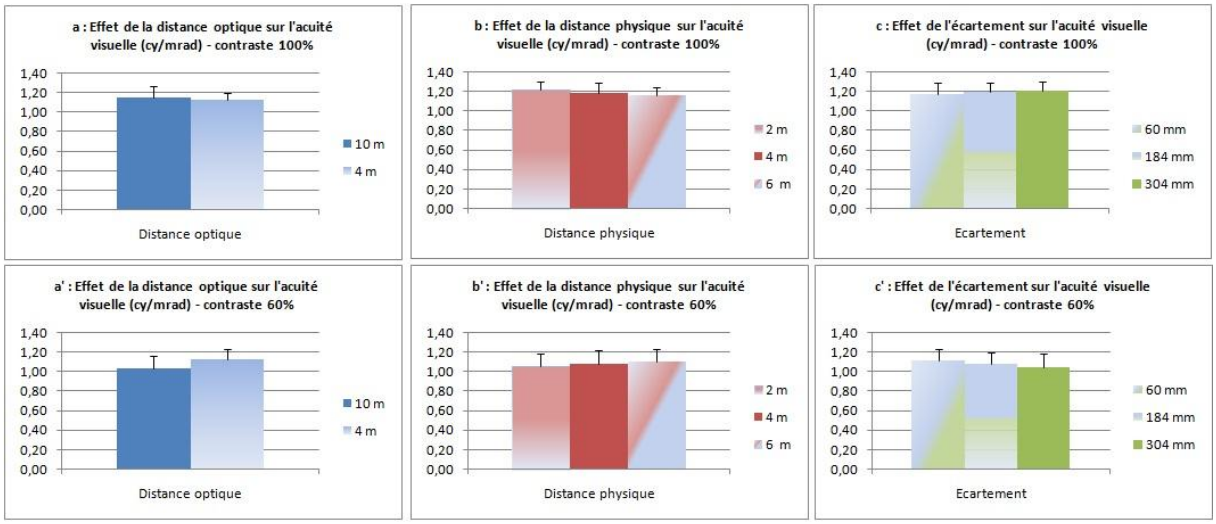


Figure 55 : performances d'acuité visuelle à haute luminance (nuit 1).

Respectivement, les résultats pour le contraste 100% sont sur la ligne du haut (figures a,b et c) et le contraste 60 % sur la ligne du bas (figures a', b' et c'). Les figures de gauche montre l'effet de la distance optique, les figures du centre celui de la distance physique et celles de droite celui de l'écartement (60 mm correspond à la condition d'IPD réglable, sans surécartement).

Quand la distance de focalisation de l'oculaire est réglée à 4 mètres, les résultats sont globalement améliorés pour toutes les conditions de séparation interpupillaire, particulièrement quand l'IPD est augmentée. L'acuité visuelle est, en moyenne sur toutes les conditions, de 1,13 cy/mrad pour une distance de focalisation de l'oculaire placé à 10 mètres et augmente à 1,22 cy/mrad pour une distance de 4 mètres. Pour une distance physique de 2 mètres, les résultats sont considérablement améliorés, comparativement à la condition de focalisation de l'oculaire à 10 mètres. L'effet de la distance optique (ou distance de focalisation de l'oculaire) est significatif pour tous les contrastes (contraste 100% : $F(1) = 28,50$; $p < 0,0001$; contraste 60% : $F(1) = 38,04$; $p < 0,0001$).

Il y a un effet significatif de la distance interoculaire (contraste 100% : $F(2) = 5,00$; $p < 0,01$; contraste 60%) : $F(1) = 6,58$; $p < 0,005$). Les tests à posteriori montrent que c'est la distance la plus proche (2 mètres) qui est significativement de la plus éloignée (6 mètres) (contraste 100% : $p = 0,0018$; contraste 60% : $p = 0,0004$).

Il n'existe aucune interaction significative entre les différents facteurs.

3.1.2. Nuit 3

Comme dans le cas de la haute luminance (*nuit 1*), tous les résultats de la *nuit 3* sont résumés dans le tableau 16 et seulement une partie des résultats sont présentés dans la figure 56. Lorsque la distance de focalisation de l'oculaire est réglée à 10 mètres, les résultats montrent qu'il y a une différence entre la vision directe et les deux configurations avec un écart interpupillaire augmenté pour les 3 distances physiques (2, 4 et 6 mètres). En condition de basse luminance, l'effet de l'augmentation de l'écart interpupillaire sur l'acuité visuelle apparaît dès 6 mètres. Un effet significatif de la distance physique apparaît pour tous les contrastes (contraste 100% : $F(2) = 8,11$; $p = 0,004$; contraste 60% : $F(2) = 5,77$; $p < 0,05$) avec une différence significative entre la distance 6 mètres et les autres distances physiques (contraste 100% et 60% : $p < 0,0001$).

Quand les oculaires sont réglés à 4 mètres, les résultats sont globalement améliorés. L'acuité visuelle est en moyenne de 0,93 cy/mrad pour une distance de focalisation de 10 mètres et augmente jusqu'à 1,01 cy/mrad à 4 mètres. Il y a un effet significatif de la distance optique pour tous les niveaux de contraste (contraste 100% : $F(2) = 26,09$; $p < 0,0001$; contraste 60% : $F(2) = 35,84$; $p < 0,0001$).

L'effet de l'hyperstéréoscopie est toujours présent, quoique légèrement plus faible (contraste 100% : $F(2) = 13,76$; $p < 0,0001$; contraste 60% : $F(2) = 18,59$; $p < 0,0001$).

Il n'y a aucune interaction entre les variables.

C (%)	DP (m)	DO1=10 (m)			DO2=4 (m)		
		E1=60 (mm)	E2=184 (mm)	E3=304 (mm)	E1=60 (mm)	E2=184 (mm)	E3=304 (mm)
100	2	0,98	0,86	0,89	1,09	0,96	0,92
	4	1,05	0,93	0,95	1,13	1,11	1,06
	6	1,02	0,93	0,94	1,13	1,04	1,05
80	2	0,90	0,79	0,80	0,98	0,92	0,88
	4	0,94	0,86	0,80	1,05	0,98	0,98
	6	0,94	0,88	0,83	1,04	0,93	0,93
60	2	0,83	0,75	0,73	0,91	0,85	0,78
	4	0,91	0,79	0,78	0,96	0,88	0,88
	6	0,86	0,75	0,78	1,00	0,89	0,87
40	2	0,69	0,66	0,60	0,81	0,74	0,69
	4	0,84	0,67	0,68	0,90	0,81	0,82
	6	0,80	0,66	0,71	0,88	0,81	0,75
20	2	0,60	0,50	0,50	0,62	0,55	0,55
	4	0,70	0,58	0,53	0,76	0,59	0,62
	6	0,63	0,53	0,55	0,69	0,65	0,60

Tableau 16 : acuité visuelle en nuit 3 ($1,03^{E}$-3 d/m²)

C : contraste en pourcentage ; DP : distance physique en mètres ; DO : distance optique en mètres ; E : écartement en millimètres. Les données sont exprimées en cycles par milliradians.

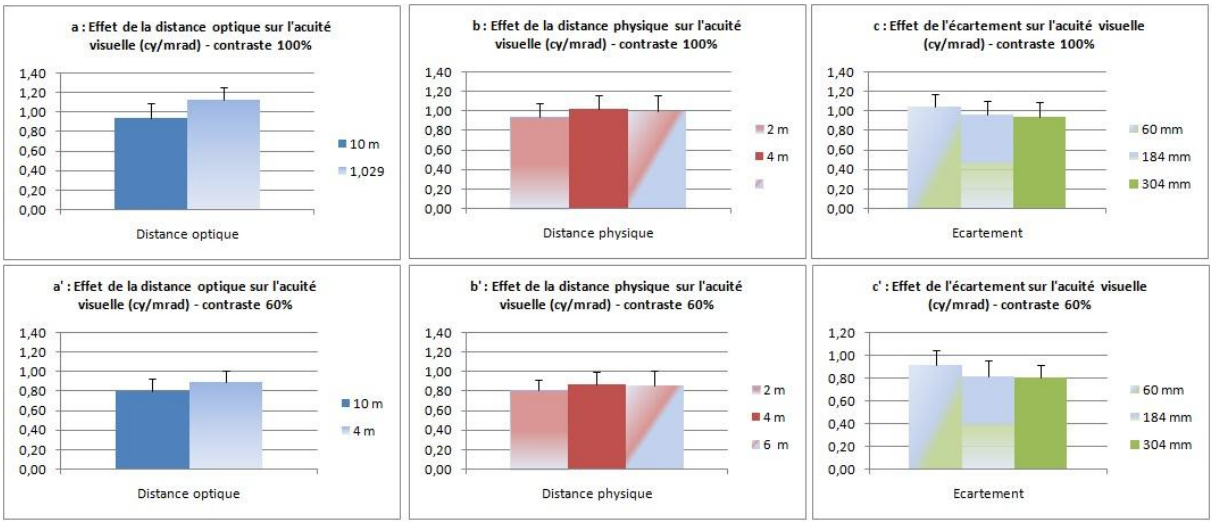


Figure 56 : performances d'acuité visuelle à basse luminance (nuit 3)

Respectivement, les résultats pour le contraste 100% sur la ligne du haut (figures a,b et c) et le contraste 60 % sur la ligne du bas (figures a', b' et c'). Les figures de gauche montre l'effet de la distance optique, les figures du centre celui de la distance physique et celles de droite celui de l'écartement (60 mm correspond à la condition d'IPD réglable, sans surécartement).

3.2. Expérimentation 2

Tous les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 17. Par rapport à la mesure d'acuité limite à 6 mètres, effectuée en début de session, la diminution de l'acuité visuelle est extrêmement importante (divisée par 2) pour un contraste de 100%. Dans la mesure d'acuité limite à 6 mètres, les sujets ont une acuité visuelle moyenne de 0,66 cy/mrad avec un écart interpupillaire normal. Quand les objectifs sont réglés à l'infini, l'acuité visuelle est seulement d'environ 0,28 cy/mrad. Il n'est pas surprenant que la défocalisation des objectifs (infini par rapport à 3 ou 6 mètres) dégrade considérablement l'acuité visuelle, pour les objets proches.

C (%)	DP (m)	Nuit 1 (1.82E-3 cd/m²)		Nuit 3 (2.48E-3 cd/m²)	
		E=60 (mm)	E=304 (mm)	E=60 (mm)	E=304 (mm)
100	3	0.24	0.24	0.26	0.25
	6	0.51	0.51	0.48	0.49
60	3	0.25	0.21	0.23	0.21
	6	0.48	0.49	0.45	0.48

Tableau 17 : acuité visuelle en nuit 1 et 3

C : contraste en pourcentage ; DP : distance physique en mètres ; DO : distance optique en mètres ; E : écartement en millimètres. Les données sont exprimées en cycles par milliradians.

Quand l'écart interpupillaire augmente, il n'y a pas de différence, quelque soit la distance physique considérée (6 ou 3 mètres) (cf. figure 57).

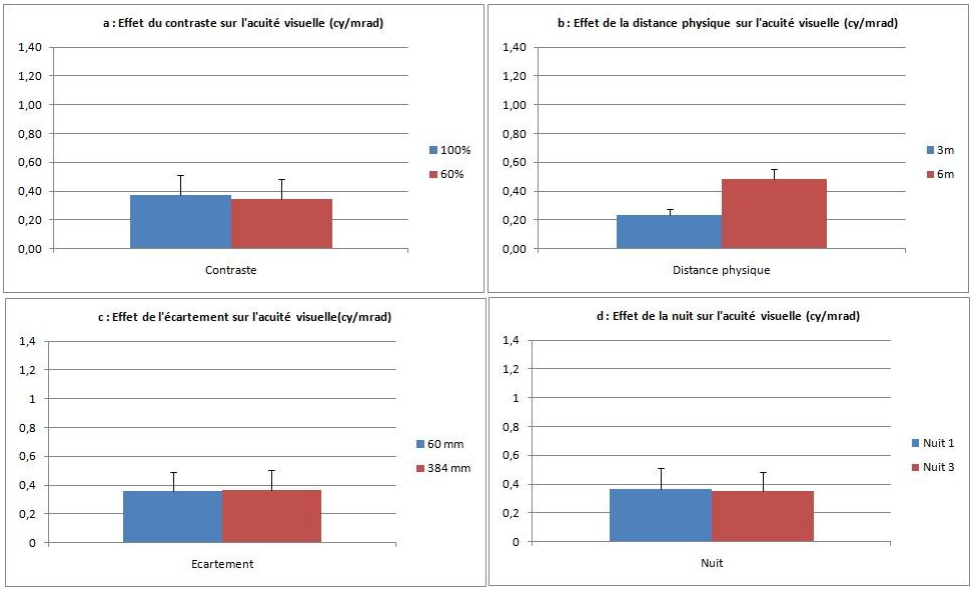


Figure 57 : acuité visuelle en fonction (a) du contraste, (b) de la distance physique, (c) de l'écartement et (d) du niveau de nuit.

En *nuit 3*, les résultats à 6 mètres sont approximativement similaires à ceux obtenus pour la nuit 1. Statistiquement, il n'y a pas d'effet de la luminance entre les deux conditions ($F(1) = 0,52$; $p = ns$).

Si l'on considère les résultats obtenus à 60% de contraste, l'acuité visuelle est légèrement dégradée pour les deux conditions de luminance mais ceci n'est pas significatif ($F(1) = 2,39$; $p = ns$).

Globalement, dans l'expérience 2, seule la distance physique a un effet significatif sur l'acuité visuelle rapportée par les sujets ($F(1) = 2678,00$; $p < 0,0001$). Il n'y a pas d'effet de la luminance ni de l'écart interpupillaire.

4. Discussion

4.1. Conflit accommodation/ vergence

Les résultats de la première expérience confirment que l'hyperstéréoscopie dégrade l'acuité visuelle, en particulier pour les objets proches (situés à moins de 6 mètres). Les performances les plus mauvaises sont obtenues pour l'écart interoculaire le plus grand (304 millimètres) et pour la distance la plus courte (2 mètres). Selon Kotulak et Morse (1994a), l'hyperstéréoscopie provoque un conflit entre accommodation et convergence, en particulier pour les distances inférieures à 5 mètres. Fisher et Ciuffreda (1990) ont montré, par des mesures des rapports accommodation/convergence, que l'augmentation de la distance interpupillaire modifie la balance oculomotrice entre accommodation et convergence. Fisher et Ebenholtz (1986) confirment aussi qu'il y a une dissociation accommodation/convergence significative en condition d'hyperstéréoscopie. Dans la première étude, seule la demande en vergence est augmentée tandis que la demande accommodative est inchangée. L'ensemble de ces études confirme notre hypothèse sur l'origine des effets perceptuels rapportés par les pilotes d'hélicoptères utilisant des systèmes de type 2, pour des observations à courte distance. Les effets expérimentalement observés sont probablement liés au conflit entre accommodation et convergence.

Cependant, cet effet existe seulement dans la condition où les objectifs sont focalisés à la distance d'observation (expérience 1). Quand les objectifs sont réglés à l'infini (expérience 2), la seule différence entre les deux conditions testées est l'augmentation en convergence requise pour fusionner les images droites et gauches. Si le conflit accommodation/vergence existe, il n'induit pas d'effet perceptuel.

L'absence d'effet de l'augmentation de la séparation interoculaire peut être expliquée par l'absence de stimulus accommodatif effectif. Il y a plusieurs explications possibles.

Avant tout, la luminance de la scène influence le diamètre de la pupille. Aux niveaux de luminance utilisés, la taille de la pupille est dans la limite haute selon la MIL-HDBK-141. La taille de la pupille influence la perception de la profondeur de champ comme expliqué par Campbell et Gregory (1960). Une petite pupille permet de diminuer la zone de flou due à l'erreur accommodative. Les liens entre accommodation, convergence et profondeur de champ (Semmlow, 1981). De plus, la défocalisation des objectifs dégrade très sévèrement l'acuité visuelle des sujets dans toutes les conditions. A 6 mètres, cet effet est déjà important. Par étude de la reconnaissance de lettres, Rabin (1994b) a montré que la défocalisation optique produit une importante dégradation de l'acuité visuelle et de la sensibilité aux contrastes comme si les hautes fréquences spatiales de l'image disparaissaient. Brettel, Corno-Martin et Denieul (1993) montrent que la réponse accommodative est variable selon le contenu fréquentiel. Ces résultats sont obtenus dans des conditions de vergence et de luminance différentes de nos expérimentations. Pour un stimulus accommodatif similaire, l'accommodation varie considérablement (elle varie de 3,2D pour 10 cy/deg à 2,92D pour 1 cy/deg). Donc, la défocalisation des objectifs résulte en une diminution du contenu du stimulus en fréquences spatiales.

La combinaison de ces différents facteurs (diamètre de la pupille et absence de hautes fréquences spatiales) est tout à fait susceptible de réduire ou même de supprimer la demande accommodative.

En résumé, les résultats expérimentaux obtenus pendant les deux expérimentations montrent assez clairement 2 choses :

- Dans la mesure d'acuité visuelle limite à 6 mètres, quand les objectifs sont focalisés à la distance du stimulus, l'augmentation de la séparation des tubes induit une dégradation de l'acuité visuelle. Cet effet peut être attribué au conflit accommodation/ convergence relatif à l'hyperstéréoscopie.
- Dans des conditions plus opérationnelles, quand les objectifs sont focalisés à l'infini, il n'y a pas de différence entre la condition normale d'écart interpupillaire et la condition augmentée.

Par conséquent, il semble très improbable que le conflit accommodation/convergence créé par l'hyperstéréoscopie puisse jouer un rôle dans la dégradation de l'utilisation des images issues de tubes IL, observée par les pilotes quand ils atterrissent avec un système de type 2. Pour les tâches d'atterrissage, les conséquences sont que les pilotes doivent s'appuyer sur des points de

repères plus lointains avec un système de type 2 que ceux habituellement utilisés avec un système de type 1. D'un point de vue plus pratique, la plupart des pilotes sont d'accord pour dire que les effets observés à courte distance sont relativement compensés par un réajustement des stratégies d'acquisition des informations visuelles cognitives.
D'autres causes doivent être étudiées pour expliquer les effets rapportés par les pilotes durant des vols réels.

4.2. Impact du réglage du focus fixe de l'oculaire

Selon Kotulak et Morse (1994b), maintenir une vision confortable est possible seulement si la vergence et l'accommodation ne sont pas dissociées au-delà d'une certaine limite (± 1 unité quand l'accommodation est exprimée en dioptrie et la convergence en mètres d'angle). Dans un système de type 2, avec une image à l'oculaire focalisée à 10 mètres, la dissociation entre accommodation et convergence est importante pour de très courtes distances (moins de 5 mètres). Les limites pour une vision confortable sont souvent dépassées Quand les objectifs sont focalisés à la distance d'observation (condition d'acuité visuelle limite à 6 mètres), la dissociation A/C provoque une diminution de l'acuité visuelle. Dans le système de type 2, quand l'oculaire est focalisé à 4 mètres, l'acuité visuelle est significativement améliorée. Régler l'oculaire à une distance plus courte diminue la demande accommodative, ce qui améliore l'acuité visuelle et le confort.
Les données collectées pendant l'expérience sont comparées avec celles obtenues par Kotulak et Morse (1994b). Ces derniers expliquent que l'hyperstéréoscopie produit une augmentation de la demande en convergence tandis que des erreurs de réglage des objectifs en général provoquent une augmentation de la demande accommodative. Ainsi, on peut paradoxalement en conclure que des erreurs d'ajustement au niveau de l'oculaire pourraient être bénéfiques en condition d'hyperstéréoscopie. Ces auteurs ont testé 13 pilotes volontaires sur une tâche d'acuité visuelle. Les pilotes peuvent régler les oculaires. Accommodation, acuité visuelle et distance de focalisation sont mesurés. L'étude montre que les sujets choisissent en moyenne de se régler à 0,48 D ± 0,43 D (ou approximativement 2 mètres).
Gleason et Riegler (2001) a réalisé une étude sur les effets de la focalisation de l'oculaire sur l'acuité visuelle. Il a déterminé que, pour tous les sujets, un point de focalisation fixé à 2 mètres est la distance la plus appropriée.
Task (2000) a montré que, avec un système de type 1 panoramique, une distance de focalisation fixe comprise entre 1 et 4 mètres est raisonnable.

Ces données sont asses cohérentes avec celles obtenues par Menu et al. (1984), dans leur étude sur les écrans intermédiaires collimatés. Ces auteurs ont mis en évidence que 4 mètres constitue un bon compromis pour optimiser la perception visuelle des opérateurs.
En résumé, quand les sujets peuvent régler l'oculaire, ils ont tendance à placer l'image entre 1 et 4 mètres, mais principalement entre 1 et 2 mètres.
Les résultats obtenus montrent que le réglage des oculaires à 4 mètres a un effet positif sur l'acuité visuelle et le confort. En condition d'hyperstéréoscopie, ce réglage diminue effectivement le conflit accommodation/ convergence.

Fixer la distance de focalisation de l'oculaire est un choix technologique intrinsèque au système de type 2. De la même manière que les JVN panoramiques, la conception optique des systèmes de type 2 rend très complexe l'implémentation d'un oculaire réglable. Dans un système avec une distance de focalisation à l'oculaire non ajustable, il est recommandé de faire en sorte que la distance choisie soit acceptable pour la plupart des utilisateurs. Rapprocher l'image optique plus près pourrait permettre de réduire le conflit accommodation/convergence et le confort des pilotes quand ils utilisent des informations à très courte distance. Cependant, sur le plan technique, régler la distance de focalisation de l'oculaire à une distance plus proche dans les systèmes de type 2, pourrait induire d'autres effets non désirés et ceci mérite d'être étudié de manière plus précise.

4.3. Autres résultats

La première étude confirme l'effet du contraste sur l'acuité visuelle. Une diminution du contraste provoque une baisse de l'acuité visuelle. Cet effet reste identique quelle que soit la distance de focalisation de l'oculaire (4 ou 10 mètres) et quel que soit le niveau de luminance. Ceci est en accord avec les données de Rabin (1996), qui a mis en évidence l'influence du contraste sur l'acuité visuelle avec des systèmes de vision nocturne. Pour une luminance de 0,68 cd/m² et un contraste de 100%, l'acuité visuelle est, en moyenne, de 1,35 cy/mrad et de 0,88 cy/mrad pour un contraste de 20%. Les valeurs pour le contraste maximum sont dans la même gamme que celle de l'expérience 1. A l'opposé, quand les objectifs sont défocalisés, les effets du contraste disparaissent. L'absence de stimulus accommodatif pourrait expliquer ce résultat.
Nos résultats confirment qu'il y a un effet de la luminance sur l'acuité visuelle. Cet effet est identique que l'image soit focalisée à 10 ou à 4 mètres. Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus par Kotulak et Rash (1992). L'acuité visuelle diminue avec le niveau de

luminance, spécialement pour la condition de luminance basse. Quand les objectifs sont défocalisés (expérience 2), l'effet de la luminance est considérablement réduit. Il n'y a pas de différence d'acuité (du moins statistiquement) entre les conditions de haute et basse luminance, pour les deux systèmes de vision nocturne (type 1 et type 2).

Bien que réalisés dans des conditions différentes, nos résultats ont quelques similarités avec ceux obtenus par Kotulak, Morse et Rabin (1995) quand ils ont étudié le « *dark focus* » (ou position de repos de l'accommodation) et le rapport CA/C.

5. Conclusion

Dans cette étude, nous avons essayé de comprendre comment le conflit accommodation/ convergence est un facteur causal dans les difficultés rapportés par les pilotes d'hélicoptères portant des systèmes de type 2 avec surécartement de capteurs, notamment quand ils regardent à des distances proches (moins de 5 mètres). Cette hypothèse avait déjà été suggérée par d'autres auteurs sur une base plus théorique. Les résultats montrent que, quand la distance interpupillaire (IPD) est virtuellement augmentée et que les oculaires du DVN sont focalisés à la distance du stimulus (mire d'anneaux de Landolt), l'augmentation de la séparation dégrade significativement l'acuité visuelle des sujets par rapport à la condition normale d'IPD. Cependant, si on rapproche la distance de focalisation de l'oculaire à une distance plus proche, permettant ainsi de réduire le conflit A/C, les résultats montrent une amélioration significative des performances d'acuité visuelle. Enfin, quand la distance de focalisation des objectifs est réglée à l'infini, comme cela est supposé être le cas en vol, il n'y a pas de différence entre la condition d'IPD normale et d'IPD virtuellement augmentée.

Si nous prenons ces résultats en considération, il semble tout à fait douteux que le conflit accommodation/convergence puisse lui-même fournir une explication tangible aux observations faites en vol par quelques pilotes. D'autres causes mériteraient d'être investiguées. Cependant, les difficultés initiales rencontrées par les pilotes apparaissent comme étant rapidement compensées par un réajustement des stratégies cognitives d'acquisition des informations visuelles.

- CHAPITRE 2 -

MESURES DE SENSIBILITE AUX CONTRASTES

Après avoir réalisé l'étude des effets de l'hyperstéréoscopie sur l'acuité visuelle, il est apparu que, dans des conditions plus opérationnelles lorsque les objectifs sont focalisés à l'infini, il n'y a pas de différence entre la condition normale d'écart interpupillaire et la condition augmentée. Dans ces circonstances, il semble très improbable que le conflit accommodation/convergence créé par l'hyperstéréoscopie puisse jouer un rôle dans la dégradation de l'utilisation des images issues de tubes IL observée par les pilotes quand ils atterrissent avec un système de type 2. D'autres causes doivent être étudiées pour expliquer ces effets.

Une autre dimension importante qui intervient dans l'étude des systèmes de vision nocturne est celui de contraste de luminance, sommairement abordé dans l'étude précédente. Il s'agit du contraste simultané entre régions voisines du champ visuel ayant une luminance différente. Plus précisément, l'information fournie par un système d'affichage à un observateur est fondamentalement liée à la capacité humaine de percevoir les contrastes. La sensibilité aux contrastes peut être définie comme la réciproque du contraste minimum entre une surface spatiale plus claire et une plus sombre qui peut être détecté (Wickens, Liu et Gordon-Becker, 2004). Or, la détection du contraste est nécessaire pour détecter et reconnaître les formes (Menu, 1986).

Il est techniquement difficile de quantifier de manière fiable le contraste avec des systèmes de vision nocturne, aussi bien pour les systèmes de type 1 que ceux de type 2 ; cependant les études sont d'autant moins aisées qu'elles concernent des équipements à vision déportée.

Rabin (1993) a validé une approche relativement simple permettant d'évaluer la sensibilité aux contrastes avec les systèmes de vision nocturne. Le phosphore rouge d'un moniteur couleur standard fournit en effet un spectre proche du domaine de sensibilité des tubes intensificateurs de 3^{e} génération. D'autre part, Bach (1996) a développé une procédure automatisée permettant d'afficher des anneaux de Landolt de taille et de contraste différent. Ce logiciel a déjà été utilisé dans quelques études de mesures d'acuité mais aussi de contraste (Bühren, Terzi, Bach, Wesemann et Kohnen, 2006 ; Dennis et al., 2004 ; Schulze-Bonsel, Feltgen, Burau, Hansen et Bach, 2006).

Deux études successives ont été menées dans le cadre de deux commandes industrielles, à quelques mois d'intervalle, avec des protocoles complémentaires, associant ces deux techniques pour évaluer la performance visuelle de sensibilité au contraste en condition de vision nocturne aidée. Tout comme l'approche développée par Rabin, il s'agit d'évaluations comparatives entre différents systèmes d'aide et non de mesures absolues de la performance en contraste de tel ou tel système. Elles ont pour objectif de mettre au point et valider une nouvelle méthodologie d'évaluation du contraste pour les systèmes de vision nocturne. Cette méthodologie constitue l'un des éléments permettant d'évaluer la qualité des systèmes de vision nocturne avec des protocoles standardisés.

1. Matériels et méthodes : aspects communs

1.1. Système d'affichage

Les stimuli choisis (décrits dans la partie suivante) sont affichés sur un moniteur CRT (Cathodic Ray Tube) classique. Seul le phosphore rouge du moniteur est utilisé afin de limiter la composition spectrale du stimulus au domaine de sensibilité des systèmes de vision nocturne. Bien que le maximum de sensibilité des DVN soit dans le proche infrarouge vers 750 nm, le domaine s'étend de 600 à 900 nm. Par mesure des spectres dans le blanc, le bleu, le vert et le rouge, nous avons validé que les émissions du phosphore rouge de l'écran sont comprises entre 600 et 720 nm ce qui suffit pour stimuler les tubes IL.

1.2. Stimuli utilisés

Les stimuli utilisés sont des anneaux de Landolt et le logiciel qui contrôle l'affichage, en accès libre sur Internet, est appelé FrACT (Freiburg Visual Acuity and Contrast Test) (http://www.michaelbach.de/fract.download.html) développé par Michael Bach.

Il s'agit d'un programme qui utilise des méthodes psychométriques combinées à de l'anti-aliasing[14] et du tramage[15] afin de fournir des mesures automatisées de l'acuité visuelle (Bach, 1996) et de la sensibilité aux contrastes. FrACT est soumis à la norme européenne pour les mesures d'acuité (EN ISO 8596) et est validée par la Société scientifique d'ophtalmologie allemande (DOG).

La progression de la taille des optotypes est déterminée par la stratégie du meilleur PEST (Parameter Estimation by Sequential Testing) (Pentland, 1980). Il s'agit d'une méthode

[14] Anti-aliasing: technique par laquelle on diminue « l'effet escalier » des images (dû aux pixels), en créant des dégradés de couleurs le long des contours, pour les lisser.

[15] Tramage : procédé permettant de simuler, sur l'écran, des couleurs non disponibles en juxtaposant des points diversement colorés.

psychométrique basée sur la théorie de la détection du signal afin d'estimer le seuil d'acuité visuelle. L'acuité est représentée par une fonction psychométrique dépendante de la taille de l'optotype et donnant une fonction sigmoïde. Plusieurs études (Westheimer, 1979 ; Petersen, 1990) ont mis en évidence que cette fonction psychométrique est indépendante de la valeur de la pente et que cette pente est constante à travers une gamme d'acuité visuelle importante. Cette fonction dépend uniquement de l'acuité visuelle.

Le logiciel détermine le seuil d'acuité comme étant le point d'inflexion de la pente. Il permet de calibrer la distance d'observation, de linéariser la luminance de l'écran, de régler la taille des optotypes et du contraste.

La réponse des sujets se fait à l'aide d'un pavé numérique, chaque chiffre correspondant à une des 8 orientations possibles d'une manière logique. La touche 5 est non utilisée ou peut servir à avorter le test.

Par défaut, le logiciel fixe 18 essais pour 8 orientations. Le nombre d'essais est porté à 32 pour avoir une valeur plus précise.

1.3. Dispositifs de vision nocturne (DVN)

Les dispositifs comparés sont :

- Système de type 1 (T1);
- Système de type 2 (T2).

Dans les systèmes de type 1 », les tubes intensificateurs et l'affichage sont localisés devant les yeux du pilote, bloquant la vision directe de la scène extérieure et permettant seulement une capacité limitée de vision de l'environnement extérieur (« look around »). Ainsi, la vision de la scène se fait directement à travers le système d'aide à la vision.

Dans ces systèmes type 2, les pilotes peuvent voir directement la scène extérieure. Les images intensifiées sont superposées à la vision directe de la scène extérieure par l'utilisation d'un combineur semi-transparent sur la visière, ce qui implique que les détecteurs ne sont pas localisés devant les yeux. L'avantage de ce système est d'être non seulement relativement transparent mais, d'être aussi plus petit ce qui permet de réduire l'obstruction du champ de vision. Le déplacement des capteurs (surécartement) implique que l'utilisation à très courte distance est plus difficile qu'avec des systèmes de type 1 due à l'augmentation de la convergence.

1.4. Analyse

Le seuil de sensibilité aux contrastes est déterminé directement par le logiciel et exprimé en pourcentage. Les données sont analysées par des analyses de variances (ANOVAs) et des tests à posteriori de Bonferroni-Dunn.

2. Matériels et méthodes : aspects spécifiques

2.1. Expérimentation 1

Cette première étude met en place une expérimentation, non représentative des conditions opérationnelles. Le but poursuivi est de mettre en œuvre la méthodologie, de la valider et de vérifier l'impact du contraste sur l'acuité visuelle obtenue, en vision aidée, dans différentes conditions de nuit.

La principale difficulté est de quantifier avec précision les niveaux de nuits équivalents pour chaque système. Pour éliminer l'effet de l'éclairement très partiel du système optique en essai lié au champ réduit de la source lumineuse, un dispositif d'éclairement additionnel a été mis en place pour compenser ce problème.

2.1.1. Niveaux de luminance

Les expérimentations s'effectuent en salle noire, dans des conditions de luminosité ambiante (environ 60cd/m²), c'est-à-dire que l'écran est entouré d'une source lumineuse additionnelle. Dans cette étude, on a crée une condition d'isoluminance à l'entrée des systèmes testés. Des densités optiques différentes sont placées devant les objectifs des différents DVN de façon à obtenir une luminance identique en sortie des systèmes, c'est-à-dire une isoluminance à l'œil. Ceci neutralise donc les différences existantes entre les parties optiques des deux systèmes utilisés pour cette expérimentation. Les densités optiques sont choisies afin d'obtenir des niveaux de luminance en sortie des systèmes correspondants à une :

- *Nuit 1*;
- *Nuit 5-1*;
- *Nuit 5-2*.

Nous avons distingué deux niveaux de *nuit 5*, *5-1* et *5-2*, car les nuits très sombres constituent le point d'intérêt pour l'étude du contraste.

Les valeurs de luminance indiquées dans le tableau 18 sont les valeurs de luminance à l'œil en candela par mètre carré (cd/m²).

	Type 1 (cd/m²)	Type 2 (cd/m²)
Nuit 1	11,75	11,98
Nuit 5-1	0,85	0,89
Nuit 5-2	0,27	0,23

Tableau 18 : valeurs de luminances en sortie des DVN

2.1.2. Sujets

Un minimum de 3 sujets est recommandé pour valider l'évaluation (AC/323(HFM-091)TP/76, 2008). Un groupe de 5 sujets (1 femme et 4 hommes) a été testé par visuotest classique afin de vérifier le critère d'inclusion d'acuité minimum (10/10 sans correction en condition photopique et mésopique). Ce type de test ne permet pas d'évaluer l'acuité au-delà de 12/10. L'acuité de certains sujets semblant apparemment supérieure à cette valeur, leur acuité a été testée à l'aide de FrACT présenté ci-dessus. Ce logiciel permet d'évaluer l'acuité visuelle d'un œil parfait, c'est-à-dire d'un œil à 20/10. L'ensemble des mesures est résumé dans le tableau 19.

Acuité visuelle	Sujet 1	Sujet 2	Sujet 3	Sujet 4	Sujet 5
Photopique	12/10	12/10	12/10	12/10	12/10
Mésopique	10/10	10/10	12/10	12/10	12/10
FrACT	15,5/10	17/10	15/10	18/10	15/10

Tableau 19 : acuité visuelle des sujets

2.1.3. Procédure

Pendant la phase d'habituation à l'obscurité, chaque sujet bénéficie de d'environ 10 minutes pour régler les objectifs de façon à obtenir la focalisation optimale (réglage en monoculaire, un œil après l'autre), comme dans le chapitre 1. Par rapport à l'étude 1, le sujet est maintenu dans noir total par le biais d'un masque occultant afin que seuls les tubes intensificateurs de lumière soient exposés.

Le système T1 est fixé à un support pendant que la tête du sujet repose sur une mentonnière. L'ensemble tête-dispositif-support est masqué par le cache.

Pour le système T2, la visière et l'ensemble de la tête sont masqués de façon à éviter la vision directe au travers de la visière et pour ne laisser que la vision issue des tubes IL.

La distance d'observation est de 6 mètres. Chaque sujet observe l'écran au travers du dispositif : il détermine l'orientation de l'optotype parmi les 8 orientations possibles (nord, sud, est, ouest, nord ouest, nord est, sud est, sud ouest). Ce sont des mesures binoculaires.
Pour chaque niveau de luminance, 3 niveaux de résolution sont testés (tableau 20). Une mesure d'acuité visuelle limite est aussi réalisée afin d'avoir l'extrémité des performances.

Résolution spatiale (cy/mrad)	*Nuit 1*	*Nuit 5-1*	*Nuit 5-2*
0.1		x	x
0,3	x	x	x
0,6	x	x	
0,9	x		
AV limite	oui	oui	oui

Tableau 20 : valeurs de résolution spatiale testées pour chaque niveau de nuit

Le seuil de sensibilité aux contrastes a été évalué pour chaque valeur de résolution.

2.2. Expérimentation 2

Le but de cette étude est de se placer dans des conditions les plus représentatives possibles de la réalité et des conditions d'utilisation des opérateurs. La source lumineuse sera donc une source ponctuelle sur l'ensemble du champ des DVN.

2.2.1. Niveaux de luminance

Les expérimentations s'effectuent en salle noire. Une obscurité totale est réalisée dans la salle et seul l'écran fournit une source lumineuse d'environ 60 cd/m². Dans cette étude, une condition d'isoluminance est appliquée à l'entrée des systèmes testés (c'est-à-dire au niveau des objectifs). Des densités optiques identiques sont placées devant chacun des objectifs des systèmes en essai. Ce dispositif permet donc de simuler différents niveaux de luminance, fonction de la densité optique des filtres utilisés. Une conséquence est que, la fonction de transfert de l'optique des DVN étant différente, la luminance à l'oculaire n'est pas forcément identique. Les densités optiques (DO) ont été choisies afin d'obtenir des niveaux de luminance en entrée des systèmes correspondants à une :

- *Nuit 1*;
- *Nuit 4*.

Il n'y a pas eu de mesures de luminance en sortie des systèmes (c'est-à-dire au niveau des oculaires). A partir de ces valeurs de DO et des niveaux de nuit, il est aisé de calculer les niveaux de luminance théorique en sortie des DVN testés (tableau 21). Tous les calculs ne seront pas présentés car certaines valeurs ne peuvent être communiquées ici. Il apparait qu'en sortie des systèmes de vision nocturne, la luminance dans le DVN de type 2 est moins importante que dans le système de type 1 (environ 55%), pour les deux niveaux de nuit.

Luminance CRT (cd/m²)	Niveaux de nuit équivalents	DO	Luminance en entrée (cd/m²)	Transmission objectif (%)	Gain moyen du tube (cd/m²/lux)	Transmission oculaire	Différence de luminance T2/T1 en sortie (%)
60	*1*	3,2	$3,79^{E}$-2	90	20000	Dépend du DVN	**55,6**
60	*4*	4	$6,00^{E}$-4	90	20000	Dépend du DVN	**55,8**

Tableau 21 : différence de luminance de sortie calculée pour les deux DVN testés

La luminance de sortie, exprimée en pourcentage (%), est le ratio de la luminance de sortie du système T2 par celle du système T1 (T2/T1).

Il s'agit donc d'un protocole représentatif d'une situation réelle, traduisant des écarts d'acuité visuelle entre les deux systèmes en fonction du contraste des mires. Cependant, l'écran étant positionné à 6 mètres du dispositif de vision nocturne, la partie éclairée ne représente qu'un champ angulaire d'environ 4 degrés. Le champ des DVN est de 40 degrés, si bien que le flux lumineux de l'écran n'éclaire qu'une faible portion du champ du système optique. Le tube IL est, pour sa part, sensible à l'éclairement moyenné dans tout le champ. L'inconvénient résultant est que, même si la tâche d'acuité visuelle peut être réalisée, le fonctionnement des tubes intensificateurs n'est pas correctement optimisé.

En fait, les niveaux de nuits équivalents obtenus se sont révélés beaucoup plus sombres que ceux calculés en fonction des valeurs des densités optiques. Pour valider les niveaux de nuit, des mesures d'acuité visuelle limite ont été effectuées, sur des mires à 100% de contraste, avec le DVN de type 1. Pour l'atténuation la plus faible, l'acuité visuelle limite est de 0,8 cy/mrad. Pour l'atténuation la plus importante, l'acuité visuelle. Ces valeurs ne correspondent pas aux valeurs normalement obtenues pour, respectivement, une *nuit 1* et une *nuit 4* (Pinkus et Task, 1998) mais plutôt à une *nuit 3-4* pour le premier niveau et à une *nuit 5* pour le second. Les conditions étant identiques, avec les deux systèmes de vision nocturne, le rapport de luminance entre les deux DVN est conservé. Pour la suite de cette expérimentation, nous parlerons d'une nuit claire et d'une nuit sombre.

2.2.2. Sujets

Un groupe de 6 sujets (2 femmes et 4 hommes) a été testé, mais seulement 4 sujets (4 hommes) ont été retenus pour l'analyse, deux des sujets du groupe initial présentant un astigmatisme trop important impactant de manière sensible les performances de résolution.
Chaque sujet a été préalablement évalué par visuotest classique afin de vérifier le critère d'inclusion suivant: acuité minimum 10/10 (vérification en condition photopique et mésopique) (tableau 17). Comme pour la précédente expérimentation, l'acuité visuelle des sujets a été testée à l'aide de FrACT (tableau 22).

Acuité visuelle	Sujet 1	Sujet 2	Sujet 3	Sujet 4
Photopique	12/10	12/10	12/10	12/10
Mésopique	10/10	12/10	10/10	12/10
FrACT	15,5/10	18/10	17/10	15,5/10

Tableau 22 : acuité visuelle des sujets

2.2.3. Procédure

Un temps d'habituation de 8 minutes est nécessaire au sujet pour s'adapter à l'obscurité en vision centrale. Chaque sujet profite du temps d'habituation initial pour régler les objectifs de façon à obtenir la focalisation optimale (réglage en monoculaire, un œil après l'autre).
Le sujet est assis sur une chaise placée dans l'axe de l'écran. La distance d'observation est de 6 mètres. Chaque sujet observe l'écran au travers du dispositif : il détermine l'orientation de l'optotype parmi les 8 orientations possibles (nord, sud, est, ouest, nord ouest, nord est, sud est, sud ouest). Toutes les mesures sont réalisées en binoculaire.
Pour chaque niveau de luminance, 5 tailles d'optotypes (ou résolution) sont testés. La luminance ayant une influence sur la capacité de résolution spatiale, il n'est pas possible de tester les 5 mêmes valeurs de résolution. Seules trois valeurs de résolution parmi les 5 sont communes aux deux niveaux d'illumination et ce sont ces valeurs qui seront présentées dans les résultats (tableau 23).

	Nuit claire	*Nuit sombre*
Résolution spatiale (cy/mrad)	0,4	0,4
	0,5	0,5
	0,6	0,6

Tableau 23 : résolutions spatiales testées pour chaque niveau de nuit

Le seuil de sensibilité aux contrastes est évalué pour chaque valeur de résolution.

3. Résultats : Etude 1

Les données sont analysées par des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et des ANOVAs, puis des tests a posteriori de Bonferroni-Dunn. Les effets mis en évidence par les tests paramétriques et non paramétriques sont identiques.

Les résultats de cette étude indiquent, les différences de perception du contraste en fonction du niveau de luminance, du système de vision nocturne utilisé et du niveau de résolution spatiale. Les performances sont mesurées par l'étude des seuils de sensibilité aux contrastes exprimés en pourcentage. Les résultats sont présentés dans le tableau 24 et la figure 58.

		Système T1		Système T2	
Niveaux de nuit	Résolution spatiale (cy/mrad)	Moyenne (%)	Ecart-type	Moyenne (%)	Ecart-type
Nuit 1	0,3	5,03	2,01	4,15	1,64
	0,6	16,71	7,06	10,20	4,01
	0.9	34,63	9,93	23,23	5,12
Nuit 5-1	0,1	7,10	1,10	8,17	1,00
	0,3	20,57	5,07	26,75	6,03
	0,6	95,25	5,11	97,66	5,23
Nuit 5-2	0,1	18,45	6,51	14,27	2,28
	0,3	89,38	15,07	76,10	15,25

Tableau 24 : valeurs de seuil de sensibilité au contraste (étude 1)

Les résultats présentés sont les valeurs moyennes de l'ensemble des sujets. Ils sont exprimés en pourcentage (%), en fonction de la résolution spatiale testée, du niveau de nuit et du type de DVN.

Quel que soit le DVN (T1 ou T2), il n'y a pas de différence de sensibilité aux contrastes ($F(1) = 147,34$; $p = ns$). L'effet du type de DVN est non significatif.

Lorsque le niveau de nuit testé augmente (c'est-dire que le niveau de luminance diminue), le seuil de sensibilité au contraste augmente donc la sensibilité aux contrastes diminue (figure 7). L'effet est significatif entre tous les niveaux par test a posteriori ($F(2) = 42223,14$; $p < 0.0001$ ou $H(2) = 48,77$; $p < 0,0001$).

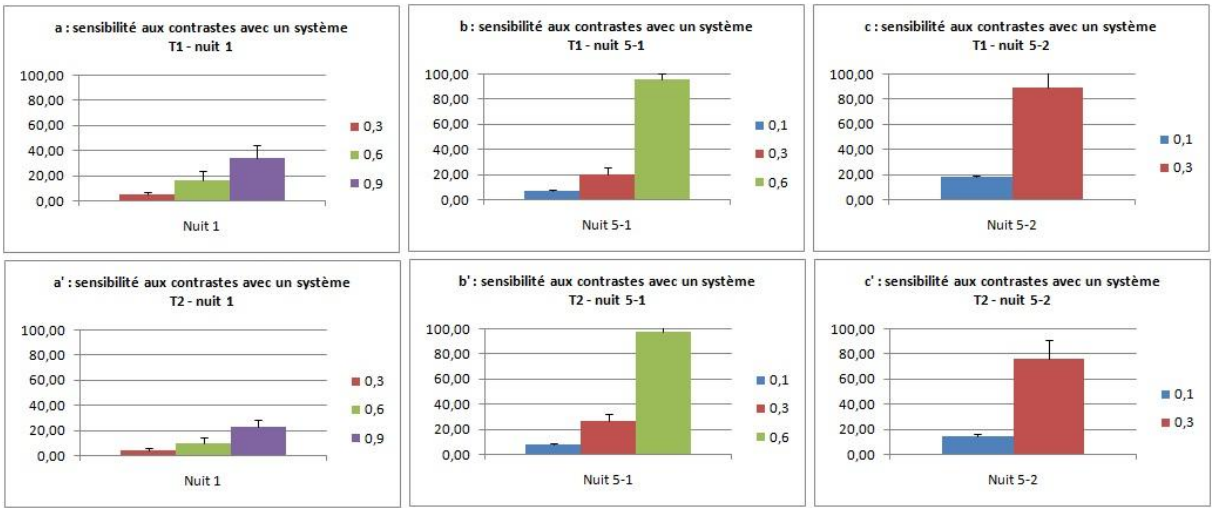


Figure 58 : variations de sensibilité au contraste, en fonction du niveau de nuit (étude 1)

Les résultats présentés sont les valeurs moyennes de l'ensemble des sujets. La ligne du haut correspond aux résultats obtenus avec le système T1 et la ligne du bas et le système T2. Les figures de la colonne de gauche correspondent à la nuit 1, celles du centre à la nuit 5-1 et celles de droite à la nuit 5-2.

Le seuil de sensibilité aux contrastes augmente avec la résolution spatiale (figure 1). Détecter un optotype de plus en plus petit nécessite une différence de contraste plus importante entre le fond et l'objet. Cet effet est significatif pour toutes les résolutions spatiales testées ($F(3) = 90156{,}04$; $p < 0{,}0001$ ou $H(3) = 55{,}94$; $p < 0{,}0001$).

Il y a une interaction significative ($F(6) = 5290{,}60$; $p < 0{,}0001$) entre le niveau de nuit et la résolution spatiale. Cette interaction traduit l'effet de la luminance sur la taille des optotypes choisis pour chaque niveau de luminance au départ pour effectuer l'expérimentation.

Nous avons réalisé des mesures d'acuité visuelle limite obtenue pour un contraste maximal (100%). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 59. D'après cette figure, il apparaît clair qu'à contraste maximal, il n'existe pas de différence de performance d'acuité visuelle limite entre les deux systèmes. Pour le niveau de *nuit 1*, le système T2 semble légèrement meilleur mais la performance est similaire pour la *nuit 5* que ce soit en *nuit 5-1* ou *5-2*.

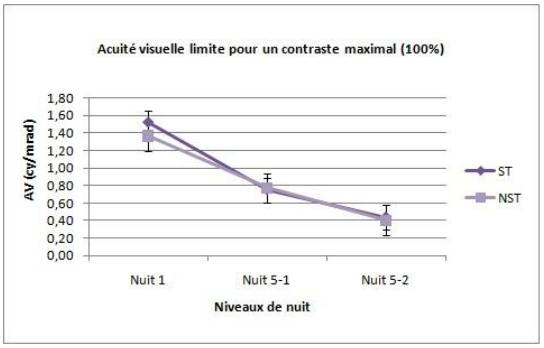


Figure 59 : mesures d'acuité visuelle limite, obtenue avec un contraste de 100%

Les résultats présentés sont les valeurs moyennes de l'ensemble des sujets. L'axe des abscisses représente les niveaux de nuits et l'axe des ordonnées la mesure d'acuité visuelle exprimée en cycle par milliradian. La courbe bleue indique les performances d'acuité visuelle pour le système ST et la courbe rose les performances du système NST.

4. Résultats : Expérimentation 2

Comme dans l'expérimentation 1, les données sont analysées par des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et des ANOVAs, puis des tests a posteriori de Bonferroni-Dunn. Les effets mis en évidence par les tests paramétriques et non paramétriques sont identiques. Nous avons choisi de ne présenter que les résultats des ANOVAs dans les résultats suivants.

Les résultats de cette seconde étude, tout comme la première, expriment les différences de sensibilité aux contrastes (SC), exprimés en pourcentage, en fonction des systèmes de vision nocturne utilisés et des résolutions spatiales (exprimées en cycle par milliradian). Les résultats, présentés dans le tableau 25 et la figure 60, sont les valeurs de seuil de sensibilité au contraste.

		Système T1		Système T2	
Niveaux de nuit	Résolution spatiale (cy/mrad)	Moyenne (%)	Ecart-type	Moyenne (%)	Ecart-type
Nuit claire	0,4	4,68	2,16	4,88	0,92
	0,5	6,28	3,44	6,27	2,42
	0,6	7,44	4,77	7,90	3,44
Nuit sombre	0,4	6,55	3,62	9,90	1,92
	0,5	8,07	1,72	11,59	2,40
	0,6	10,76	4,39	15,09	4,12

Tableau 25 : valeurs de seuil de sensibilité au contraste (étude 2)

Les résultats présentés sont les valeurs moyennes de l'ensemble des sujets Ils sont exprimés en pourcentage (%), en fonction de la résolution spatiale testée, du niveau de nuit et du type de DVN.

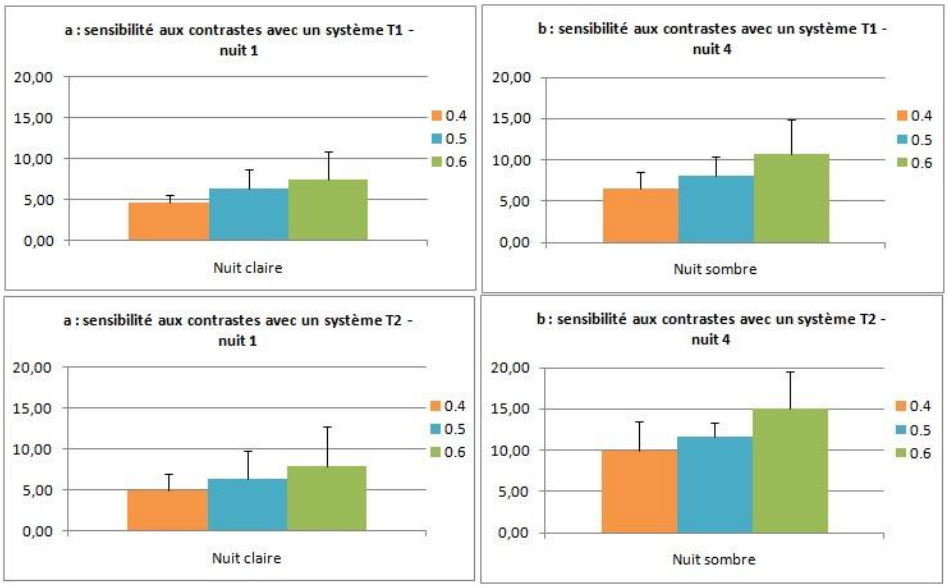


Figure 60: variations de sensibilité au contraste, en fonction du niveau de nuit (étude 2)

Les résultats présentés sont les valeurs moyennes de l'ensemble des sujets. La ligne du haut correspond aux résultats obtenus avec le système T1 et la ligne du bas et le système T2. Les figures de la colonne de gauche correspondent à la nuit claire et celles de droite à la nuit sombre.

Globalement, les seuils de sensibilité aux contraste avec le système de type 2 sont moins bons que ceux atteints par les sujets avec le DVN de type 1. Ceci quel que soit le niveau de nuit et la résolution spatiale testée. La différence est les deux systèmes est plus importante en *nuit sombre* qu'en *nuit claire*.

Comme dans l'étude 1, si l'on ne considère que les valeurs moyennes, quel que soit le type de DVN, il n'y a pas de différence de sensibilité aux contrastes ($F(1) = 6,08$; $p = 0,09$).

La perception du contraste diminue avec la résolution spatiale (figure 9). Plus l'optotype à détecter est petit, plus le contraste entre l'objet et le fond nécessaire à la détection doit être grand ce qui signifie que le seuil augmente ($F(2) = 116,66$; $p < 0,01$).

Il y a un effet significatif du niveau de nuit ($F(1) = 200,33$; $p < 0,001$), c'est-à-dire que la sensibilité aux contrastes des sujets diminuent quand le niveau de nuit augmente. Cependant, l'effet du niveau de nuit n'est pas le même sur les deux types de DVN testé : la sensibilité aux contrastes diminue de manière significativement plus importante avec le système T2 qu'avec le système T1 en *nuit sombre*. En *nuit claire*, les performances des sujets sont équivalentes pour les deux systèmes. Cette interaction entre le niveau de nuit et le type de DVN est significative ($F(1) = 22,62$; $p < 0,05$).

5. Discussion

5.1. Méthodologie

Le logiciel FrACT (Bach, 1996) a été utilisé pour les deux expérimentations réalisées. Ce test automatisé a, jusqu'à présent, principalement été utilisé pour des mesures dans des études cliniques (Dennis et al., 2004 ; Bühren et al., 2006). Pour des tests à différentes luminances, le logiciel FrACT peut être considéré comme un test d'évaluation largement validé. Il est fondé sur les critères habituellement utilisés pour les mesures psychophysiques avec une large gamme de stimuli, un test par choix forcé, la faible probabilité de chance et la limitation des effets d'apprentissage par une présentation randomisée par le logiciel. Il apparaît de façon claire que le logiciel FrACT constitue une solution satisfaisante pour des besoins d'évaluation psychophysique dans le domaine de l'acuité visuelle et du contraste.

Lors des expérimentations, la méthode d'affichage sur écran proposé par Rabin (1993) a été utilisée. Un écran à tube cathodique où seul le phosphore rouge est utilisé a donc servi comme support d'affichage des stimuli. La mesure du spectre d'émission de l'écran dans le blanc, le vert, le bleu et le rouge, montre que celui-ci émet deux pics compris entre 600 et 720 nm. Ceci est cohérent avec les données de Rabin dont l'écran est doté d'un phosphore P22 émet dans le

même domaine de sensibilité. Le choix de cet écran est donc pertinent dans la mesure où il permet d'afficher efficacement un stimulus visuel compatible des systèmes de vision nocturne.

Maîtriser l'environnement lumineux, en particulier la quantité de lumière qui arrive sur les tubes intensificateurs, constitue un élément fondamental pour les expérimentations avec des systèmes de vision nocturne. Dans la deuxième étude, les densités neutres utilisées n'ont pas permis d'obtenir les conditions de luminance souhaitées. En effet, les densités optiques devaient avaient été calculées pour restituer une condition de *nuit 1* et une de *nuit 4* (convention Finabel*)*. En fait, pour les deux types de DVN, les résultats obtenus indiquent plutôt un équivalent *nuit 3-4* pour la nuit la plus claire et *nuit 5* pour la nuit la plus sombre. Les valeurs obtenues montrent une cohérence avec les mesures d'acuité visuelle limite dans ces conditions (Pinkus et Task, 1998).

L'origine de ces écarts correspond principalement au fait que le système de type 2 impose, du fait du sur-écartement des capteurs, une source de stimulation éloignée (6 mètres, e.g. 20 pieds). De plus, les distances conventionnelles sont généralement recommandées à 20 pieds (soit 6 mètres) (Levine et Rash, 1989 ; Wiley, 1989). Enfin, un système de type 2 ne permet pas de faire les mesures à très courte distance (inférieure à 3 mètres).

Ceci implique, compte-tenu de la taille de l'écran, que la source de stimulation (60 cd/m²) ne représente qu'une tache de 5° sur les 40° du champ du système de vision nocturne. Le gain du système étant fonction de la luminance moyenne sur l'ensemble du champ, la faible surface éclairée réduit considérablement performance des tubes IL, même avec un gain au maximum. Rabin (1993) avait utilisé un système de type 1, placé à 40 cm de l'écran, permettant ainsi d'éclairer la totalité du champ des systèmes optiques.

5.2. Expérimentations

Les résultats obtenus montrent que, dans les niveaux de basse et très basse luminance, il existe de très larges variations interindividuelles. Les sujets ayant participé aux expérimentations présentaient pourtant une acuité photopique ainsi qu'une acuité mésopique suffisante pour ne pas limiter le système. Pinkus, Task, Dixon et Gooyear (2000) et Riegler, Whiteley, Task et Schueren (1990) avaient déjà mis en évidence la grande variabilité des mesures d'acuité en basse luminance dans une population de sujets connus pour avoir une excellente acuité visuelle en vision photopique. L'étude de Pinkus et al. (2000), utilisant des systèmes de vision nocturne de type 1 et de 3^{e} génération, sur 3 sujets, montre que la limite de reproductibilité

des mesures d'acuité est de seulement 13% pour une *nuit 2* et de 17% en *nuit 4*. Riegler et al. (1991) ont également mis en évidence la variabilité des mesures d'acuité visuelle avec des mesures entre 0,84 et 0,54 cy/mrad pour une *nuit 3* et entre 0,33 et 0,20 cy/mrad pour la *nuit 5*. Bien que ces valeurs d'acuité soient moins bonnes que celles obtenues au cours de nos expérimentations, car réalisées avec un système type 1 de génération plus ancienne, il y a peu de différence dans le classement des sujets en rang, du meilleur au moins bon selon leur performance. Certains sujets sont meilleurs que d'autres en très basse luminance. En ce qui concerne l'étude 1, on ne trouve pas de classement des sujets par rang, ni dans la même gamme de luminance et ni dans la même gamme de fréquences choisies. Dans l'étude 2, le rang des sujets est identique pour un DVN donné. Cependant, ce rang des sujets diffère entre les deux systèmes, participant ainsi à la variabilité des résultats.
La variabilité des mesures de contraste a été confirmée par Rabin (1995) qui a comparé les performances d'acuité visuelle à celles de sensibilité aux contrastes sur un groupe de 16 sujets en condition photopique (128 cd/m²). Il montre ainsi que la variabilité est plus importante pour la sensibilité aux contrastes que pour l'acuité.

Malgré cette variabilité, il est toutefois possible de dégager deux résultats principaux qui confirment les données de la littérature sur le sujet : la sensibilité aux contrastes diminue lorsque la résolution augmente et la sensibilité aux contrastes diminue avec le niveau de nuit, aussi bien pour les systèmes de type 1 que de type 2. Notons ici que l'ensemble des études publiées antérieurement auxquelles nous avons pu comparer nos résultats, n'ont été réalisées que sur des systèmes de type 1. Il ne semble apparemment pas que des expérimentations comparatives type 1/type 2 aient été déjà menées sur le sujet

<u>1er effet observé :</u>

Dans les deux études, la sensibilité aux contrastes diminue quand la résolution spatiale du stimulus augmente. Ceci s'applique à tous les sujets et pour les deux types de systèmes de vision nocturne. Cette constatation est en accord avec les données d'études antérieures:

- Biondini et Mattiello (1985) ont réalisé des mesures en vision directe avec des mires de Foucault. Avec des niveaux de luminance pratiquement identiques à ceux utilisés dans notre étude, ils montrent une diminution de la sensibilité aux contrastes pour les hautes et moyennes fréquences spatiales.

- Hughes (2001) et Rabin (1993) ont étudié la variation de la sensibilité aux contrastes pour des systèmes de vision nocturne. Avec des systèmes de type 1 récents, la sensibilité aux contrastes diminue. Cet effet est plus important pour les hautes fréquences spatiales, même dans des conditions de mesures à très courte distance (Rabin, 1993).
- Kotulak et Rash (1992), Rabin (1996) et Wiley (1989) ont, pour leur part, réalisé des mesures d'acuité visuelle en fonction du contraste. Que ce soit avec des systèmes de vision nocturne de génération récente et ancienne, ou en simulation sur écran, ces études montrent toute une diminution de la sensibilité aux contrastes pour les hautes fréquences spatiales.

2e effet observé :

Dans les deux études, on constate que la sensibilité aux contrastes diminue avec le niveau de nuit.

- Les données recueillies sont globalement en accord avec celles de Rabin (1993) et de Hughes (2001). Ces auteurs ont mis en évidence une baisse de la sensibilité aux contrastes avec le niveau de nuit sur des systèmes de type 1 de génération récente. Cette baisse est d'autant plus importante que le niveau de nuit diminue.
- Des résultats identiques ont été obtenus pour des systèmes de type 1 de génération antérieure par Kotulak et Rash (1992) et Wiley (1989).
- Levine et Rash (1989) ont montré, avec des systèmes d'ancienne génération, que l'acuité visuelle est fortement dégradée pour les très bas contrastes (3%). Pour les contrastes haut et moyen (90 et 30%), l'acuité demeure pratiquement identique. Encore une fois, cet effet est d'autant plus important que le niveau de nuit diminue.
- Rabin (1994a) a réalisé une étude comparative de l'effet de la luminance sur l'acuité visuelle et la sensibilité aux contrastes à l'œil nu. Il a montré que la diminution de la luminance a un impact plus important sur le contraste que sur l'acuité (pour une chute de luminance identique, réduction du contraste d'un facteur 17 contre une chute d'un facteur 3 pour l'acuité visuelle). Cette étude, bien que couvrant une gamme de luminance supérieure à la nôtre, constitue un bon exemple de l'importance de la luminance qui arrive à l'œil.

- En utilisant une méthode de simulation d'intensification de lumière sur écran, Rabin (1992) a mis en évidence que le contraste perçu est deux fois plus faible que le contraste réel. Selon lui, la différence de sensibilité aux contrastes serait due à la différence de luminance.

Dans l'étude 1, réalisée en isoluminance à l'œil (côté oculaire) par l'ajout de densités optiques adaptées pour chaque système, la mesure de sensibilité au contraste ne permet pas de différencier les deux systèmes. Dans ces conditions, il n'existe pas de différence entre les deux types de DVN.

Dans l'étude 2, la quantité de lumière entrant dans les tubes est la même (condition d'iso-luminance à l'objectif). La fonction de transfert de l'optique des deux systèmes étant différente, la quantité de lumière arrivant sur l'œil n'est pas forcément identique pour les deux systèmes. L'existence de différences observées au niveau de l'oculaire est donc représentative de conditions normales d'utilisation. Les résultats indiquent une différence significative entre les deux systèmes, en termes de sensibilité aux contrastes pour le niveau de *nuit 4*. Dans la condition de nuit la plus basse, la sensibilité au contraste des sujets utilisant le système T1 se révèle supérieure à celle obtenue au moyen du système T2. Elle est cependant identique pour la condition de *nuit 1* (nuit claire). Ce résultat peut être rapproché des valeurs de luminance calculées à l'oculaire pour les deux systèmes en nuit très basse, qui, dans les conditions expérimentales, sont sensiblement plus élevées pour le système T1 que pour le système T2 (de l'ordre de 50%). Il faut bien sûr être prudent sur ces différents points, compte tenu des conditions dans lesquelles les mesures ont été réalisées, du faible effectif des sujets et du fait qu'il s'agit pour la luminance à l'oculaire de valeurs calculées et non mesurées pour l'expérimentation 2.

L'étude de Levine et Rash (1989), déjà citée pour les effets de la luminance sur le contraste, a utilisé une approche inverse avec des densités optiques au niveau de l'oculaire pour atténuer la luminance arrivant à l'œil. Les résultats obtenus indiquent que, dans une condition de nuit claire (0,03 fL), il est possible d'atténuer jusqu'à 90% de la luminance sans dégrader l'acuité. En revanche, pour une nuit plus sombre (0,0003fL), l'acuité n'est maintenue que jusqu'à 70% d'atténuation. Cette étude a été réalisé avec des systèmes de type 1 d'ancienne génération avec des caractéristiques de luminance à l'oculaire comprises entre 1,02 et 3,1 cd/m² (Verona et Rash, 1989).

L'ensemble des études présentées tend donc à montrer que, lorsque la luminance à l'œil devient très faible, l'acuité visuelle des sujets est susceptible de se dégrader rapidement pour des variations minimes de luminance, d'autant plus que le contraste sera faible.

6. Conclusion - Perspectives

Ces deux expérimentations permettent de confirmer notre hypothèse de départ selon laquelle une différence de luminance en sortie des tubes, à l'oculaire, entre un système de type 1 et un de type 2 pourrait produire une différence de sensibilité aux contrastes entre les deux.
L'utilisation d'une méthode combinant le logiciel FrACT couplé à la présentation d'images test sur fond rouge, se révèle donc particulièrement intéressante pour conduire des expérimentations « sensorielles » sur la mesure de la sensibilité au contraste des systèmes de vision nocturne. Elle constitue une voie de recherche intéressante dans ce domaine.

L'étude des résultats montre qu'il serait utile de compléter ces évaluations en augmentant le nombre de sujets évalués, mais aussi de mener des expérimentations mieux contrôlées dans les conditions réelles d'utilisation des systèmes. Il serait également intéressant de mener des investigations permettant d'améliorer les systèmes en assurant une meilleure compréhension de la problématique du contraste et de son impact sur l'interprétation d'une image par l'opérateur.

- CHAPITRE 3 -

CONCLUSION SUR LES METHODOLOGIES SENSORIELLES

L'ensemble de ces expérimentations repose sur ses mesures d'acuité visuelle dans différentes conditions de vison nocturne. Elles ont d'abord été orientées vers l'étude de l'hyperstéréoscopie, puis sur les mesures de sensibilité aux contrastes. L'ensemble de ces expérimentations a permis de mettre en place une méthodologie d'évaluation de caractéristiques importantes de la vision dans le contexte des systèmes de vision nocturne, en particulier :

- de mettre en doute l'effet du conflit accommodation/convergence sur les difficultés rapportées par les pilotes portant des systèmes de type 2 générant une situation « hyperstéréoscopie », en particulier lorsqu'ils utilisent les informations visuelles à courtes distances (moins de 5 mètres) ;
- de confirmer qu'il existe une différence de sensibilité aux contrastes pour les opérateurs entre les systèmes de type et ceux de type 2. Les performances sont identiques en nuit 1 (haute luminance) mais il y a une différence dans les conditions de basse luminance. Ceci est très vraisemblablement dû à la différence de luminance en sortie du DVN (au niveau de l'oculaire). Les valeurs de luminances à l'œil calculées indiquent une différence assez sensible entre le dispositif de type 1 (valeurs les plus élevées) et celui de type 2 (les plus faibles).

Cependant, même si l'utilisation de telles méthodes permet de mieux saisir les mécanismes de traitement de l'information mis en jeu par les pilotes, elle présente surtout l'avantage d'être plus facile à mettre en place et de produire des résultats reproductibles. Elles sont pourtant loin de rendre compte de la réalité opérationnelle des activités et des tâches des pilotes d'hélicoptères lors de vol de nuit sous DVN.

La partie suivante de ce travail a permis de mettre en place les bases d'une méthodologie d'évaluation des DVN avec des scénarii opérationnels reproduisant des activités et tâches types. Le but de ce travail est d'explorer les mécanismes de traitement cognitif de l'information effectués par les pilotes sur les images issues des tubes IL.

PARTIE 4 : METHODOLOGIES COGNITIVES

« Va prendre tes leçons dans la nature »

Léonard de Vinci

Les systèmes de vision nocturne (DVN) sont des dispositifs optiques généralement « analogiques », qui fournissent une aide précieuse, en particulier aux pilotes d'hélicoptères, pour leurs missions nocturnes. Lors de leur conception, les DVN doivent répondre à des critères et spécifications de mesures physiques. L'utilisabilité et les critères opérationnels ne sont en fait évalués que tardivement, généralement lors des essais en vol.

Actuellement, les méthodologies d'évaluation cognitives sont relativement peu développées. C'est par exemples celles permettant l'évaluation de la perception distance/hauteur (Leger, Roumes, Bergeaud, Dareoux et Gardelle, 1998 ; Roumes, Plantier et Léger, 1998). Cette méthode est fondée sur des travaux de recherches réalisés à l'Institut de Médecine Aérospatiale du Service de Santé des Armées dès le début des années 90 (Roumes, Plantier et Menu, 1991), orientées vers l'action des pilotes plus que dans la seule verbalisation. Les métriques utilisées sont plus objectives, utilisant des techniques de bissection (Gilinsky 1989 ; Kunnapas, 1960 ; Teghtsoonian et Teghtsoonian, 1970) plutôt qu'une évaluation directe de la distance. Ceci implique que le pilote positionne activement son appareil de façon à ce qu'un repère proche soit perçu à mi-distance entre sa propre position et un repère lointain, comme indiqué sur la figure 61 ci-dessous.

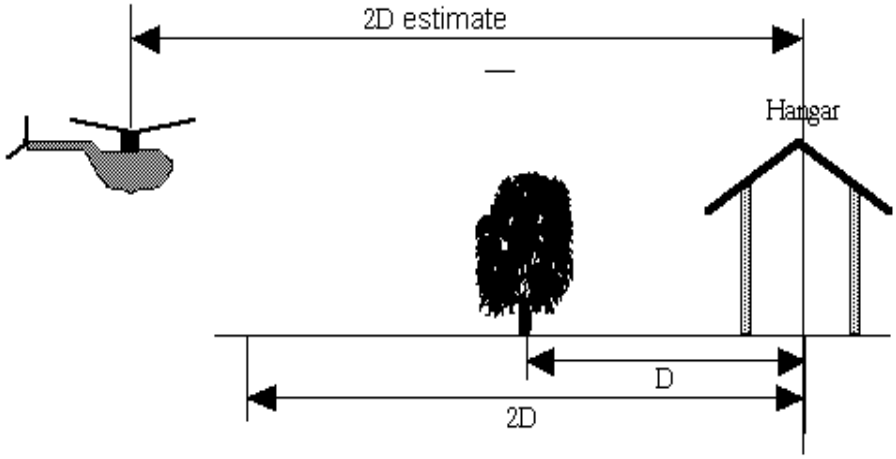


Figure 61: estimation de la double distance
(d'après Léger et al., 1998)

On parle alors d'évaluation de double distance. La mesure retenue est l'erreur (en mètres) entre la distance de positionnement par rapport au premier repère et la distance fixe (connue) entre le premier et le deuxième repère. La technique est identique pour une estimation dans le plan vertical (double hauteur).

Le but de cette étude est de développer une méthodologie d'évaluation cognitive des DVN, dans des conditions contrôlées de laboratoire (salle noire). Pour cela, l'idée est d'utiliser des images ayant un sens par rapport à la réalité opérationnelle des pilotes d'hélicoptères et à leur activité. Nous avons donc mené une analyse des tâches et de l'activité afin de comprendre comment les pilotes utilisent les informations issues des DVN pour mener à bien leurs missions

- CHAPITRE 1 -

RECUEIL DE L'EXPERTISE DE PILOTES D'HELICOPTERES UTILISANT DES DISPOSITIFS DE VISION NOCTURNE (DVN)

La définition d'une méthodologie d'évaluation fondée sur l'utilisation de critères cognitifs nécessite au préalable de s'intéresser à l'activité des pilotes opérationnels. Un recueil d'expertise auprès de pilotes d'hélicoptères effectuant régulièrement des missions de nuit avec des DVN a été mené sur ce sujet. Ce recueil a eu pour objectif d'identifier les mécanismes d'interprétation de l'information visuelle mis en œuvre par les pilotes pour appréhender les composantes de l'environnement dans lequel ils évoluent. Il s'agit également d'identifier la façon dont ils organisent leur expertise pour mener à bien leur mission, les difficultés auxquelles ils peuvent être confrontés et la manière de surmonter ces difficultés.

La mise en place de ce recueil a été menée après une analyse de la littérature et en s'appuyant sur l'expertise d'ergonomes et de sociologues.

La démarche mise en place s'appuie sur trois points : rappels sur des aspects théoriques importants, présentation de l'approche choisie pour réaliser le recueil d'expertise, principaux résultats sur l'organisation de l'expertise des pilotes interrogés.

1. Rappels théoriques

1.1. Recueil d'expertise

La pratique de connaissances ou d'expertise nécessite d'utiliser une approche correctement structurée. Cette condition est essentielle pour assurer la validité de l'expertise que l'on a recueillie. Le nombre d'experts participant à ce recueil constitue un point important comme le souligne Amalberti et al. (1987). En règle générale, il est prudent d'éviter de pratiquer une analyse restreinte à expert unique. Il faut également tenir compte du fait que la finalité même du type d'activités envisagées conditionne fortement la validité du recueil d'expertise. En termes de finalité, deux types principaux apparaissent :

- Le premier type regroupe les situations de conception de systèmes experts : il s'agit de fournir à un programme informatique des faits, des règles et des raisonnements (moteur d'inférence) afin de résoudre un problème ou de répondre à une question (Bonnet, Haton et Truong, 1986 ; Ignosio, 1991). Ces systèmes experts s'appuient sur

différentes logiques mais pas sur le principe de fonctionnement cognitif de l'expert. C'est la somme de connaissances obtenues à partir de plusieurs experts qui va fournir le système expert. Dans ce cas, le critère de validité est la consistance logique à représenter la réalité et à permettre de prédire des solutions acceptables par l'humain. Ce champ se réduit souvent aux situations « incidentelles » (c'est-à-dire à la résolution de problèmes, d'incidents) et ne constitue pas une modélisation globale des activités de l'opérateur.

- Le second type de finalités a pour but de construire un modèle de toutes les activités de l'opérateur dans la tâche, sans se limiter à la notion de résolution d'incident, contrairement au premier type. Le but est de reconstituer au mieux l'organisation cognitive d'un sujet à partir de connaissances « atomistes » ou d'inférences sur les observations. Ce type d'approche contraint à évaluer un modèle pour chaque expert interrogé. Selon les cas, on pourra trouver les similitudes et les variations de modèles d'un expert à un autre (un pilote à un autre) et on va essayer de comprendre l'origine de ces similitudes et de ces variations.

1.2. Techniques employées pour le recueil d'expertise

Pour la mise en place des entretiens, l'enquête et le questionnaire sont les techniques le plus souvent utilisées. Elles ont pour but principal de faire produire et de recueillir de l'information verbale. Pour recueillir l'information, il existe deux approches opposées, l'approche directive et l'approche non-directive, qui seront décrites ci-dessous. Différents outils ou techniques de recueil l'expertise seront utilisés en fonction de l'approche choisie.

1.2.1. Approche directive

L'approche directive permet de collecter les informations selon une démarche très structurée, sous forme d'entretiens. La personne interrogée a connaissance de l'ensemble du questionnaire, tandis que l'enquêteur est chargé de noter ses réponses au fur et à mesure en veillant à ce qu'aucune omission ou erreur ne survienne. Ce type d'entretien est similaire au questionnaire, mais le rendu se fait verbalement plutôt que par écrit.

1.2.2. Approche non-directive

Rogers (1945) a développé l'approche non-directive. En tant que psychologue, sa préoccupation principale a été de pouvoir aider, conseiller les clients qui venaient le trouver pour lui demander de l'aide. Cependant, il a constaté que, pour mettre en place cette aide et

cette prise en charge, il était nécessaire d'adopter une attitude professionnelle, dite **non-directive**. Il faut considérer la notion d'empathie, c'est-à-dire la capacité à se mettre à la place de l'autre, à ressentir ce qu'il ressent, à éprouver ce qu'il éprouve. Cela nécessite une acceptation inconditionnelle de l'autre, de ce qu'il dit, de ce qu'il est. Cela suppose de ne pas se sentir menacé, ni dans ses opinions ni dans son identité personnelle. L'impact de la non-directivité sur les formations des enquêteurs et techniques d'entretien est, bien qu'issu de la psychologie thérapeutique, considéré comme très important.

1.2.3. Comparaison des deux types d'approches

L'échelle développée par Porter (1950) met en évidence les indicateurs essentiels des approches directives et non-directives (tableau 26).

Approche directive	- poser des questions très précises - donner des informations relatives au problème - indiquer le thème de l'entretien - proposer une activité au client - reconnaître le contenu de ce que le client vient de dire - mettre de l'ordre dans les évidences - signaler le problème à résoudre
Approche non directive	- reconnaître le sentiment/attitude exprimé dans l'immédiat - interpréter les sentiments/attitudes exprimés dans le discours général - indiquer le thème de l'entretien - reconnaître le contenu de ce que le client vient de dire - poser des questions peu précises - donner des informations - définir la situation d'entretien par la responsabilité qu'a le client de l'utiliser

Tableau 26 : indicateurs essentiels des approches directives et non directives (d'après Porter, 1950)

L'inconvénient de l'approche directive est qu'elle implique une intervention directe de l'enquêteur pour orienter et diriger vers un objectif final présupposé. Sa limite peut être de passer à côté d'éléments du discours qui apparaîtraient plus naturellement et spontanément

dans des entretiens non directifs. La non-directivité facilite l'expression de la personne et la prise en charge de ses questions et difficultés. Cette méthode permet de ne rien imposer et d'obtenir d'autrui l'expression spontanée la plus complète sans induire d'artefacts (Mucchieli, 2007).

1.2.4. Différents types d'entretiens de recherche

Ce que l'on appelle « entretiens de recherche » représente une des techniques de recueil de l'expertise appartenant à un type d'approche.

La contrainte principale de ces techniques d'entretien est d'obtenir un discours fiable et valide, c'est-à-dire pertinent par rapport aux objectifs de recherche. Une des classifications utilisables pour les différents types d'entretien est le caractère plus ou moins directif du mode d'intervention de la personne en charge de l'entretien (Ghiglione et Matalon, 1978). On distingue ainsi :

- **l'entretien directif** qui correspond en partie avec le questionnaire à questions ouvertes ;
- **l'entretien semi-directif** qui utilise une grille de thèmes à aborder mais qui respecte un ordre, celui du discours de la personne interrogée ;
- **l'entretien non directif** qui est souvent réservé aux entretiens exploratoires.

Il est aussi possible de faire appel à des techniques mélangeant les différents types d'intervention, dites techniques composites.

1.2.5. La pratique de l'entretien

Il existe deux stratégies principales de conduite d'un entretien. La première solution peut consister, pour celui qui dirige l'entretien, à **chercher la neutralité**, en minimisant ses effets sur le discours produit par la personne interrogée. Dans ce cas, il s'agit donc de restreindre au minimum ses interventions et, pour celles effectuées, de garder la neutralité afin d'atteindre la subjectivité de la personne interrogée. C'est ici le gage de l'objectivité de la recherche. Par « subjectivité », on entend ce qui est individuel et fonction de la personnalité de chacun.

L'autre possibilité est de considérer l'entretien comme une **situation d'interaction**. Les interventions seront plus nombreuses sur le discours avec une moindre recherche de neutralité. Ceci même si, par sa position, celui qui dirige l'entretien se doit de garder une position relativement neutre.

Quelle que soit la technique utilisée, les bonnes pratiques doivent fournir la consigne de départ et aider ensuite l'expression par des relances.

1.2.5.1. La consigne de départ

Cette consigne va déterminer la pertinence du discours qui en découle et son interprétation. Elle permet de définir le thème de l'entretien. Les commentaires de la personne interrogée seront ensuite repris pour de nouvelles interventions. Il faut donc être extrêmement attentif à la formulation de la consigne. La consigne doit être claire, elle doit couvrir tout le champ que l'on souhaite explorer et être en accord avec ce qui a pu être dit avant la consigne

Voici un exemple issu de la grille d'entretien (tableau 28) :

« Le but est de dégager des invariants concernant le pilotage (avoir accès à votre connaissance, votre compétence en particulier à celles difficilement verbalisables car liées aux habiletés).

- Quelles sont les éléments essentiels dans le pilotage, au niveau de l'image IL ?
- Quels repères utilisent-ils pour mener à bien leur mission ? ».

1.2.5.2. La relance

En général, après une certaine durée d'entretien, le sujet interrogé pense avoir tout dit par rapport à la consigne initiale. Il faut alors savoir relancer la discussion. La technique la plus utilisée consiste à reprendre ce qui a été dit. Ceci indique à la personne interrogée qu'il a été écouté attentivement, que ce qu'il dit est pertinent et que ce qui est « sélectionné » présente un caractère incomplet.

Les réponses de ce type commencent, par exemple, par les formules suivantes :

- Ainsi, selon vous… ;
- Vous voulez dire que… ;
- En d'autres termes… ;
- A votre avis, donc…

Il existe plusieurs techniques de relance. Blanchet et al. (1988) ont mis au point une classification des interventions-commentaires (tableau 27). Les techniques de relance peuvent être classées en fonction du type d'acte (déclaration, interrogation ou réitération) ou du type de registre (modal ou référentiel).

		Type d'acte		
		Déclaration	Interrogation	Réitération
Type de registre	Modal	Interprétation	Question sur l'attitude	Reflet
	Référentiel	Complémentation	Question sur le contenu	Echo

Tableau 27 : classification des interventions dans la relance

Les **déclarations** ont pour but d'aider la personne interrogée à produire plus de discours. Les **complémentations** sont une synthèse partielle ou une inférence sur ce qui a été dit de la part de l'interrogateur. Il ne faut pas introduire de nouveau thème mais proposer une adjonction d'éléments complémentaires et la soumettre à l'acceptation de l'intéressé. Les **interprétations** mettent en cause l'intentionnalité de la personne interrogée et sont souvent mal acceptées. Elles peuvent conduire à un rejet pur et simple de la situation d'entretien ou à la disparition de la subjectivité du locuteur.

Les **interrogations** doivent être utilisées avec prudence car elles perturbent la production discursive du sujet et elle peut induire un rejet des opinions de l'intervenant (Jakobi et al., 1990).

Les **réitérations** sont de simples répétitions des paroles de la personne interrogée. Elles portent généralement sur un discours informatif qu'elles activent le plus souvent. L'**écho** consiste simplement à répéter les termes employés. Il est recommandé de ne pas l'utiliser avec abus le risque étant d'entrer dans un discours dénué de subjectivité de la part du locuteur. Cela peut être considéré, par l'intéressé, comme une remise en cause de ce qui est considéré comme vrai. Le **reflet** induit une problématique différente. Il s'agit ici d'une remise en question de la sincérité de la personne interrogée et le discours produit en retour sera plus personnel, plus intime et fortement modalisé, c'est-à-dire basé sur les représentations, plus que sur les expériences.

1.3. Analyse de l'activité et des tâches

L'analyse des tâches et de l'activité portent spécifiquement sur la contribution de l'opérateur humain dans l'exécution des missions. Elles s'intéressent aux procédures et aux compétences des opérateurs plutôt qu'aux buts, ressources et contraintes requis pour l'exécution des missions assignées.

Selon la nature des informations utilisées en entrée, il existe différents niveaux d'analyse. Ces différents niveaux sont complémentaires et ils interviennent successivement au cours du cycle

de la conception anthropocentrée. Que ce soit pour les tâches/activités observables (actions physiques) ou non observables (activités mentales/cognitives), les comportements sont étudiés dans un contexte de tâche précis qui donne lieu à une activité définie. Cette activité est basée sur la manipulation de connaissances et d'informations dont l'opérateur dispose pour mener à bien sa mission c'est-à-dire atteindre le but de sa tâche.

« L'analyse des tâches », dans son acception la plus générale, combine l'utilisation des documentations existantes avec des entretiens auprès d'opérateurs ou concepteurs du système. Il s'agit d'analyses dites « opérationnelles ». Ce niveau peut être détaillé et peut traiter des situations anormales, ainsi que certains aspects de la variabilité (niveaux d'expertise).

« L'analyse cognitive des tâches » vise, au-delà de l'analyse des tâches, à préciser les processus cognitifs mis en jeu dans l'exécution des tâches. Elle cherche à évaluer les niveaux de traitements des informations, les canaux de perception, les règles suivies lors des prises de décision, les éléments de connaissance utilisés le cas échéant, les exigences associées en termes de charge de travail, de conscience de situation ou encore de fatigue.

Quel que soit le formalisme adopté, les aspects suivants sont généralement compris comme partie importante explicitée lors des analyses :

- la structure de buts ou d'objectifs, généralement hiérarchique. C'est le résultat montrant que l'activité humaine peut être efficacement expliquée par une décomposition de l'objectif général de la tâche en sous-buts à atteindre. Lorsqu'il s'agit de décrire une situation « naturelle », un but ou un sous-but peut souvent être atteint de plusieurs façons, ce dont la description doit rendre compte explicitement.

- le déroulement chronologique des opérations associées à la tâche. Il s'agit, à un niveau très élémentaire, de l'ordre dans lequel les opérations sont réalisées, et à un niveau plus complexe, de l'ordre dans lequel est parcourue la décomposition en buts et sous-buts, selon les alternatives possibles et contraintes relatives à différentes tâches. En effet, classiquement, des tâches peuvent être ordonnées strictement à l'intérieur d'une séquence, être parallèles, voire indépendantes, avoir différents niveaux de priorité, etc.

- les objets (matières, outils, produits, informations, etc.) les propriétés et le comportement de ces objets et les événements impliqués dans la tâche. Les objets sont ceux présents, utilisés, modifiés supprimés ou créés par la tâche.

- les rôles, lorsque plusieurs personnes sont impliquées dans la tâche. Cette dimension collective des tâches est reconnue de plus en plus comme une variable importante pour

la sécurité et l'efficacité dans les systèmes de travail. Sa prise en copte dans le contexte de formation peut apporter un bénéfice considérable en temps, résultat et coût.

On soulignera que, suivant les acteurs, la finalité du recueil et la nature des tâches observées (tâche mentale vs tâche manuelle), il existe plusieurs façons de catégoriser, décomposer ou regrouper les différentes informations quant à la description de la tâche/activité d'un opérateur. De la même façon, des indicateurs peuvent être considérés comme bases empiriques justifiant la description de la tâche/activité considérée : comportements enregistrés, variables de performance (telles que le temps, le nombre d'erreurs, etc.), verbalisations spontanées ou provoquées, avis d'experts, etc.

1.3.1. Analyse hiérarchique des tâches (HTA)

Une des méthodes les plus couramment pratiquées pour l'analyse de tâches est la méthode HTA - Hierarchical Task Analysis (Annett et Duncan, 1967). Elle est utilisée pour différents objectifs : conception de système, élaboration des procédures d'emploi, soutien à la formation, analyse orientée sécurité.

Cette méthode permet d'aboutir à une décomposition hiérarchique des tâches (d'un but global aux actions élémentaires) incluant une description des plans selon lesquelles ces tâches sont mises en œuvre.

Une question délicate est celle du **niveau de détails** à laquelle il convient d'arrêter la décomposition hiérarchique. La réponse dépend de l'objectif de l'HTA. Un niveau de détail fin apparaît nécessaire pour la spécification des interfaces utilisateur lors de la conception d'un système. Il est préconisé d'adopter une démarche itérative : un faible niveau de détail (niveau des buts) doit être utilisé aux premiers stades de la conception centrée utilisateur, puis progressivement raffiné dans les cycles plus avancés.

Le processus **d'allocation des fonctions** en particulier doit s'envisager avec un niveau relativement haut. En effet, une décomposition de haut niveau permet d'envisager des solutions riches (automatisation partielle) et d'intégrer progressivement les fonctions émergentes dans l'analyse de tâches, alors qu'une décomposition fine fixerait de fait les choix d'allocation avec une logique binaire (i.e. une action élémentaire est attribuée soit à la machine soit à l'opérateur).

1.3.2. Analyse cognitive des tâches (CTA)

1.3.2.1. Introduction

En complément des analyses de tâches au niveau observable, il s'agit de mieux comprendre comment se font les prises de décision des utilisateurs. Les méthodes d'analyse cognitive servent à renseigner cet aspect.

L'analyse cognitive est réalisée sur la base de modèles théoriques du fonctionnement de l'opérateur humain lorsqu'il doit réaliser une activité. Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'étude du fonctionnement humain comme agent en interaction avec un système. Ces modèles théoriques ont servi à mettre en place et proposer des méthodes d'analyse cognitive.

Dans les domaines liés aux facteurs humains, plus précisément dans le domaine militaire et civil, il existe plus de 90 méthodes d'analyse cognitive. La difficulté est le manque de consensus de ces méthodes. Actuellement, plusieurs méthodes CTA sont combinées pour faire l'analyse cognitive des activités. De la même façon un ensemble d'outils a été élaboré pour formaliser les résultats des CTA.

Pour choisir entre toutes les méthodes, il s'agit de considérer pour une situation donnée, le type de processus cognitifs que l'on veut extraire. Ceci dépend du type de tâche à réaliser (e.g. on s'intéresse aux habilités perceptives, ou les modèles mentaux, ou une situation d'attention partagée, etc.). Enfin, il faut tenir compte de l'utilisation finale des résultats extraits de l'analyse cognitive. Ils serviront, par exemple, à la formulation des spécifications des IHM, à l'allocation des fonctions H/M, et enfin à la définition des techniques de formation et d'entraînement. Dans ce cas, il s'agit de décrire les différents niveaux de stratégies employées, les indices perceptuels saillants, les éléments du contexte, paramètres, etc. (Hoffman, 2003 ; Klein et Militello, 2003).

Nous présenterons ici, les méthodes proposées dans le cadre de la mise en place de notre méthodologie d'évaluation des systèmes de vision nocturne et, plus précisément, sur le développement de scénarii représentatifs de tâches opérationnelles.

A cet effet, il paraît important de préciser comment se font les prises de décision lors de la conduite de mission afin d'en mieux comprendre les implications. D'un point de vue psychologique, l'activité des pilotes peut être décomposée en plusieurs sous-tâches dont celle de prise de décision et de résolution de problèmes, qui nous intéresse plus particulièrement. La manière d'arriver à la solution est souvent multiple, et les solutions elles-mêmes sont souvent également multiples.

Ici, il s'agit de prendre en compte les différents niveaux de traitement de l'information ainsi que le niveau de connaissances requis de l'opérateur humain pour effectuer l'activité. Nous utiliserons pour cela les modèles issus des sciences cognitives, décrivant les processus

gouvernant le comportement des utilisateurs. Cette approche s'appuie sur la théorie de traitement de l'information, et plus directement sur le modèle des actions élaboré par Norman et Hollnagen (1986) et celui de prise de décision de Rasmussen (1986).

1.3.2.2. Modèles de Norman et Hollnagen et de Rasmussen

Le modèle de Norman et Hollnagen (1986) postule une décomposition des actions allant de l'activité mentale à l'intention de réaliser une action, et l'action physique réellement effectuée en 7 étapes :

1. Etablissement d'un but c'est-à-dire d'une représentation mentale d'un état à atteindre ;
2. Elaborer une intention qui résulte de l'écart entre l'état actuel du système et l'état à atteindre (plan général des actions à mettre en place) ;
3. Préciser la séquence d'actions c'est-à-dire transcription de l'intention (plan général) en une suite d'actions (étapes) ;
4. Exécution des actions avec mise en jeu des habiletés motrices ;
5. Perception de l'état du système ;
6. Interprétation l'état du système;
7. Evaluation de la relation entre le but à atteindre et les effets de l'action qui peut conduire à une modification du plan si l'action n'a pas permis d'atteindre le but fixé.

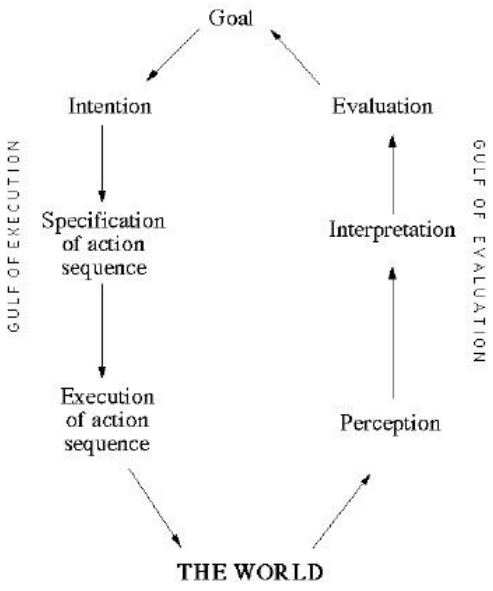


Figure 62 : les 7 étapes d'une action (Norman et Hollnagen, 1986).

La partie de droite correspond à la sphère d'évaluation de l'état actuel et de la situation tandis que la partie gauche correspond à la sphère d'exécution des actions.

Le modèle de Rasmussen (1983, 1986, 1993) décrit le comportement de prise de décision en fonction du contexte et du niveau d'expertise de l'opérateur. Il introduit les 3 niveaux d'expertise proposé par Fitts (1964) et Anderson (1983). Ce modèle introduit un contrôle de l'activité à trois niveaux qui s'applique bien au pilotage :

- le comportement basé sur les automatismes,
- le comportement basé sur les règles,
- le comportement basé sur les connaissances.

Les entrées sensorielles subissent un traitement cognitif, qui varie selon le degré d'expertise de l'opérateur avec des circonstances particulières.

Un mode de base, appelé "**skill-based behavior**", correspondant au comportement où l'opérateur est très expérimenté dans la réalisation de la tâche et qui permet d'effectuer le travail au moindre coût cognitif. Ce niveau de contrôle correspond à la partie du comportement basé sur les automatismes, et permet de libérer des ressources pour des activités plus réfléchies. Les opérateurs n'ont pas besoin d'interpréter ni d'intégrer les indices des actions possibles, mais ils répondent aux indices comme à des signaux qui guident la réponse.

En cas de situation familière, mais sans que l'opérateur en ait une expérience importante, les sujets vont traiter les informations en entrée et mettre en place un comportement basé sur les règles (« rule-based behavior »). Les entrées sont analysées puis mises en relation avec les états typiques du système, qui déclenchent des règles accumulées lors de l'expérience passée (stockée dans la mémoire à long terme de l'opérateur ou écrites dans des procédures formelles). Ces règles entre les indices et les actions appropriées à effectuer sont de type « si-alors ».

Enfin, quand la situation est totalement nouvelle, le pilote ne peut s'appuyer sur des règles pré-acquises au cours de son expérience antérieure, ni de procédures lui permettant une prise de décision. Il doit par conséquent opérer à un niveau basé sur les connaissances (« **knowledge-based behavior**»), fondé essentiellement sur des processus analytiques utilisant des informations conceptuelles. Après que l'opérateur ait attribué une signification aux indices existants et l'ait intégré pour identifier l'état courant, il traite les indices comme des symboles qui relient les buts à un plan d'action.

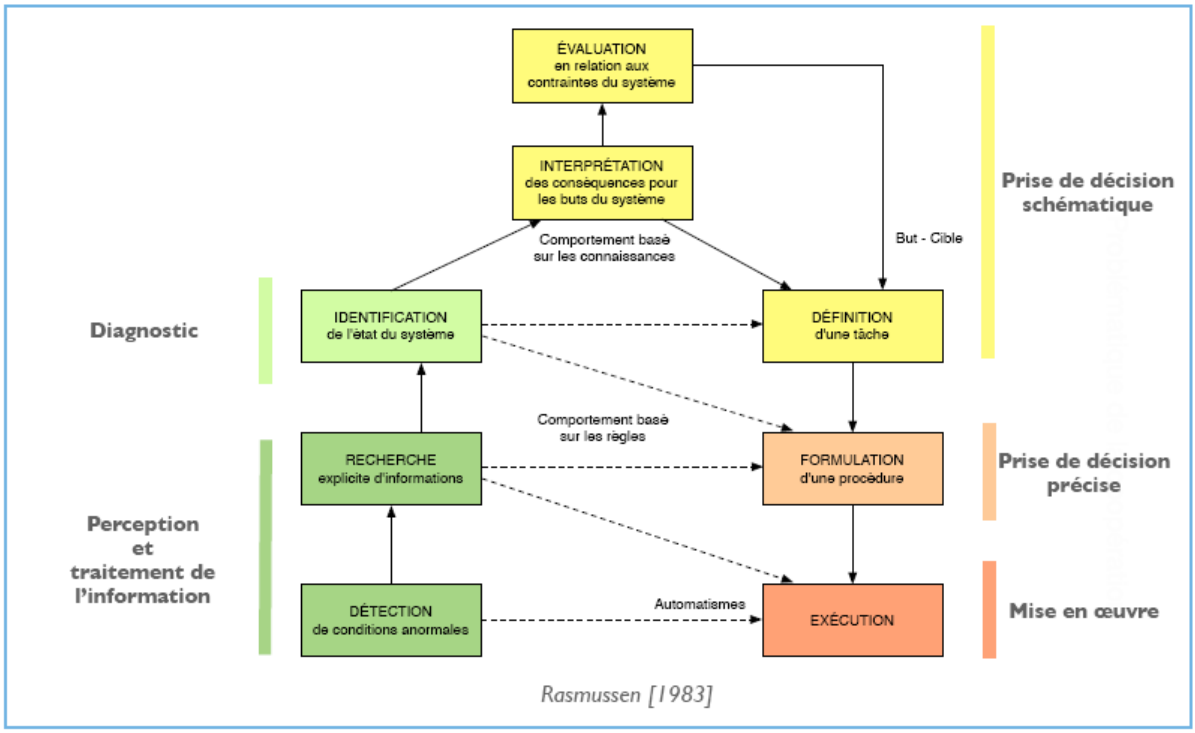


Figure 63 : l'échelle double de Rasmussen

La partie de gauche représente la phase d'analyse de situation et la partie de droite la phase de conception de l'action.

Ce modèle est utilisé dans la prise de décision et les résolutions de problèmes. Dans le second cas, la démarche de diagnostic est sur la partie gauche du modèle tandis que la démarche d'intervention correspond à la partie droite de l'échelle.

En résumé, la décomposition des processus cognitifs, associés à une prise de décision va nous permettre d'identifier les éléments d'informations disponibles, ou de proposer des solutions de conception et méthodologies adaptées.

1.3.2.3. Conclusion sur la CTA

L'analyse cognitive est effectuée en complément de l'analyse des tâches. A partir des missions mises en évidence dans la première partie, nous avons choisi de faire une analyse détaillée de la phase de vol. Pour chaque décision, une analyse des niveaux de traitements des informations est réalisée et formalisée à l'aide des échelles de décision. Cette méthode a pour but d'extraire et d'identifier les besoins en information et en automatisation requis, pour les opérateurs, au cours d'une activité.

1.3.3. Conclusion sur l'analyse des tâches et de l'activité

Ainsi, l'analyse des tâches/activités de l'opérateur nous permet de reprendre en détails la décomposition des actions de l'opérateur, avec l'éclairage notamment du modèle de Rasmussen pour décrire le processus de prise de décision, en s'attachant à identifier quels sont les besoins en informations requis et initier les étapes suivantes de la démarche telles que la spécification des exigences et les propositions de solutions ou d'amélioration d'un système.

2. Approche choisie pour le recueil de l'expertise

2.1. Choix de l'expert

Comme le propose Amalberti et al. (1987), trois critères sont importants pour faire le choix de l'expert. Tout d'abord, le pilote doit être effectivement reconnu comme expert par ses pairs. Il doit être disponible et être volontaire pour participer à l'étude.

2.2. Conduite de l'entretien

Ce choix fait, il est souhaitable d'écrire une lettre de présentation à faire parvenir au pilote afin que celui-ci puisse se faire une idée assez claire de sujet d'intérêt.

Lors de l'entretien, pendant l'introduction, il est utile de lire le texte de présentation et de le commenter, si nécessaire, avec le sujet interrogé. Il ne faut pas oublier de préciser au sujet que l'intérêt de l'entretien porte sur des expériences concrètes, des activités professionnelles vécues. Il est important d'expliquer qu'il s'agit d'un entretien anonyme. Pour effectuer un enregistrement audio de l'entretien, il est nécessaire d'obtenir l'accord du sujet.

L'entretien est conduit en suivant un canevas (tableau 28), et, selon le discours du pilote interroge, il sera adapté : une liste de points à aborder est établi et le pilote est d'abord laissé totalement libre de s'exprimer. Puis, en fonction des points abordés, l'enquêteur pourra être amené à aborder des points présents dans la grille qui n'ont pas été traités par le pilote.

GRILLE DE RECUEIL D ACTIVITE

Contexte/consignes : Il s'agit d'une étude sur le vol de nuit en hélicoptère avec des systèmes de vision nocturne à intensification de lumière. Pour mener cette étude, j'ai un certain nombre de questions à poser, des questions quand même très ouvertes. Alors, vous devez vous sentir complètement libre d'aller plus ou moins loin dans une question, ou de demander de reformuler si la question ne vous paraît pas claire. Le but est d'aller au-delà de la théorie enseignée aux stagiaires pendant leur formation, pour savoir comment les pilotes construisent leur propre représentation de leur environnement.

Objectifs : il s'agit d'une étude sur les représentations que vous vous faites de votre environnement à travers les systèmes de vision nocturne. Le but est de dégager des invariants concernant le pilotage (avoir accès à vos connaissances, vos compétences, en particulier à celles difficilement verbalisables car liées aux habiletés).

A terme, l'idée est de mettre en place une méthodologie d'évaluation des aspects cognitifs de traitements des informations visuelles pour comparer différents systèmes. Pour expliquer simplement, le principe sera de mettre un expert, c'est-à-dire un pilote d'hélicoptère comme vous, dans des situations d'utilisation avec différents dispositifs de vision nocturne. Vous donnerez un avis sur l'utilisation de ces systèmes, l'un par rapport à l'autre, mais aussi par rapport à votre activité vol. Je veux aller plus loin que la lecture de mires qui existe actuellement avec des questions du type :

- Quelles sont les éléments essentiels dans le pilotage, au niveau de l'image IL ?
- Quels repères utilisent-ils pour mener à bien leur mission ?

Ces informations sont destinées à l'établissement d'une méthodologie d'évaluation plus adaptée à vos besoins, ces informations sont à but scientifique principalement pour bien comprendre vos tâches et elles sont strictement anonymes.

Il faut demander au pilote son accord pour l'enregistrement audio. Cet entretien sera ensuite formalisé et retranscrit.

Il faut également faire la demande pour la 2^{e} phase. Après analyse des interviews, il y aura une phase auto-confrontation des pilotes au CR de leur interview (CR papier) et une nouvelle analyse (**méthode du sosie**) *(peut se faire simplement par téléphone pour plus de facilité)*

Grille d'entretien : guide de questions

- Expérience pilote :
  - formation initiale, parcours professionnel ;
  - expérience des différents hélicoptères, …

- Structure d'un vol, un vol type, d'un vol prototypique, générique
  - décollage
  - vol (contour, de transition, etc.)
  - posé, atterrissage

- Facteurs influençant le déroulement d'un vol : les conditions externes
  - grands types de météo qui offrent des caractéristiques nécessitant une expérience différente : humidité, pluie, vent, neige,…
  - visibilité
  - niveau de nuit
  - identification de zones à risque
  - nature du sol : sol informatif et sol non informatif (exemples)

- Décollage :
  - Décollage avec/sans JVN ? Pourquoi ?
  - Quelles priorités données entre vol à vue et instruments ? Pour le vol à vue :

⇒ *Indices utilisés en phase de décollage : quels repères ? (indices statiques vs indices dynamiques)*

- Vol : distinction des différentes phases de vol
  - vol contour
  - vol tactique
  - vol de transition
  - percées opérationnelles

- Quels incidents avez-vous déjà eu lors de l'utilisation de systèmes de JVN ? Quel d'incident peut se produire ?

⇒ *Quels éléments saillants de l'image IL sont utilisés, quels sont ceux qui vont attirer votre attention par rapport à la tâche, qui vous permettent de vous guider et de prendre telle ou telle décision ? Quelles sont les informations fournies par le système qui sont réellement utiles pour vous, pour accomplir vos missions ?*

⇒ *Quelle est la distance utile de ces repères que vous utilisez selon les différentes phases de vol ?*

⇒ *Quelles sont les difficultés que vous rencontrez habituellement par l'utilisation des JVN ?*

Indices :

- statiques (indice qui ne se déplace pas) vs dynamiques (indice qui se déplace dans l'espace)
- permanents (indice affiché en permanence) vs temporaires (indice affiché à un instant donné pendant un temps déterminé)
- passifs (indice qui ne change pas de forme) vs actifs (indice qui change de forme)

Tableau 28 : grille de recueil d'activité et guide d'entretien

Il s'agit de celle utilisée pour les entretiens semi-directifs menés auprès des pilotes experts dans l'utilisation des systèmes d'aide à la vision nocturne

2.3.Approche choisie

La méthode d'analyse qui a été choisie est un recueil d'expertise portant sur des vols avec des DVN. Elle implique une analyse détaillée de la « connaissance » et du « raisonnement » des pilotes d'hélicoptères. Largement utilisé aux Etats-Unis, ce type de démarche constitue une « **mise à plat de l'expertise »** (expert elicitation) (Amalberti, Valot et Menu, 1987). Elle correspond au second type de finalités présentées dans les rappels théoriques. Dans le cadre de notre travail, seuls deux pilotes instructeurs, spécialisés dans l'entraînement à l'utilisation des DVN ont participé au recueil d'expertise. Comme indiqué précédemment, cette démarche a pour but essentiel de comprendre les mécanismes de traitement cognitif mis en jeu par l'expert pour mener à bien sa tâche. La mise à plat de l'expertise suivie de formalisation des données recueillies rend compte du savoir-faire et non uniquement des connaissances.

Dans une première phase, un balayage systématique des connaissances de l'expert a été réalisé. Au cours d'un second entretien, la démarche a été d'établir le lien entre ces connaissances et la mission. L'objectif est de mettre en évidence les connaissances qui sont en lien direct avec la réalisation de la tâche.

Dans le cadre du développement et la mise en place de la méthodologie d'évaluation des DVN, ce sont des **entretiens semi-directifs** qui ont été menés.

3. Conduite du recueil d'expertise

Les entretiens se sont déroulés le 9 juillet 2007, à la Brigade JVN de l'Ecole d'Application de l'Aviation Légère de l'Armée de Terre (EA-ALAT). Les deux pilotes interrogés sont pilotes instructeurs de l'école. Le tableau 29 résume l'expérience professionnelle de ces deux pilotes.

	Pilote 1	Pilote 2
Heures de vol	5500h	2800h
Heures de vol sous JVN	2300h en 12 ans dont 2 ans complet à Djibouti	1100h
Types d'appareil	Gazelle, Feneck, Puma	Alouette, Gazelle, Feneck

Tableau 29 : expérience des pilotes interrogés pour les entretiens

Pour chaque pilote, l'entretien est enregistré afin d'être retranscrit par la suite. Comme indiqué sur la grille d'entretien (tableau 28), l'entretien commence au préalable par la présentation du contexte et des objectifs de l'étude réalisée. Ensuite, l'entretien enregistré est réalisé selon la grille de recueil d'activité (décrite dans le tableau 28). Les différentes phases

de vol sont explorées afin de déterminer pour chaque phase les indices visuels utilisés par le pilote. Les entretiens ont approximativement duré 2h pour le pilote 1 et 1h30 pour le pilote 2.
A la suite de ces entretiens, il m'a été donné d'effectuer un vol de nuit en place arrière d'un hélicoptère Gazelle. Equipée pour l'occasion dune paire de Jumelles de Vision Nocturne, ce vol m'a permis d'appréhender de manière pratique les difficultés de perception pour les pilotes d'hélicoptères..
Après retranscription de ces entretiens par écrit, il est apparu trop coûteux en temps pour les uns et les autres de rencontrer à nouveau physiquement les pilotes à l'EA-ALAT. Il a donc été choisi de faire le second entretien, l'auto-confrontation, en audio conférence. Pour cela, nous avons d'abord envoyé la retranscription des entretiens effectués aux pilotes, de façon à permettre une relecture avant la phase d'auto-confrontation. Ils ont ainsi pu réfléchir à leur discours et aux compléments et/ou modifications qu'ils pouvaient y apporter. Les points qui soulevaient des questionnements pour établir des liens entre les connaissances et les missions ont également été listés.
Un entretien complémentaire a, par la suite, été réalisé avec un conseiller opérationnel de THALES, ancien pilote d'hélicoptère de l'ALAT (tableau 30).

	Pilote 3
Heures de vol	1500h (9 ans)
Heures de vol sous JVN	200h dont 2/3 en Afrique (Gabon, Cameroun)
Types d'appareil	Gazelle, Puma, Cougar

Tableau 30 : expérience du pilote interrogé pour l'entretien complémentaire

4. Résultats des entretiens

Le but de ces entretiens est de mettre en place des scénarii représentatifs de la réalité opérationnelle des pilotes d'hélicoptères utilisant des DVN permettant d'appréhender les dimensions cognitives.
Nous avons d'abord fait une analyse la plus exhaustive possible décomposée en deux parties. Par recoupement inter entretiens, nous avons identifié :

- l'organisation générale d'un vol sous DVN ;
- les facteurs qui modifient la perception des indices visuels sélectionnés et figurés dans les images de différents capteurs.

Dans une seconde partie, nous présentons une synthèse en fonction du poids des informations par rapport à notre objectif de mettre en place des scénarii représentatifs de l'activité de pilotage sous DVN.

4.1. Retour d'expertise

4.1.1. L'organisation du vol sous DVN

Briefing, préparation de la mission

- préparation des trajectoires, des plans de vol
- état de la machine
- briefing mécanique
- identification des cas non conformes : météo, zone de poser
- retour mécanique

Décollage

- préparation des JVN avant le décollage sur le parking
- demande à la tour de couper toute lumière
- vol à vue confirmé par les instruments
- prise de repères : dans l'axe et en travers (hangar, traces sur la piste, piste…)
- poinçonner la machine
- mise en stationnaire
- contrôle de la sonde
- sensations différentes → prendre de bons repères, balayer tout le temps pour contrer ses sensations faussées

Tenue d'allures : Transit

- définies par une vitesse et une hauteur au sol minimales à tenir : 3e allure, 2e allure, 1e allure (distance minimale du sol : 50m), allure de combat (spécificité Viviane, avec caméra FLIR)
- vol au-dessus des obstacles
- plus l'hélicoptère vole haut, plus le champ visuel couvert est grand → rythme du balayage diminue

- évolution en fonction du terrain (relief ou non, …)
- observation, check au niveau des instruments, …
- Approche en zone : on cherche à détecter les obstacles (câbles électriques, poteaux, …)

Poser

- RPAP (procédure de posé de nuit) :

  identification des obstacles, de la texture du sol, du relief,…

  création d'un volume d'évolution

  choix d'un axe à partir du vent, de l'éclairement, de la nuisance et du terrain

- arrêt à 10m pour éclairer les derniers obstacles

Débriefing

4.1.2. Les facteurs contextuels et d'influence des capteurs IL

4.1.2.1. Les niveaux de nuit

Ils sont déterminés avec l'expérience et surtout à l'aide d'un logiciel. Ils constituent un facteur d'influence essentiel pour les DVN.

- Niveaux de nuit
- influencés par :
  - position de la lune,
  - présence de sources lumineuses ou non,
  - conditions météorologiques
- crée des images floues, perte d'une bonne visibilité
- plus le niveau de nuit est important, plus la perception de contraste est difficile sous JVN
- perturbe la perception des distances

4.1.2.2. La météorologie

Atmosphère humide : possibilité de voler mais gênant

- création de halo lumineux, très gênant en JVN, diminution de la vision

Givrage, pluie verglaçante :

- invisible sous JVN : on ne le voit que parce que les autres appareils « brillent »

Neige : possibilité de voler (lorsqu'il a déjà neigé) mais interdit par la législation ALAT

- plus de repères au sol → terrain non informatif → le pilote doit se créer des nouvelles références
- impossibilité de voir les mouvements de l'appareil
- soulèvement de poussière dû au rotor → perte de visibilité

Vent : gênant pour le confort du pilotage. En vent fort, on ne vole pas

- il crée des illusions sensorielles sous JVN
- soulèvement de poussière dû au rotor → perte de visibilité

4.1.2.3. Types de terrain

Montagne : difficulté à percevoir le dévers et le relief

Champs :

- problème de perception de la hauteur de l'herbe → handicapant pour le posé
- création de repères par le pilote le plus souvent au bord du champ → repérer le champ par rapport à son environnement

Déserts : difficultés dans la perception des contrastes sous JVN donc difficultés dans la perception des dunes, des reliefs,…

Zone poussiéreuse : attention au posé → perte de visibilité par soulèvement de celle-ci

4.1.2.4. Terrains équipés/non équipés ou informatif/non informatif

Terrains équipés ou informatifs

- le pilote connaît ce terrain
- présence d'une piste
- présence de repères exploitables sous JVN (marquage au sol, contraste marqué, …)
- exemples : champ connu par le pilote, aérodrome, aéroport

Terrains non équipés ou non informatifs

- Terrain préparé : mise en place de repères par les OMB sur les lieux, rapport sur les conditions de poser et météo
- Terrain non préparé :

- aucun repère
- le pilote doit déterminer tous les paramètres (vent, altitude, dévers, …)
- le pilote doit se fabriquer des repères pour pouvoir poser, création de ses axes de posé, faire attention à la végétation, aux poteaux électriques…
- exemples: désert, mer, forêt, …

4.1.3. Zones à risques

- zones montagneuses accompagnées de vent
- zones enneigées
- mer
- désert
- zones poussiéreuses

4.1.4. Indices d'aide à la reconnaissance des objets en IL

4.1.4.1. Les poteaux/câbles électriques

Les pilotes savent que les lignes de plus de 100m de hauteur sont signalées sur leur carte donc celles ci sont repérées et sans danger pour eux. Ce sont celles de moins de 100m qui sont à repérer. Les fils ne sont pas visibles sous DVN sauf par nuit très claire.

Par conséquent, le pilote va exploiter et extrapoler ses connaissances en faisant de la déduction logique. Il peut modifier sa position pour faire apparaître le fil en modifiant le contraste. Il peut aussi déduire de l'existence de routes éclairées ou de la présence de maisons isolées la présence de lignes à proximités.

Description	- alignement de poteaux → câble électrique - poteaux isolés - différentes hauteurs = différents type de poteaux (électriques, téléphone, …)
Apparence DVN	- visibilité des câbles presque nulle - trace des lignes par les saignées, les routes, les maisons, … - recherche des lignes autour des poteaux électriques

4.1.4.2. Les champs

Les pilotes utilisent souvent les champs comme zone de posé, généralement quand ce sont des terrains équipés ou informatifs. Les champs les plus informatifs sont très contrastés car ils possèdent plus d'informations en particulier sur le défilement, ce qui est le cas si on compare un champ fraîchement labouré (qui apparaît foncé avec des tâches claires correspondants à des bottes d'herbes retournées dans le champ de terre marron) par rapport à un champ cultivé (qui apparaît clair).

Description	- présence de dévers ou non, de trous, de bosses → surface plus ou moins plane - taille variable, bordés de différents éléments - cultivé, labouré ou non - végétation, vie, habitation, …
Apparence DVN	- analyse de la végétation : herbes hautes gênantes, … - champ labouré apparaît plus clair, s'aider des différences de contrastes sur le champ pour poser - prendre des repères sur les bords du champ, positionner le champ par rapport à son environnement

4.1.4.3. La végétation

Certains pilotes sont capables de reconnaître le type d'arbre sous DVN, c'est-à-dire de différencier un résineux d'un peuplier en fonction du contraste qui est différent.
Il faut faire très attention aux arbres morts et aux branches mortes qui ne reflètent plus la lumière car il n'y a plus de sève. Ils peuvent constituer des dangers mortels non visibles en vol.

Description	- différents types - différentes tailles
Apparence DVN	- indices de forme - indices de contraste (selon le type de l'arbre)

4.1.4.4.Les montagnes

Les pilotes utilisent les différences de contraste pour percevoir les différences de relief. Pour les nuits claires, ils utilisent les ombres comme indices de perception. Par contre, en dessous de 10-15m du sol, les petits reliefs sont difficiles à percevoir.

Description	- relief variable - taille variable - présence de végétation ou non
Apparence DVN	- distinction du relief à l'aide des contrastes des JVN

4.1.4.5. Les véhicules et axes routiers

Les sources lumineuses des routes (lampadaires) ou les véhicules peuvent être gênants pour les pilotes car elles saturent les DVN. Cependant, les routes et surtout les points lumineux caractéristiques d'une route peuvent servir de point de repère. Si une route est non éclairée, un véhicule en déplacement sur cette route permettra de la repérer.

Description	Véhicules : taille variable lumineux Axes routiers : Taille variable (routes, autoroutes, chemins, …) Croisements Constitution : terre, asphalte, …
Apparence DVN	- routes pas visibles sous JVN → distinction grâce aux voitures qui roulent dessus - distinction sens de départ d'une voiture grâce à ses feux - axe routiers permettent de situer des lignes électriques

4.1.4.6. Les surfaces d'eau

Description	- taille variable - peu de repères sur la surface de l'eau
Apparence DVN	- végétation au bord avec des contrastes différents - air du rotor crée des mouvements sur l'eau → déstabilisant sous JVN - possibilité de reflets de la lumière - un lac sous JVN peut ressembler à un champ

4.1.5. Les JVN

Avantages	- le domaine de sensibilité des JVN (600-950 nm) est différent du domaine de l'œil (400-750 nm) → perception de nuit
Inconvénients	- difficulté de perception des distances - difficulté de perception du relief - difficulté de perception des contrastes - difficulté perception du défilement - réduction du champ de vision → balayage trop important - images différentes dans les 2 objectifs (même image mais décalée) → problèmes pour percevoir l'environnement en dessous de 7m = pas de réelle vision stéréoscopique - des informations visuelles ne sont pas accessibles avec les DVN → le pilote doit « interpréter » ce qu'il arrive à voir pour ensuite se recrée une image proche de la réalité

4.2. Organisation de l'expertise

L'objet de notre étude est de capturer auprès des opérateurs de systèmes de vision nocturne, les objectifs et leurs enjeux globaux de leurs missions, en faisant abstraction de l'architecture et des interfaces utilisées dans le cockpit. Pour cela, il faut spécifier avec les utilisateurs le besoin opérationnel et préciser, plus particulièrement, le contexte et les contraintes d'application par rapport à la problématique d'intérêt.

Ainsi, dans le cadre du développement de la méthodologie d'évaluation des aspects cognitifs, les méthodes et outils suivants ont été utilisés :

- l'analyse hiérarchique des tâches (HTA), qui est une approche d'analyse largement répandue ;
- l'analyse cognitive des tâches (CTA), qui vise à approfondir l'analyse des tâches pour comprendre et mettre en évidence les processus cognitifs impliqués.

Ces deux approches ont été choisies du fait qu'elles sont assez couramment utilisées dans un contexte de développement expérimental. La première vise à représenter les tâches effectives en décrivant quelles actions doivent être effectuées par l'opérateur avec le système ; quant à la deuxième, elle représente comment l'operateur arrive à réaliser ses actions.

Une difficulté est d'assurer la cohérence dans l'utilisation et les produits de ces différents moyens complémentaires au cours de la démarche de conception; c'est certainement là une motivation essentielle pour établir un cadre méthodologique tel que celui qui est proposé dans ce rapport.

4.2.1. Analyse hiérarchique des tâches (HTA)

Les graphiques HTA peuvent aisément être construits avec des outils logiciels courants. Nous avons fait le choix d'utiliser KMADe (Kernel of Model for Activity Description environment). Il est basé sur le modèle N-MDA (Noyau du Mod7le de Description de l'Activité) (Lucquiaud et al., 2002 ; Lucquiaud, 2005a ; Lucquiaud, 2005b). Ce logiciel permet de représenter l'activité de l'opérateur sous forme d'arbres des tâches, du plus général au plus détaillé.

L'avantage de ce logiciel est qu'il permet de préciser si la tâche est réalisée par l'opérateur, par l'interface, en coopération par les deux. Il est possible de caractérisée les modalités, les utilisateurs associés à la tâche, le niveau d'importance, la fréquence, etc.

D'après les entretiens, la décomposition a été réalisée comme suit. Un diagramme HTA limité au troisième niveau de décomposition est fourni ci-dessous pour notre cas d'étude (figure 64).

Nous avons sélectionné, pour notre méthodologie, de nous intéresser aux tâches N.2.2 « vol » (figure 65) et N.2.3 « poser » (figure 66). Pour chacune de ces sous-tâches, une nouvelle décomposition a été faite, pour avoir les tâches plus élémentaires, comme indiqué dans les figures ci-dessous.

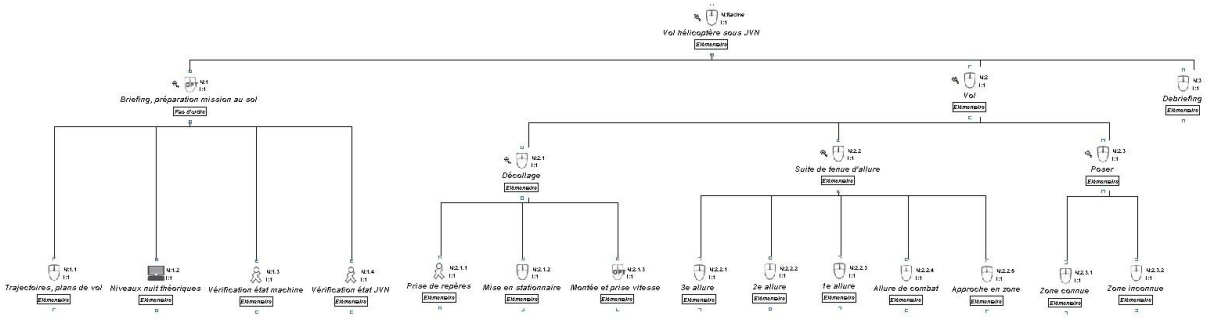


Figure 64 : diagramme HTA de haut niveau

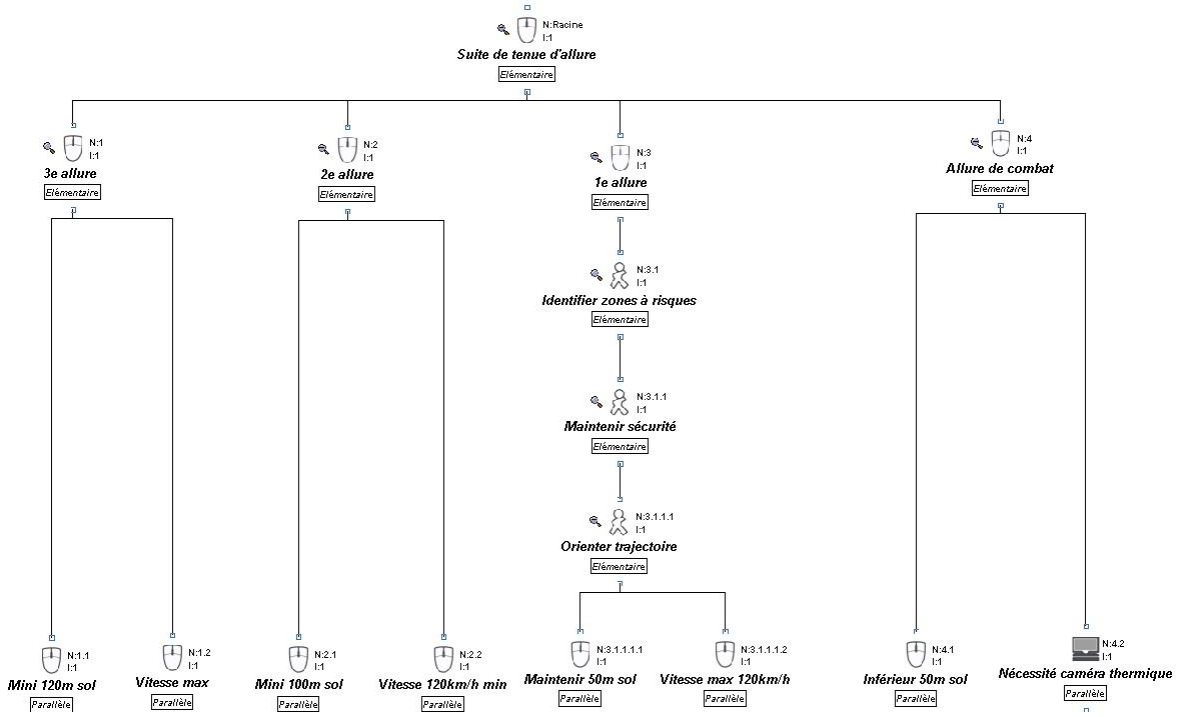


Figure 65 : diagramme HTA de la tâche N.2.2 « suite de tenue d'allures » (vol)

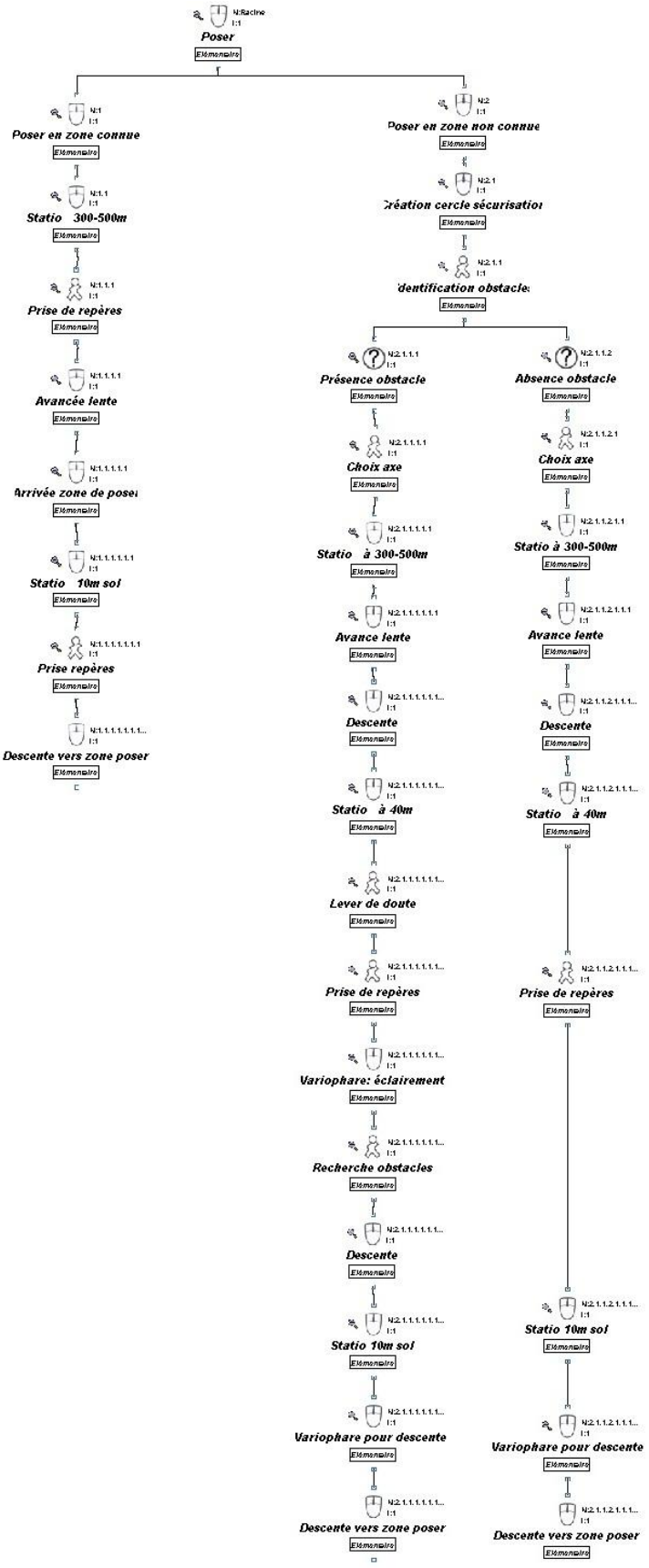


Figure 66 : diagramme HTA de la tâche N.2.3 "se poser"

4.2.2.Analyse cognitive des tâches (CTA)

En complément de cette analyse de tâche, il s'agit de comprendre comment ces tâches sont effectuées par l'opérateur, quelles sont les prises de décision nécessaires pour réaliser l'action et quels sont les indices qui sont utiles à la réalisation de ces tâches.

L'analyse cognitive des tâches permet de renseigner ces aspects. Nous avons défini les tâches opérationnelles les plus pertinentes pour évaluer différents systèmes de vision nocturne. Ces tâches opérationnelles dépendent de facteurs d'influence que nous avons aussi identifié et que nous avons choisi de prendre en compte ou non pour des raisons techniques ou d'incidence (facteurs principaux ou secondaires).

Pour cela, à partir de la décomposition des tâches N.2.2 « vol » et N.2.3 « poser », nous avons appliqué la méthode CTA qui permet d'intégrer à ces tâches les différentes prises de décision nécessaires pour permettre à l'opérateur d'effectuer sa tâche.

Pour la tâche « se poser », une analyse détaillée de chaque décision critique est réalisée et formalisée à l'aide des échelles de décision (basées sur le modèle de Rasmussen) (figure 67).

Dans ce diagramme, les étapes successives pour la prise de décision sont représentées. Les rectangles représentent les activités de traitement de l'information mis en œuvre, et les cercles représentent les états de connaissances qui résultent du traitement. Sur cette base, et à partir des retours des opérateurs, une première définition des besoins en informations pour faciliter l'activité de l'opérateur a pu être proposée (rectangles marrons-orangés).

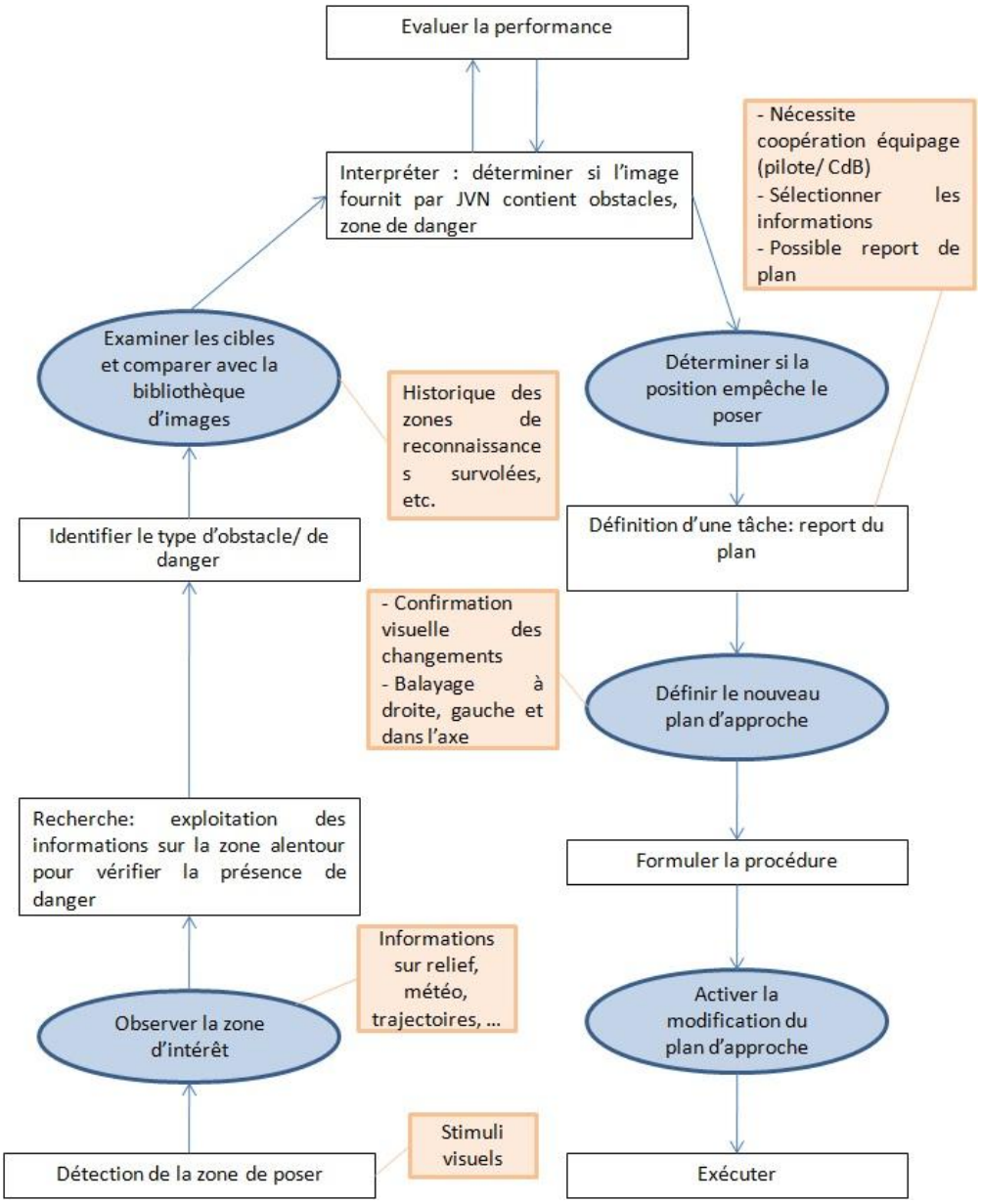


Figure 67 : besoins en informations sur l'échelle de décision pour la tâche "se poser"

4.2.3. Conclusion

Cette approche de l'analyse des tâches et des activités de l'opérateur a permis de reprendre en détail la décomposition des actions des pilotes d'hélicoptères et d'identifier quels sont les besoins en informations requis, servant de point d'entrée pour les étapes de définition des exigences pour les scénarii opérationnels utilisés dans notre méthodologie.

A partir d'entretiens réalisés avec deux pilotes-instructeurs, utilisateurs de DVN, nous avons porté notre attention sur les tâches de vol et de poser que nous avons décomposé en sous-tâches. Nous avons ainsi déterminé les stimuli visuels importants, au cours de ces phases de

pilotage, notamment les facteurs contraste, contenu en fréquences spatiales et niveau de nuit. Nous avons aussi identifié sept scénarii opérationnels, c'est-à-dire des scènes représentatives des activités quotidiennes. Ces scénarii sont implémentés dans une application logicielle permettant de les « jouer » et les tester par des phases d'évaluation et d'expérimentation.

- CHAPITRE 2 -

SIMULATION DE VOL EN VISION NOCTURNE

L'analyse des entretiens menés avec les deux pilotes instructeurs ont permis de dégager des situations typiques de l'activité des pilotes d'hélicoptères en vol de nuit avec des DVN. A partir des données, différents scénarii ont été élaborés orientés sur la recherche de métriques adaptés (prise de décision, détection, reconnaissance d'éléments dans une scène, mouvement d'évitement,…). Tous les scénarii retenus ont été validés et consolidés par un pilote expert, conseiller opérationnel pour Thales. Pour mettre en œuvre ces scénarii, il a été initialement choisi de faire développer une application spécifique à notre besoin par une société de prestation, plutôt que d'utiliser des outils existants.

Les différents scénarii proposés ainsi que les liens entre les scénarii et la fonction de Détection-Reconnaissance-Identification (DRI) seront d'abord présentés. Puis, dans une seconde partie, le cahier des charges de l'application informatique initialement envisagée sera exposé.

1. Définition des scenarii et des tâches

Les variations proposées ont pour objectif d'éviter l'effet d'apprentissage des scènes, afin que les sujets ne puissent mémoriser la position de(s) objet(s) d'intérêt, ce qui pourrait fausser les réponses pour les présentations suivantes de la même scène.

1.1. Lien avec la fonction Détection, Reconnaissance et Identification

Les situations issues des entretiens sont analysées et abordées parfois différemment par les experts, en fonction de leurs stratégies cognitives. Dans tous les cas, ces situations, font appel à une fonction classiquement dite « DRI » (détection D, identification I, reconnaissance R, prise de décision PD). Ces éléments permettent ensuite aux experts de prendre les décisions requises pour leurs tâches de vol.

La détection s'établit à très grande distance et le pilote ne dispose donc que de quelques informations représentées par un petit nombre de pixels sur l'ensemble de son champ de vision. Cette étape consiste à trouver les images cibles dans l'environnement, sans pour autant en préciser la classe ni le nom.

La reconnaissance permet au pilote de fournir une description plus précise de la cible et de son environnement. L'observation est plus ciblée et des paramètres descriptifs permettent d'affiner la reconnaissance en précisant une classe d'objet.
La phase d'identification correspond à la dernière phase du processus d'analyse par le pilote. L'observation et les informations doivent être significatives pour permettre de nommer l'objet.
Ces différentes phases de traitement de l'information effectuées par le pilote sont une aide à la prise de décision pour mener à bien les tâches requises. Ces différents types de tâches sont utilisés dans les scénarii mis en place pour les évaluations. Initialement, sept scénarii ont été retenus pour la conduite des expérimentations sur la mise au point de la méthodologie cognitive. Les tableaux suivants résument les caractéristiques des différents scénarii et les solutions retenues.

1.2. Scénario 1 : détection d'une bosse

But	détecter une bosse au milieu d'un champ qui empêche le poser le pilote détecte la bosse → 1 clic le pilote engage un mouvement pour se diriger vers la bosse →1 clic
Variations	décalage de la bosse de 30m à droite, au centre et à gauche
Difficultés	bosse plus difficile à détecter qu'un fossé sous JVN une bosse de 1m sur 2m de diamètre → impossible de poser déplacer la bosse dans la clairière → problème de la taille de la bosse en fonction de la taille du rotor
Améliorations	remplacer la bosse par un rocher mettre des distracteurs en plus de la bosse : bois dense autour du champ rendre l'objet le moins visible possible par sa taille, les contrastes, sa forme … faire commencer le scénario à 50m, angle d'approche de 45°

1.3. Scénario 2 : saut de haie

But	pendant un suivi de contour, détecter et sauter une haie en gardant le même delta de hauteur le pilote détecte la haie → 1 clic le pilote est à une distance prescrite de la haie, il doit initier le saut de haie → 1 clic
Variations	non définies

Difficultés	éviter que le pilote ne voie la haie tout de suite
Améliorations	vol à 30m au départ relief assez plat et présence d'une haie haie d'arbres de 10/15m, cela oblige le pilote à passer au-dessus manœuvre doit commencer 100m avant la haie

1.4. Scénario 3 : tâche de discrimination entre une voiture et une maison

But	distinguer un objet lumineux mobile d'un objet lumineux fixe le pilote détecte l'objet mobile → 1 clic
Variations	faire varier le côté d'où arrive l'objet mobile faire varier le sens de déplacement du véhicule
Difficultés	ce sont les points lumineux qui vont surtout attirer l'œil mais pas le type de l'objet
Améliorations	l'objet mobile ne doit pas avoir une trop grande vitesse : le char d'assaut est un bon exemple (vitesse d'environ 10 km/h) l'expérience doit se faire dans une fenêtre de décision : un bip qui indique à partir de quel moment il peut détecter l'objet mobile et un bip de fin

1.5. Scénario 4 : atterrissage sur une aire de posé

But	l'écartement des balises crée une illusion d'optique et permet de distinguer le dévers le pilote détecte et indique le dévers → 1 clic sur flèche pour indiquer l'orientation
Variations	faire varier le sens du dévers de la zone de posée
Difficultés	simulation du dévers fondée sur la représentation de balises spécifiques pour JVN
Améliorations	présence d'un « T » JVN sur une zone avec un dévers créer une « chin window » pour que le pilote regarde vers le bas → avoir les références axiales et latérales

1.6. Scénario 5 : recherche de trajectoire au milieu d'un environnement montagneux

But	détecter une trajectoire dans un environnement montagneux en fonction de la position des montagnes le pilote détecte la position des montagnes → 1 clic le pilote initie la manœuvre →1 clic
Variations	variation : inverser la position des montagnes
Difficultés	aucune
Améliorations	vol de 3ème allure ou moins paysage de montagne dans le fond montagnes ne doivent pas être uniformes (aspects, taille)

1.7. Scénario 6 : détection de poteaux électriques formation en serpent

But	détecter ces lignes pour les éviter
Variations	à élaborer
Difficultés	aucune
Améliorations	1ère allure, 50m sol pylônes et lignes électriques à la même hauteur

1.8. Scénario 7 : perte de sécurité

But	en condition de vol stationnaire, le pilote doit percevoir l'apparition d'une translation
Variations	appliquer une translation à l'arrière de l 'hélico pour simuler une perte de stabilité
Difficultés	le pilote n'arrive pas à percevoir les mouvements de l'herbe et donc peut perdre ses références
Améliorations	champ d'herbe + 1 rocher

2. Application logicielle

2.1. Général

L'application demandée est un logiciel de visualisation d'un environnement complexe en vision nocturne et avec filtre IL (figure 68). Cette application est programmée pour :

- simuler un environnement 3D, rendu en modalité de vision nocturne et de filtre IL ;

- exécuter différents scénarii d'exploration et de tâches dans cet environnement (type vol en hélicoptère) ;
- évaluer des capacités cognitives des sujets soumis à ces scénarii et récupérer leurs performances à la tâche.

Les TRAVAUX et PRESTATIONS DEMANDEES sont :	
1	La simulation de l'effet d'un filtre IL à partir d'une reproduction d'images de vision nocturne IL
2	La manipulation de 4 paramètres de filtre IL permettant d'obtenir plusieurs modalités d'application du filtre IL ;
3	La simulation d'un environnement 3D complexe correspondant à un terrain opérationnel type paysage mixte (montagne, plaine, milieu urbain) en vision nocturne.
4	L'application temps réel du filtre IL sur l'environnement simulé et l'exploitation des effets des paramètres du filtre IL sur cet environnement. Le réglage de ces paramètres en temps réel et en cours de passation n'est pas géré.
5	Le développement de l'exécution en temps réel de plusieurs scénarii, c'est à dire les tâches que doivent réaliser les sujets dans l'environnement filtré IL. Ces scénarii impliquent la mise en jeu d'un environnement d'hélicoptère (cockpit et déplacements).
6	La récupération des données en entrée / en sortie sur chaque passation de test.
7	Une interface ergonomique et fonctionnalités adaptées.

Figure 68 : liste des prestations demandées dans le cahier des charges de l'application

2.2. Filtres

2.2.1. Définition du filtre IL

La construction de la vision IL (= filtre) s'effectue à base d'interprétation et de reproduction d'images IL fournies par le Laboratoire EA 487/ IdC/ UB2 et THAV. Aucune modélisation des lois mathématiques « d'amplification des photons » n'est demandée. Le filtre IL simulé doit se présenter sous un dégradé de vert.

L'intensification de lumière est une technologie qui dépend du niveau de luminosité ambiante. La quantité de lumière présente dans l'environnement de travail du pilote pouvant varier selon les zones de vol et selon les jours, une classification du niveau de nuit a été établie (figure 69).

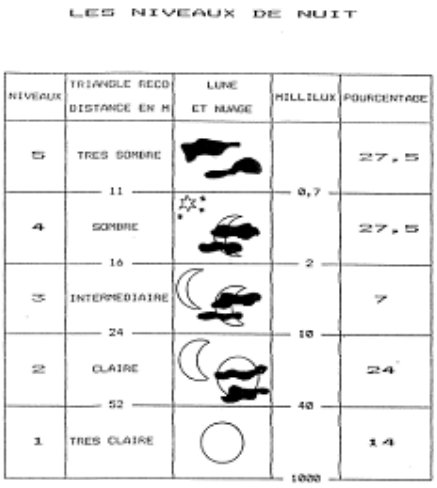


Figure 69 : classification des niveaux de nuit

Cette classification est donnée à titre indicatif afin de bien comprendre le principe de fonctionnement des niveaux de nuit.

Plus la nuit est claire (beaucoup de lumière), plus le bruit est faible car le signal n'a pas besoin d'être beaucoup amplifié. Plus la nuit est sombre (peu de lumière), plus le bruit est important que l'amplification est maximale.

2.2.2. Définition des paramètres du filtre

Ce logiciel doit permettre de manipuler, en simulation, quatre paramètres physiques de la vision sous DVN : le contraste, la luminance, le bruit et le contenu en fréquences spatiales (ou contenu fréquentiel). Il s'agit de permettre la simulation de plusieurs conditions de visualisation nocturne avec des tubes IL. Ces modalités de visualisation simulées par le filtre IL doivent impérativement être constituées d'un dégradé de vert.

Les modalités des effets de ces 4 paramètres sur le filtre sont définies de la façon suivante :

- pour le **contraste** : une variation discontinue définie sur une échelle de 1 à 10. Le niveau de contraste le plus grand correspond au maximum de contraste et le niveau le plus bas au minimum de contraste
- pour la **luminance** : une variation discontinue définie sur une échelle de 1 à 10. La nuit 1 correspond au niveau de luminance le plus grand (la nuit la plus claire) et la nuit 5 au niveau de luminance le plus faible (nuit la plus sombre). La variation discontinue devra être représentative des différentes nuits (de 1, 2, 3, 4 et 5).
- pour le **bruit** : une variation discontinue définie sur une échelle de 1 à 10. La nuit 1 correspond au niveau de bruit le plus faible et la nuit 5 au niveau de bruit le plus important. La variation du bruit est inverse de celle de la luminance.
- pour le **contenu fréquentiel** : une variation discontinue définie sur une échelle de 1 à 3. Le niveau 1 correspondra aux basses fréquences (BFS), le niveau 2 aux moyennes fréquences spatiales (MFS) et le niveau 3 aux hautes fréquences spatiales (HFS).

Les effets indépendants et/ou covariants des quatre paramètres sur le filtre (contraste, luminance, bruit et contenu fréquentiel) devront être précisés par les lois mathématiques si elles existent. Il est stipulé que les effets indépendants et/ou conjugués des quatre paramètres sur le filtre IL seront estimés uniquement sur la base des analyses des images et des animations fournies.

2.3. Récupération des données

Le logiciel doit permettre une récupération des données paramétrées en entrée (INPUT) et des données mesurées en sortie (OUTPUT). La liste des données à récupérer et à traiter est définie dans les parties **b** et **e** qui suivent. La visualisation de ces données est demandée sous forme de « fichier résumé » et de fichier compatible avec Excel relatant l'ensemble des données demandées.

2.3.1. Gestion des paramètres d'entrée

<table>
<tr><td></td><td>Version a</td><td>Version b</td><td>Version c</td></tr>
<tr><td>Passe 1 : bosse</td><td>Bosse à droite</td><td>Bosse dans l'axe</td><td>Bosse à gauche</td></tr>
<tr><td>Passe 2 : saut de haie</td><td colspan="3">trajectoire d'approche</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Passe 3 : objet fixe vs objet mobile</td><td colspan="3">trajectoire de déplacement</td></tr>
<tr><td>déplacement dans l'axe des halos</td><td>déplacement perpendiculaire aux halos</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">vitesse de déplacement de l'objet mobile</td></tr>
<tr><td>placé à droite de l'objet fixe</td><td>à gauche (P3b) de l'objet fixe</td><td></td></tr>
<tr><td>Passe 4 : atterrissage sur zone T</td><td>zone d'atterrissage à droite de l'axe d'arrivée</td><td>zone d'atterrissage à droite dans l'axe d'arrivée</td><td>zone d'atterrissage à gauche de l'axe</td></tr>
<tr><td>Passe 5 : trajectoire dans zone montagneuse</td><td colspan="3">trajectoire d'approche</td></tr>
<tr><td>Passe 6 : recherche de sécurité en situation de nuage de poussière, glissement hélicoptère vers l'arrière</td><td colspan="3">départ du glissement à un moment différent</td></tr>
<tr><td>Passe 7 : lignes HT</td><td>trajectoire de déplacement dans l'axe des lignes</td><td>trajectoire de déplacement perpendiculaire aux lignes</td><td></td></tr>
</table>

Tableau 31 : tableau des scénarii incluant les dénominations et les variations proposées

Les paramètres gérés en entrée (tableau 31) de l'application logicielle sont :

- les caractéristiques du sujet (âge, sexe, expérience, acuité visuelle, numéro du sujet) ;
- les paramètres du filtre (valeurs de contraste, de luminance, de bruit et de contenu fréquentiel) ;
- la passation du test (une fiche par sujet en prévoyant de pouvoir revenir) ;
- les caractéristiques des scénarii ou passes (P) : organisation en bloc (blocs A, B, C ou D) et en rang de séquence (Sq) c'est-à-dire la position de la passe dans le bloc et/ou la totalité des passes testées (par exemple, la passe P7 pourra être au rang Sq1 ou Sq6).

2.3.2. Format de présentation et de restitution des paramètres d'entrée

Les données à restituer sont les numéros du sujet (S), de la séquence (Sq), du bloc (A, B, C ou D), de la passe (P), des paramètres de luminance, contraste, bruit, contenu fréquentiel et des caractéristiques du sujet.
Les données seront restituées dans un fichier final compatible à la récupération sous Excel.

2.3.3. Gestion des paramètres on-line

Les paramètres gérés « on-line » sont les déplacements et le nombre d'appel à la carte 2D par passe.
Les déplacements comprennent la vitesse (elle sera précisée pour chaque passe dans un autre cahier des charges), le temps de réponse par rapport au début du scénario et la distance de la réponse/cible (elle sera déduite par une formule mathématique à partir de la vitesse et du temps de réponse).

2.3.4. Gestion et restitution des paramètres de sortie

Les paramètres de sortie à gérer et à restituer sont les réponses des pilotes (appuis, temps de réponse et nombre d'appels à la carte 2D) des statistiques descriptives (moyenne M, variance σ^2 et écart-type σ par sujet, niveau de luminance, niveau de contraste, niveau de bruit et niveau de contenu fréquentiel).

2.3.5. Format de présentation des paramètres de sortie

Les données seront restituées dans un fichier compatible avec Excel et elles viendront s'ajouter aux données d'entrée restituées dans ce tableau. Les données restituées dans ce tableau sont les suivantes :

- distance de la réponse/cible ;

- temps de réponse/à la cible ;
- nombre d'appel à la carte 2D.

Un rendu graphique assez simple sera restitué. Il permettra de visualiser les statistiques descriptives demandées ci-dessus. Il y aura donc un graphique par sujet et un graphique par variable (comme précisé dans les statistiques descriptives). Ce sont des graphiques indiqueront les valeurs moyennes et l'écart-type.

2.4. Interface

2.4.1. Page d'accueil

Titre : Logiciel de simulation de systèmes de vision nocturne par intensification de lumière.

2.4.1.1. Interface utilisateur

Cette interface permet de tester en séquence les différentes passes présentées aux utilisateurs. Chaque passe est précédée de la consigne et se termine par un écran de repos (sans rien dessus) de 5 secondes avant l'affichage de la consigne suivante.
A la fin du test, le système permet à l'utilisateur de rejouer les tests afin d'examiner avec l'expérimentateur leur contenu et de recueillir les commentaires et explications sur les décisions prises.
Les consignes des tâches présentées aux sujets en début de passation sont fournies ci-dessous :

- affichage avant chaque scénario testé ;
- affichage jusqu'à ce que les sujets appuient sur la touche « entrée »;
- exemple pour P1 : « vous devez indiquer le moment où vous détectez la présence d'une bosse, d'une éminence ».

Le logiciel devra être capable d'associer les consignes aux passes quelle que soit la version (a, b ou c). Par exemple, la consigne à afficher pour P1a ou P1b est la même.
Les caractéristiques de la carte 2D sont les suivantes mais elles seront confirmées avec le développement de l'environnement 3D :

- affichage à la demande du sujet par appui sur la barre d'espace ;
- idem pour l'enlever de l'écran (prévoir un temps limite d'affichage de 5s pour éviter que les sujets la laissent afficher en permanence) ;
- zone d'affichage : coin en bas à droite ;

- taille : 5x5 cm ;
- la couleur et le contenu seront précisés avec le développement de l'environnement 3D.

2.4.2. Interface expérimentateur

caractéristiques des sujets	Fonctionnel	P1 : bosse P2 : haie P3 : objet fixe vs objet mobile P4 : atterrissage P5 : montagnes P6 : perte de sécurité P7 : lignes HT
	Visuel	cocher les passes que l'on veut tester
paramètres du filtre IL	Fonctionnel	bouton de réglage avec un bouton par paramètre
	Visuel	apparition des réglages pour les 4 paramètres
scénarii	Fonctionnel	fiche « sujet
	Visuel	âge sexe expérience pilote acuité visuelle

Tableau 32: interface d'entrée

Le logiciel développé doit permettre une saisie préalable des données portant sur des informations concernant les sujets, les scénarii soumis, le réglage des paramètres et la définition de pré-sets de passation (ou menu préférences) (tableau 32).

Le logiciel devra être capable d'effectuer un tirage au sort des combinaisons possibles une fois les passes sélectionnées et les paramètres définies. Par exemple, pour 4 passes, 2 valeurs de luminance, 2 valeurs de contraste et 3 valeurs de contenu fréquentiel (pas de valeur pour le bruit), il existe 48 combinaisons possibles. Le logiciel devra pouvoir effectuer un tirage de l'ordre de passage de 48 combinaisons, de le conserver si besoin et d'en faire un nouveau si besoin.

Fonctionnel	Fichier brut par séquence : - numéro du sujet - numéro de séquence - luminance, bruit, contraste, contenu fréquentiel - passe : 1a (Bosse) - numéro de bloc - temps - réponse
	Fichier Excel par sujet - numéro du sujet ; - caractéristiques du sujet (âge, sexe, expérience, acuité visuelle) ; - numéro de séquence ; - numéro de bloc ; - numéro de passe ; Valeurs de luminance, contraste, bruit et contenu fréquentiel.
	Fichier résumé par sujet (à la fin des 48 séquences) : Numéro de séquence Combinaison configuration / passe / valeurs des variables Réponse
Visuel	Fichier brut par séquence Fichier par sujet Fichier compatible d'Excel

Tableau 33 : interface de sortie ou de restitution (indices de mesures)

2.5. Environnement 3D

L'environnement complexe simulé est un environnement 3D avec éclairage nocturne, déterminé par le Laboratoire EA 487/ IdC/ UB2 et THAV. Un environnement sera développé pour chaque passe au lieu de développer un environnement unique pour les 7 passes. Chaque

passe ayant des variantes (2 ou 3 selon les cas), ces 7 environnements auront des variantes créées par déplacement de l'objet ou des objets d'intérêt.

2.5.1. Modélisation et construction

La construction de ces environnements s'effectue sur la base :

- d'une liste d'objets prédéterminés;
- d'une description ou d'un plan de l'environnement (scène) ;
- de photographies des objets et environnements de cette scène.

Seule la modalité visuelle de l'environnement est demandée (pas de modalité auditive, tactile, etc.). La zone définie de l'environnement ne pourra dépasser 200m² (ramenée à une distance de 200km²).

2.5.2. Construction d'un environnement 3D hélicoptère

L'environnement hélicoptère demandé est celui d'un cockpit de type « hélicoptère Tigre », en vision position du pilote (1e personne). L'environnement du cockpit est fourni par le client sous la forme d'une série d'image de simulation de la vue du pilote de sa position. L'exigence du client sur cet environnement porte sur la présence des montants du cockpit et de la planche de bord. Il n'est pas demandé de reproduire l'ensemble des instruments du cockpit. C'est un environnement statique. Aucun élément et objet de cet environnement ne feront l'objet d'une manipulation ou d'un affichage spécifique. L'angle de vision du pilote simulé dans cet environnement doit être précisé par le client.
Pour les environnements 3D hélicoptère intérieur (cockpit) et extérieur (hélicoptère entier), seule la modalité visuelle est demandée (pas de modalité auditive, tactile, etc.).

2.6. Temps réel

L'application du filtre IL (défini précédemment) sera reproduite en temps réel en fonction des déplacements effectués dans l'environnement (que ce soit en déplacement passif pendant le déroulement des passes ou en déplacement actif avec la « free-cam »).
Le mode « free-cam » permet de se déplacer dans la scène à l'aide de la souris et du clavier. La souris pour tourner votre tête, les touches numériques pour se déplacer avec, dans notre cas, l'hélicoptère. C'est un mode de caméra que l'on appelle « à la première personne »).
Les effets des paramètres seront reproduits en temps réel, en fonction des déplacements effectués dans l'environnement : ceci, soit en déplacement passif pendant le déroulement des passes ou en déplacement actif avec la « free-cam ».

La manipulation des valeurs des quatre paramètres (contraste, luminance, bruit et contenu fréquentiel) s'effectuera sous forme de variables indépendantes les unes des autres (c'est à dire des boutons). Ces variables seront définies en entrée (en début de passation) et non modulables en cours d'exécution des passes. L'ordre des passes étant prédéfini par le logiciel (tirage au sort), le réglage des paramètres se fera de manière automatique dans une session.
Les effets additifs (indépendants les uns des autres) des quatre paramètres sur le filtre seront codés et appliqués sur l'environnement 3D en fonction des informations fournies par le client lors de l'étape 1.

2.7. Bilan de la prestation

En raison de difficultés juridiques survenues pour la vérification de la validité du contrat de prestation par rapport aux accords entre Thales et l'université, le projet a été suspendu de juin à septembre. Le retard accumulé a contraint à modifier la prestation. Cette nouvelle version a été soumise à la société prestataire. Les principaux changements étaient le remplacement des environnements 3D par des vidéos (avec application des filtres en temps réel), la suppression de la carte 2D, la suppression du filtre bruit.
La société de prestataire a accepté cette nouvelle demande en septembre. Cependant, au mois d'octobre 2008, la société prestataire a choisi de ne pas continuer la réalisation du projet, la raison avancée étant le temps requis pour l'exécution et la disponibilité des personnels.

3. Mise en place d'une approche simplifiée

Une approche simplifiée, compatible des délais et permettant la réalisation de nos expérimentations, a été développée en interne à THALES. Très rapidement, une prestation de service a été mise en place pour définir cette approche simplifiée et les outils, logiciels nécessaires. Cette approche a été complétée avec l'aide du LaBRI sous la forme d'un stage de 2^{e} année de Master en Informatique
Dans un premier temps les modifications effectuées sur les scénarii seront présentées, suivie du développement d'une application logicielle spécifique.

3.1. Définition des scénarii et des tâches

3.1.1. Scénario 1 : détection d'une motopompe

But	détecter une motopompe au milieu d'un champ le pilote détecte la motopompe → 1 clic sur la flèche
Variations	décaler la motopompe de 30m à gauche, à droite ou au milieu
Difficultés	taille 1m ; trop petite → 2m couleur de la motopompe → difficulté à trouver la bonne : il faut foncer le vert pour qu'il soit visible sous JVN

3.1.2. Scénario 2 : saut de haie

But	pendant un suivi de contour, détecter et sauter la haie en gardant le même delta de hauteur le pilote détecte la haie → 1 clic le pilote est à 100m de la haie, il doit initier le saut de haie → 1 clic
Variations	levée de brume à des distances variables
Difficultés	pas de brume contrôle de la levée de brume (équation ?)

3.1.3. Scénario 3 : illusions autocinétiques

But	distinguer un objet fixe lumineux d'un objet mobile également lumineux le pilote détecte l'objet mobile → 1 clic
Variations	garder la vitesse constante solution 1 : faire varier le côté d'où arrive l'objet mobile solution 2 : faire varier le sens de déplacement du véhicule
Difficultés	pas d'objets mobiles

3.1.4. Scénario 4 : atterrissage sur une aire de posée

But	lors d'une phase de poser dans un champ en léger dévers, avec des balises JVN représentant un T ou un H, l'écartement des balises créé une illusion d'optique permettant de distinguer le dévers le pilote perçoit l'orientation du dévers → 1 clic
Variations	faire varier le sens du dévers de la zone de poser
Difficultés	pas possible de faire varier le dévers vitesse de vol très réduite par rapport à la vitesse minimale possible

3.1.5. Scénario 5 : recherche de trajectoire au milieu d'un environnement montagneux

But	détecter une trajectoire dans un environnement montagneux en fonction de la position des montagnes le pilote détecte la position des montagnes → 1 clic le pilote initie la manœuvre →1 clic
Variations	variation : inverser la position des montagnes à gauche ou à droite
Difficultés	aucune

3.1.6. Scénario 6 : formation en serpent

But	détecter le changement de vitesse de l'hélicoptère situé devant nous (leader) le pilote détecte le changement de vitesse → 1 clic
Variations	modifier le moment où l'hélicoptère de tête ralentit
Difficultés	impossible d'avoir un autre hélicoptère

3.1.7. Scénario 7 : perte de sécurité

But	Détecter le moment où l'hélicoptère perd le stationnaire et donc perd la sécurité le pilote détecte la translation → 1 clic
Variations	appliquer une translation de l'hélico vers l'arrière qui commence à un moment différent
Difficultés	difficile de reproduire les mouvements de l'herbe vitesse de vol très réduite par rapport à la vitesse minimale possible

3.2. Application simulation de vision nocturne

Cette partie de l'étude consiste à mettre en place un environnement de simulation pour évaluer des systèmes de vision nocturne pour des pilotes d'hélicoptères. Il s'agit de développer une application qui matérialise un affichage en vol à des localisations prédéfinies. Ces emplacements correspondent à des scènes 3D décrivant différents reliefs présentés à différents niveaux de nuit. Dans ce projet, nous nous sommes limités à sept scénarii, chacun ayant un objectif de tâche à réaliser différent. Chaque scénario illustre un contexte représentatif décrit dans le paragraphe 4.

Dans le cadre de notre projet, ces scénarii sont créés à partir d'un logiciel existant de génération de scènes 3D. L'application doit tout d'abord permettre d'appliquer, sur les enregistrements obtenus, des filtres (ou non selon nos conditions), en temps réel, pour ajouter

les effets visuels, à l'aide de notre logiciel. L'application doit, de plus, assurer l'ordre de passage des scénarii et leurs enchaînements automatiques, mais aussi permettre un pilotage de la scène à l'aide d'un clavier avec touches de navigation. Enfin, elle doit enregistrer les réponses et les temps de réponse des pilotes.
L'application doit également fournir, à l'expérimentateur, des interfaces graphiques pour la gestion de données d'entrée et la présentation des consignes aux pilotes. A chaque utilisation, il doit être capable de charger ou d'enregistrer des données en entrée et en sortie dans des fichiers pour des analyses statistiques.

3.2.1. Contraintes et priorités

L'objectif de ce projet consiste à fournir une application de vol de nuit totalement automatique. Pour cela, plusieurs tâches doivent être réalisées :

- créer les scénarii ;
- créer l'interface graphique ;
- automatiser l'application ;
- enregistrer toutes les données, en entrée et en sortie ;
- intégrer un module statistique.

Par contrainte de temps et de synchronisation avec d'autres activités, ces tâches ont été réalisées selon l'ordre de priorité suivant :

- étude et analyse des logiciels présentés ci-dessus ainsi que les filtres, et éventuellement apporter des corrections ;
- réalisation des scénarii ;
- réalisation de l'interface ;
- intégration du filtre passe-bas (filtrage des fréquences spatiales) au reste de l'application ;
- automatisation et enregistrement des données d'entrée et de sortie ;
- réalisation du module de traitement statistique.

3.2.2. Besoins non-fonctionnels

Dans le domaine de l'ingénierie cognitive, les aspects Facteurs Humains sont liés à l'automatisation, l'analyse de tâches/fonctions, le travail coopératif assisté par ordinateur.

Dans le cadre de cette étude, certaines contraintes demandent plus d'assiduité et de considération que d'autres. Ces contraintes sont énumérées comme suit.

3.2.2.1. Ergonomie de l'interface

Bien que l'application soit destinée à des ingénieurs ou experts FH, elle appelle également l'intervention de sujets d'expérimentation. Ainsi, le logiciel doit proposer deux types d'interfaces, répondant aux besoins spécifiques de chacun (expérimentateur et utilisateur). Pour une application donnée, c'est l'expérimentateur qui décide des paramètres d'une session d'évaluation. A l'issue de la configuration et des traitements, les utilisateurs interviennent pour piloter l'application au moyen d'un clavier. Il est donc logique que les deux interfaces soient indépendantes.

3.2.2.2. Extensibilité

Étant spécifique aux activités du domaine facteurs humains et uniquement à ce projet, l'extensibilité du logiciel n'est pas une exigence, mais nous voulons cependant garder cette qualité afin de pouvoir rajouter d'autres fonctionnalités pour enrichir les évaluations. Pour cela et pour chaque scénario, il a été décidé de séparer les vidéos de leurs traitements dans des fichiers différents.

Les vidéos sont stockées dans le format « .avi », alors que les traitements sont représentés par des « shaders ». Le scénario est configuré par un fichier de format « .init » qui fait référence à la vidéo, aux « shaders » correspondants, ainsi que les différents paramètres choisis par l'expérimentateur.

3.2.2.3. Fiabilité

Pour assurer un résultat satisfaisant des évaluations, les scénarii doivent être le plus réalistes possibles, et les traitements doivent être précis. Par ailleurs, le résultat est d'autant plus fiable que l'expérimentateur s'implique le moins possible dans le déroulement de l'application. En effet, ceci permet d'éviter toute erreur de manipulation et d'inattention. Dans notre application, le calcul des filtres passe-bas doit se faire automatiquement (pour le moment, cette tâche est réalisée par l'expérimentateur).

3.2.2.4. Fluidité de la lecture vidéo

La fluidité de la lecture de nos vidéos est une des contraintes imposées. Pour parvenir à cela, l'algorithme de lecture doit avoir une faible complexité. Par ailleurs, les fichiers « .avi » manipulés étant très volumineux (de taille 1920x1080), les traitements doivent être également

rapides. Nous avons donc recouru à la programmation par pixels afin d'accélérer le temps de traitement.

3.2.3. Besoins fonctionnels

Notre base de données est composée d'un ensemble de fichiers « .avi » qui sont les scénarii réalisés préalablement, ainsi qu'un fichier de configuration et un ensemble de filtres à mettre éventuellement à jour pour chaque scénario. Par la suite, le logiciel doit proposer une automatisation de la génération et de l'exécution d'un « pré-set » pour les évaluations. Il est manipulé, principalement, par l'expérimentateur. Il fournit des outils pour paramétrer les pré-sets qui doivent être sauvegardés. A la fin de chaque évaluation, les réponses des pilotes sont enregistrées pour les analyses statistiques. Pour terminer, un module de traitement statistique des résultats sera rajouté.

3.2.3.1. Génération d'un « pré-set »

L'application doit permettre à l'expérimentateur de créer des nouveaux « pré-sets ». Un « pré-set » est en fait une combinaison de valeurs de filtres avec les scénarii sélectionnés. A l'issue de la configuration des données, l'application doit mettre en place l'ensemble des scénarii et les traitements à réaliser. Pour cela, toutes les combinaisons possibles de ces données doivent être réalisées. Ces données sont ensuite enregistrées dans un fichier. Chaque combinaison est appliquée à tous les scénarii.

3.2.3.2. Génération d'un scénario

Un scénario est constitué d'un fichier « .avi »et éventuellement d'un « shader », spécifique à une combinaison. Il est décrit dans un fichier « .init ». Ce dernier sert à configurer notre lecteur vidéo et donne ainsi un rendu final du scénario.

3.2.3.3. Sauvegarde des données

L'application doit permettre de fournir les résultats des évaluations afin d'effectuer des analyses statistiques. De ce fait, le logiciel doit sauvegarder les résultats des sujets avec un sujet par fichier. Afin de faciliter la lecture et l'analyse statistique des données, nous avons choisi le format « .cvs » compatible avec Excel, pour être lu avec un tableur.

4. Fonctionnement de l'application

4.1. Principe

Le principe de cette application consiste à lire un fichier vidéo décrivant une scène 3D. Ensuite, différents filtres sont appliqués sur cette vidéo pour créer des effets visuels, par exemple l'atténuation du contraste. Enfin, le sujet doit détecter les obstacles et ses réponses sont enregistrées des fichiers. Il est à noter que l'ensemble des données manipulées dans cette application est regroupé dans des dossiers différents que nous appelons "base de données". La figure 70 ci-dessous illustre ce principe de fonctionnement.

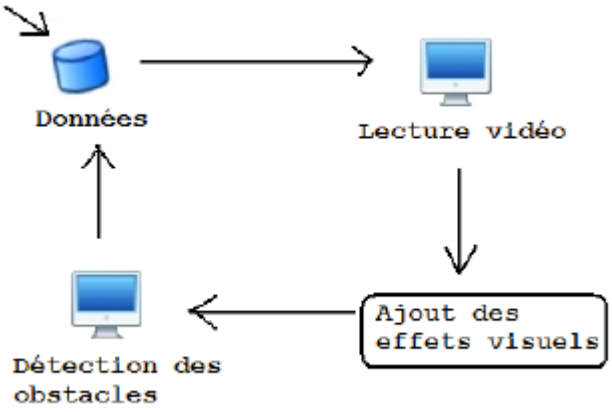


Figure 70 : principe de fonctionnement de l'application

4.2. Schéma de fonctionnement

Le fonctionnement de l'application est décrit sur la figure 71.

Le point de départ de l'application est un ensemble de fichiers vidéos des scènes 3D contenues dans la base de données. La suite du fonctionnement de l'application est composée de 8 étapes principales.

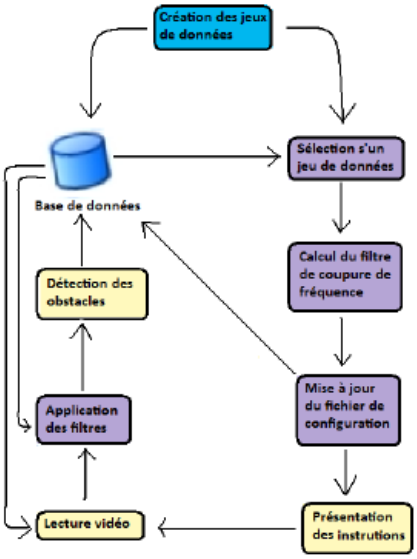


Figure 71: schéma de fonctionnement de l'application.

1. Avant de commencer les évaluations, les jeux de données, c'est-à-dire les couples sujets/ « pré-sets » sont créés via l'interface graphique. Un « pré-set » est un ensemble composé des scénarii et des valeurs des filtres à appliquer sur les vidéos lors d'une évaluation. Le fonctionnement de cette interface graphique GUI est décrit à la section 4.2.3.
2. L'expérimentateur sélectionne ensuite un jeu de données pour effectuer les évaluations.
3. A partir des données récupérées, BlurMask est appelé pour calculer les filtres passe-bas, on obtient ainsi les filtres de coupure de fréquence.
4. Une fois que les filtres de coupure de fréquence sont obtenus, le fichier de configuration de MediaPlayerOpenGL est mis à jour à partir des informations sur le jeu de données et d'un des filtres passe-bas sélectionnés aléatoirement.
5. Une présentation du scénario ainsi que les instructions spécifiques à ce scénario sont ensuite affichées.
6. Par la suite, le fichier vidéo caractérisant le scénario choisi est lu par MediaPlayerOpenGL et considéré comme un rendu OpenGL pour les traitements.
7. Parallèlement à la lecture vidéo, les filtres sont appliqués sur chaque image pour ajouter des effets visuels ou ajouter des objets en modifiant leurs comportements en temps réel.
8. Pendant la lecture vidéo, le sujet peut interagir à tout moment, au moyen du clavier, pour détecter les obstacles dans le scénario suivant les instructions présentées initialement. Ces réponses sont alors enregistrées dans la base de données.

4.3. Fonctionnement de l'interface expérimentateur GUI

L'interface expérimentateur GUI, est destinée à être utilisée pour paramétrer les jeux de données pour les évaluations. Ces fonctionnalités sont axées sur trois besoins distincts.

Premièrement, l'expérimentateur doit pouvoir **insérer des nouveaux sujets et « pré-sets »**. Chaque sujet est enregistré dans un nouveau fichier alors que le « pré-set » est sauvegardé dans un autre. A chaque sujet est attribué un numéro, afin de garder son anonymat. Les informations enregistrées pour le caractériser sont son âge, son sexe, son acuité visuelle, son expérience de vol et vol de nuit. En ce qui concerne les « pré-sets », ils enregistrent les scénarii (avec les versions choisies), et les valeurs des filtres (à savoir 2 valeurs de fréquences de coupure, 2 valeurs de contraste et 2 niveaux de nuit).

Ensuite, l'expérimentateur doit pouvoir **apporter des modifications sur les sujets ou les pré-sets de la base**. Après le chargement des données d'un sujet choisi, les nouvelles informations vont remplacer les anciennes données correspondantes directement dans le fichier, tandis que les modifications du « pré-set » sont enregistrées dans un nouveau fichier. On obtient ainsi un nouveau « pré-set ».

Enfin, l'expérimentateur doit pouvoir **choisir un jeu de données pour effectuer une évaluation et le type d'évaluation** (simulation ou stimulation) à réaliser. La simulation implique l'application des filtres de vert, fréquence de coupure et contraste pour simuler les effets du dispositif de vision nocturne. La stimulation n'utilise pas ces filtres du fait que le sujet utilise les systèmes réels d'aide à la vision.

5. Filtres utilisés pour l'expérimentation de simulation

5.1. Filtre « vert » (filtre IL)

Les dispositifs de vision nocturne (DVN) auxquels nous nous intéressons utilisent la technologie d'intensification de lumière. La lumière qui sort du tube IL, au niveau de l'écran de phosphore, est une lumière visible émettant à une longueur d'onde variable selon le type de phosphore utilisé. Dans les systèmes que nous avons comparés, il s'agit du P43 qui émet environ vers 545nm. Ceci correspond à une lumière émettant dans le vert.

Pour reproduire cet effet, le **filtre « vert »** a été implémenté. L'expérimentation de simulation ayant pour but principal de valider les scénarii opérationnels et les métriques, non de réaliser une véritable simulation de systèmes de vision nocturne, une méthode simple, sans tenir compte des propriétés des DVN, est alors mise en place. Le principe consiste, dans un premier

temps, à transformer l'image en monochrome noir et blanc pour ensuite la transformer en niveau de vert.

La conversion de l'image en monochrome consiste à ramener les valeurs des pixels en niveau de gris. Ceci se fait par une équation mathématique. Une fois que l'image est transformée, l'étape suivante a été de lui rajouter du vert en donnant un facteur du composant vert plus important que ceux des rouges et bleus. Afin d'avoir un vert comparable à celui des DVN, nous avons joué sur la combinaison de ces facteurs et les avons comparé à une image de ce dispositif jusqu'à atteindre un résultat jugé satisfaisant par des opérateurs de DVN réguliers (mais non pilotes). Cependant, ce vert, après la projection sur un mur noir en salle noire, ne correspondait plus au vert attendu.

Pour remédier à ce problème, il a fallu accentuer encore plus le vert jusqu'à l'obtention d'un rendu satisfaisant. Ainsi, nous avons finalement retenu le vert suivant (figure 72).

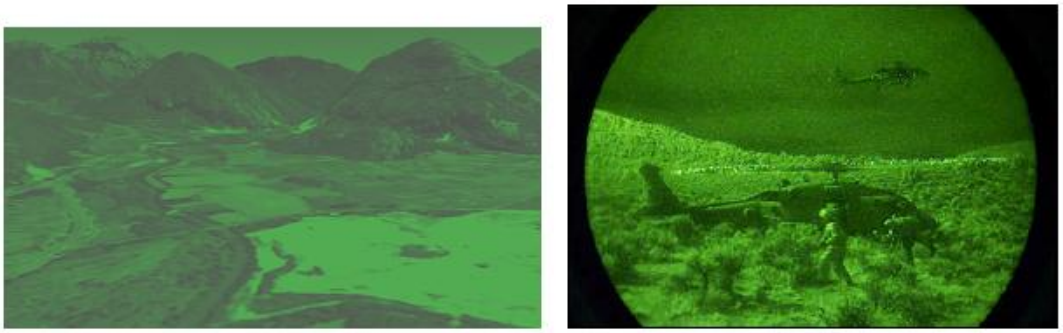


Figure 72: comparaison entre le vert simulé (à gauche) et le vert d'un DVN (à droite).

5.2. Filtre passe-bas : BlurMask

L'atténuation de la résolution spatiale de l'œil peut être reproduite par réduction du niveau de détail de l'information de l'image qui est spécifiée par l'atténuation des hautes fréquences, c'est-à-dire la suppression des fréquences supérieures à la fréquence de coupure fournie par l'utilisateur. Cette réduction est de ce fait mise en œuvre à l'aide de filtres passe-bas.

Il existe de nombreux filtres passe-bas qui permettent de réaliser ce besoin. Cependant, ces derniers présentent des contraintes avec lesquelles il faut trouver un compromis qui dépend des besoins de l'application. En effet, ces filtres ont leur propre gabarit qui fixe des limites des différents éléments du filtre, à savoir :

- la fréquence de coupure,
- l'atténuation dans la bande coupée,
- l'ondulation dans la bande passante,

- la largeur de la bande de transition, située entre la fréquence de coupure et la zone atténuée.

Dans le projet, le filtre demandé au départ est un filtre passe-bas idéal qui coupe les fréquences de manière nette, c'est-à-dire un filtre qui a un gain constant dans sa bande passante et un gain nul dans la bande coupée. Naturellement, un tel filtre idéal n'est pratiquement pas réalisable. Un gabarit permet de caractériser l'allure du filtre.
Bien qu'il fournisse des résultats satisfaisants, il n'est pas réaliste et est très éloigné du gabarit qui caractérise le fonctionnement des DVN. Les experts utilisent plutôt un gabarit de type de Fonction de Transfert de Modulation (FTM). Nous avons donc opté pour ce gabarit. Il faut alors mettre en lace un outil de calcul du filtre passe-bas reproduisant le comportement des DVN modélisant la FTM. Il s'agit du module BlurMask. L'idée est, qu'à partir d'une fréquence de coupure donnée, un gabarit de type FTM est déterminé (gabarit théorique). BlurMask aura pour rôle de déterminer des coefficients du filtre pour que celui-ci soit le plus proches possibles du gabarit théorique de la FTM. Voici les graphes (figure 73) des différents filtres obtenus avec le gabarit FTM et leurs rendus en images.

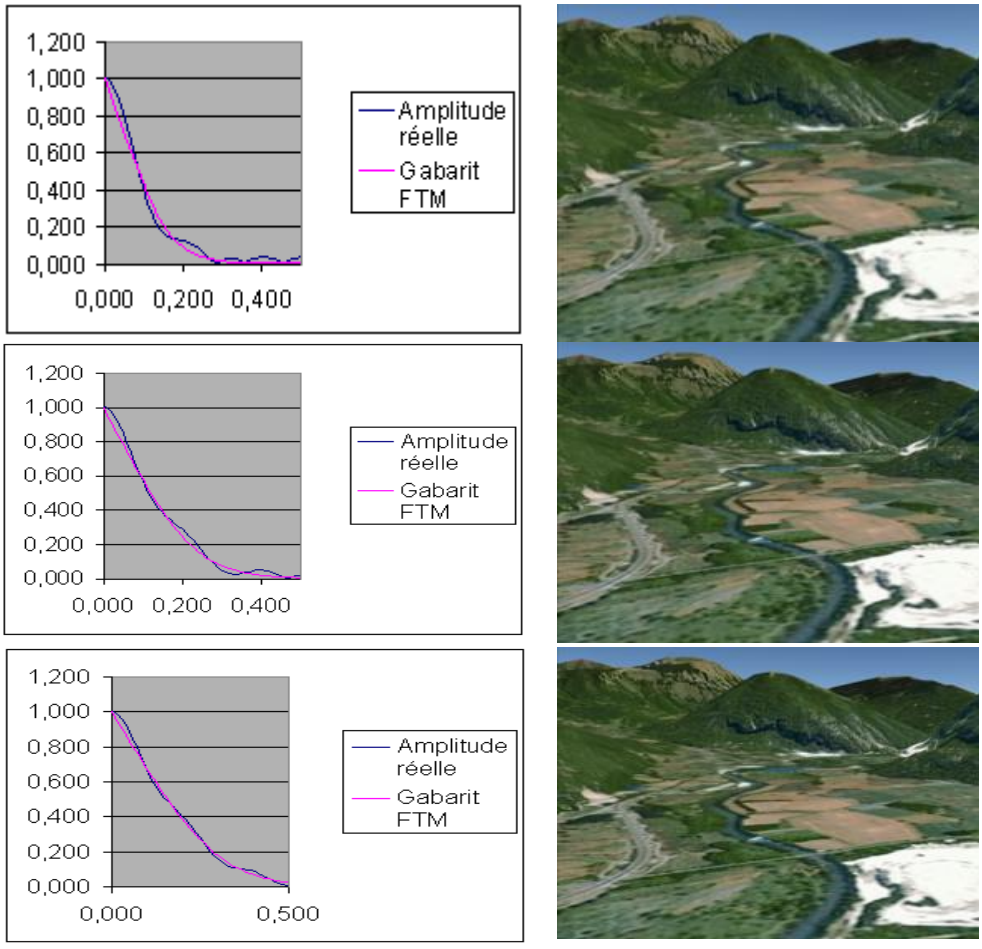


Figure 73 : effet des réglages du filtre passe bas sur la même scène.
En haut : fc à 0,7 cy/mrad ; au centre: fc à 1,0 cy/mrad ; en bas: fc à 1,3 cy/mrad)

5.3.Filtre « contraste »

Le contraste exprime des différences de luminance, exprimées en niveaux de gris, dans une seule région de l'image ou dans différentes régions sur toute l'image. Généralement, on utilise un histogramme pour représenter la distribution des pixels de l'image en fonction des niveaux de gris. Ceci permet de rendre compte rapidement des variations de contraste dans cette image. Il est possible de modifier le niveau de contraste dans l'image à l'aide de plusieurs méthodes (Foley et Van Dam, 1982, in Beaudouin-Lafon, 2004) : par des fonctions mathématiques ou à partir de l'histogramme.

Mathématiquement, le contraste peut être décrit par des fonctions de transfert (Blanc, 2008). La modification du contraste par la méthode mathématique consiste à appliquer à chaque pixel une fonction qui transforme son intensité.

Le contraste peut être représenté par un histogramme dont la modification se fait à partir d'une fonction qui décrit une courbe tonale caractérisant l'aspect de l'image souhaitée. Cette courbe permettant de modifier l'image peut être :

- une égalisation de l'histogramme, qui consiste à l'aplatir en donnant un poids identique à chaque niveau de gris. Les nuances dans l'image sont finalement augmentées ;
- une linéarisation consiste à étaler l'histogramme pour répartir les fréquences d'apparition des pixels sur la largeur de l'histogramme. Elle vise à rendre les pixels clairs encore plus clairs et les pixels sombres encore plus sombres.

La modification de contraste par la méthode d'histogramme est certainement la méthode la plus adéquate à notre étude sur les DVN car elle n'altère pas les informations contenues dans l'image, elle les rend simplement plus ou moins visibles. Cependant, son implémentation est une contrainte pour notre application. Nos images étant codées en RGB, il faut avoir quatre histogrammes : un pour la distribution de la luminance et trois pour des composants rouges, vertes et bleues. Après le calcul des histogrammes, l'image est parcourue entièrement et chaque pixel est mis à jour, à partir des histogrammes. Cette méthode nécessiterait alors un temps de calcul non négligeable car nous travaillons sur des images de résolution 1920x1080. Elle pourrait ainsi avoir une influence sur la performance de notre application en provoquant un ralentissement de la lecture vidéo. C'est pour cette raison que la méthode mathématique a été finalement choisie. La figure 74 illustre des exemples de résultats obtenus par l'application de ce filtre.

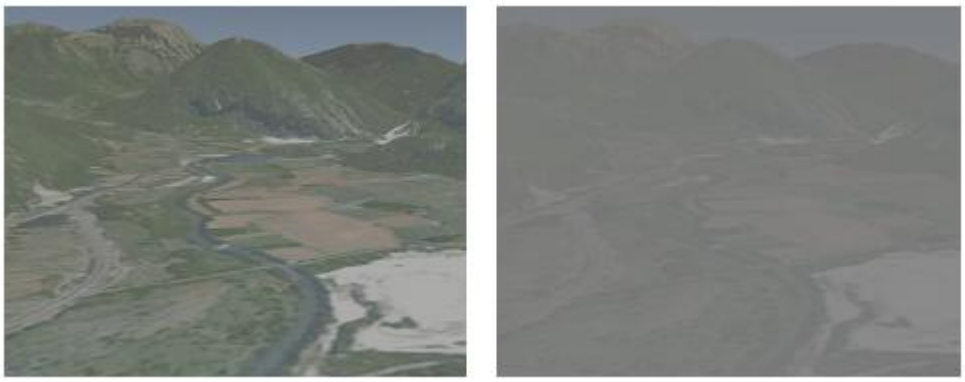


Figure 74: filtre contraste.

Image gauche : contraste à 60%. Image droite : contraste à 30%.

6. Scénarii implémentés et testés pour les expérimentations

6.1. Motopompe

Générer une clairière contenant des cubes de 1m de côté et de couleur verte (pour se fondre dans le décor général) est une tâche simple et rapide à opérer sous Google Earth. Trois vidéos différentes sont proposées. Chaque vidéo est une version différente du scénario correspondant à la variation de la position de la motopompe : à gauche, à droite et au centre (figure 75). Comme expliqué précédemment, la taille (1m de côté) et la couleur des motopompes (vert) prescrites ne permettent de la distinguer dans le champ : le résultat n'est pas satisfaisant. L'application du filtre vert sur les motopompes les rend invisibles. Pour remédier à ce problème, nous avons choisi d'augmenter la taille des objets insérés (3m) et de modifier la couleur (vert-noir).Ces modifications permettent d'obtenir le meilleur compromis pour permettre de percevoir les objets et les conditions réelles.

Figure 75: illustration du problème de la taille de la motopompe

Il s'agit d'images extraites des vidéos du scénario motopompe. A gauche : une motopompe de 1m de couleur verte ; à droite : une motopompe de 3 m de couleur vert noir.

6.2. Zone montagneuse

Ce scénario consiste à détecter progressivement une vallée et son orientation, dans un paysage de montagne. Pour cela, il est impératif que la scène comporte deux montagnes de même taille au point de départ. Il est important que la distinction les deux montagnes ne soit pas visible au départ. Il faut alors modifier l'angle de vue par rapport à la position, la taille et la texture des deux montagnes. Deux variantes du scénario sont développées correspondant à des orientations de la vallée différentes : vers la gauche et vers la droite. Pour éviter l'effet d'apprentissage des vidéos, plusieurs scènes ont été proposées, et quatre ont été retenues pour chaque orientation soit 8 vidéos au total. Un exemple de ce scénario est présenté ci-dessous avec l'application des filtres (figure 76).

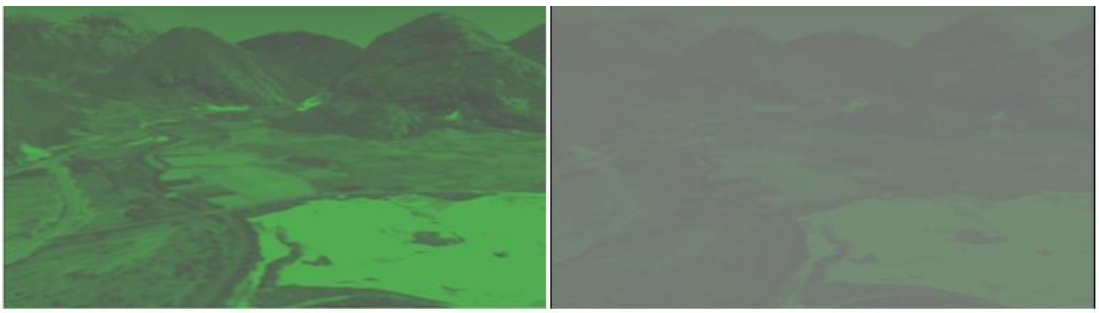


Figure 76: exemple de scènes issues du scénario montagne
Image gauche : filtre vert et contraste à 60% ; image droite : filtre vert et contraste 30%.

6.3. Interface

La capture d'écran ci-dessous (figure 77) représente l'interface d'expérimentateur qui est également la fenêtre principale de notre application.
Elle est composée de 11 éléments principaux, numérotés de 1 à 11.

1. Sélectionneur de sujets.
2. Espace des informations sur le sujet.
3. Validation d'un sujet.
4. Liste des « pré-sets » réalisés par un sujet.
5. Sélectionneur des « pré-sets » de la base de données.
6. Sélectionneur de scénarii.
7. Sélectionneur de versions.
8. Les paramètres des filtres.
9. Validation d'un « pré-set ».

10. Type d'évaluation.
11. Démarrage de l'évaluation.

Ces composants sont décris comme suit.

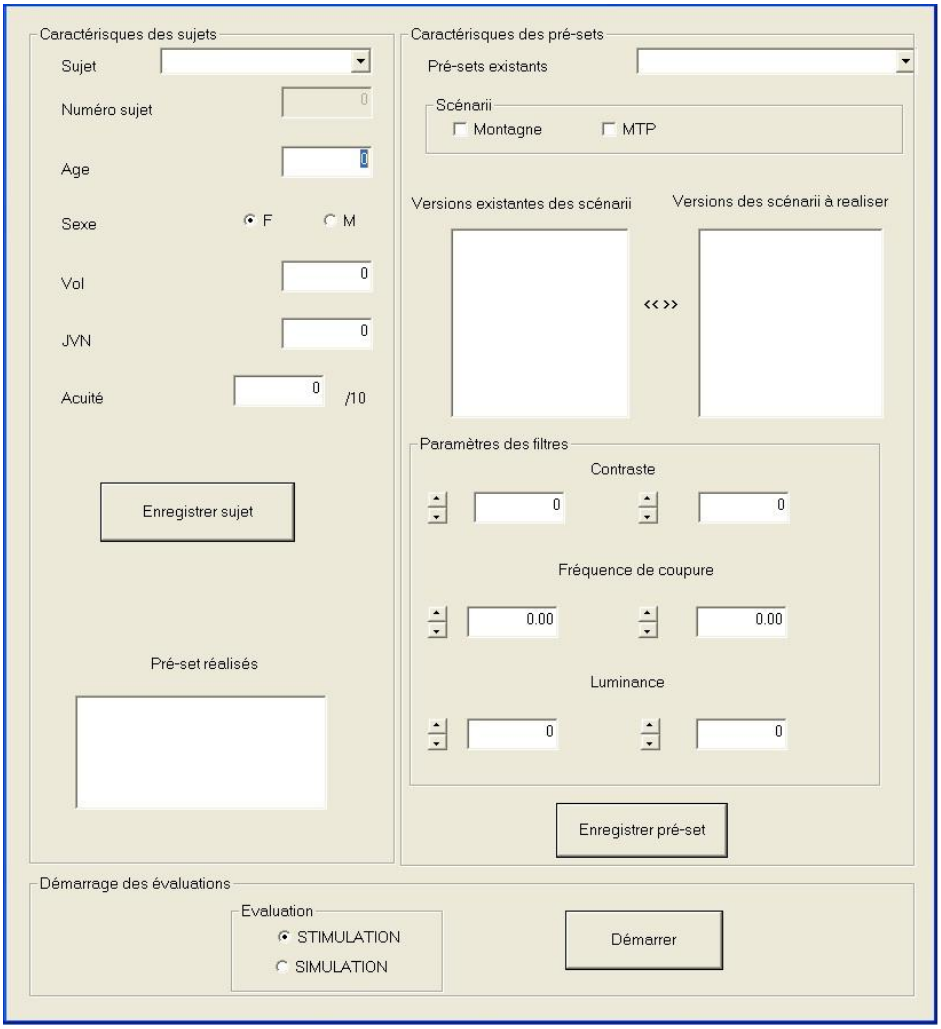


Figure 77 : interface expérimentateur

6.3.1. Sélectionneur de sujets

Figure 78: sélectionneur de sujets

Ce sélectionneur (figure 78) propose deux fonctionnalités : sélectionner un sujet et créer un nouveau. Au lancement de l'application, toute la base de données des sujets est automatiquement chargée dans ce sélectionneur. Il permet de sélectionner un sujet pour une évaluation ou pour une mise à jour de ses données. Il permet également de créer un nouveau sujet en sélectionnant l'item « Nouveau sujet ».

6.3.2. Espace des informations sur le sujet

Cette espace est destinée à afficher le profil d'un sujet (figure 79), à savoir son identifiant (Numéro sujet), son âge (Age), son sexe (Sexe), son nombre d'heures de vol (Vol), son nombre d'heures sous JVN (JVN) et son acuité (Acuité). Ces informations, en particulier le « Vol » et le « JVN », permettent d'identifier un pilote ou un novice pour la comparaison des résultats.

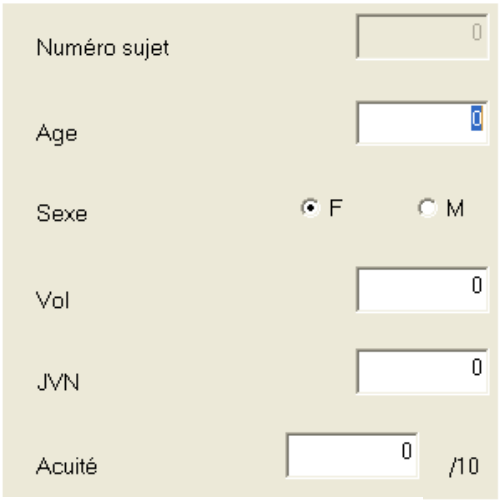


Figure 79: zone d'informations sur le sujet à remplir

6.3.3. Validation d'un sujet

Ce bouton permet de valider et enregistrer les modifications d'un sujet ou un nouveau sujet. Ici, il n'est pas demandé de donner le nom du fichier, le logiciel se charge de l'enregistrer automatiquement dans un fichier ayant comme nom l'identifiant du sujet.

6.3.4. Liste des pré-sets réalisés par un sujet

Cette liste affiche les « pré-sets » réalisés par le sujet sélectionné (figure 80). Elle est utile pour des consultations ou la réalisation de nouveau un « pré-set » sélectionné ou encore pour la modification pour en créer un autre.

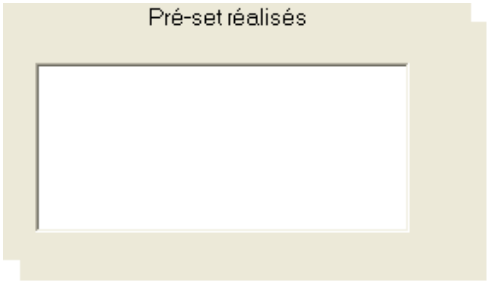


Figure 80: zone d'affichage des pré-sets réalisés

6.3.5. Sélectionneur des « pré-sets » de la base de données

Comme pour le sélectionneur de sujets, la base de données des « pré-sets » est également chargée automatiquement au début de l'application. Ainsi, on peut soit sélectionner un « pré-set » pour réaliser une évaluation ou pour le modifier (figure 81), soit créer en un nouveau en sélectionnant « Nouveau pré-set ».

Figure 81: sélectionneur de pré-sets

6.3.6. Sélectionneur de scénarii

Ce sélectionneur est composé de plusieurs cases permettant de choisir les scénarii à évaluer en les cochant. Ces cases sont également cochées si un « pré-set » est sélectionné. A l'heure actuelle, d'autres cases ne sont pas figurées car les scénarii sont en cours de développement ou en phase de validation.

6.3.7. Sélectionneur de versions

Ce composant est composé de deux listes : « Versions existantes des scénarii » pour afficher les versions existantes des scénarii cochés, et « Versions des scénarii à réaliser » pour afficher les versions (ou variantes) choisies, pour un « pré-set ».

6.3.8. Les paramètres des filtres

Cet ensemble de composants (figure 82) sert à paramétrer les filtres et à afficher les valeurs des filtres d'un « pré-set » sélectionné.

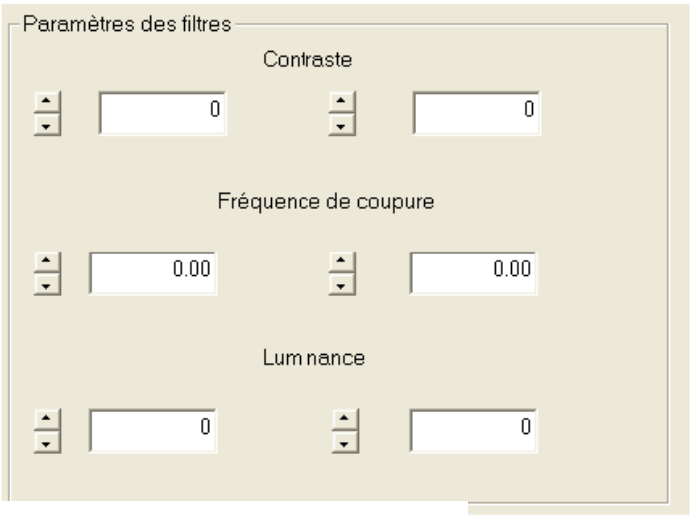


Figure 82: zone de paramétrage des filtres

6.3.9. Validation d'un « pré-set »

Ce bouton permet de valider et enregistrer les modifications ou un nouveau « pré-set ». Comme pour le sujet, il n'est pas nécessaire d'attribuer un nom pour ce fichier, le logiciel s'en charge.

6.3.10. Type d'évaluation

Cette partie permet de choisir le type d'évaluation à effectuer (figure 23). Nous pouvons soit opter la "Stimulation" soit la " Simulation".

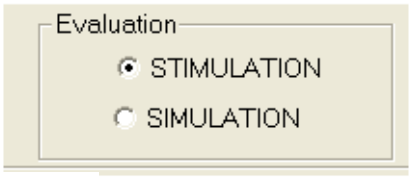


Figure 83: type d'évaluation

6.3.11. Démarrage de l'évaluation

Ce bouton permet de valider ce jeu de données (sujet et pré-set) pour l'évaluation choisie. Une fois que ce bouton est cliqué, l'évaluation commence.

7. Système d'affichage

Pour afficher les vidéos et l'application développée, il est nécessaire de trouver le système permettant d'afficher des images. Nous avons fait le choix de projeter ces images et donc d'utiliser un vidéoprojecteur qui sera installé dans la salle noire. L'écran de projection est à définir.

7.1. Choix du système de projection

7.1.1. Surface de projection

Pour avoir une résolution de 1,5 cy/mrad avec le vidéoprojecteur de 1920 x 1080 pixels, cela donne un affichage de 35,5° x 20°.

La surface d'affichage mesure 3,84m x 2,12m ce qui représente une grande surface d'affichage. Nous avons donc choisi de projeter directement sur le mur, recouvert d'une peinture spécifique noire mate. Cette peinture a été choisie au moment de la mise en place de la salle pour être compatible avec l'utilisation des DVN. L'ensemble des mesures effectuées avec le vidéoprojecteur (calibration et évaluation) sont réalisées dans ces conditions.

7.1.2. Vidéoprojecteur

Notre besoin est de pouvoir simuler une image issue d'un dispositif de vision nocturne donc une image de 40° de champ avec une résolution d'au moins 1,3 cy/mrad (cette valeur correspond à la valeur de résolution maximale des bons DVN).

Nous avons donc défini notre besoin pour un projecteur capable de fournir une résolution de 1,5 cy/mrad. Pour avoir une telle résolution sur 40° de champ, il faudrait un projecteur capable de fournir 2094 x 2094 pixels. Par conséquent, nous faisons le choix de réduire le champ d'affichage et de choisir un projecteur full HD 1920 x 1080 (résolution native).

Au départ, le vidéoprojecteur ne devait servir que pour la stimulation. La simulation devait être réalisée en salle de Réalité Virtuelle dans les locaux de l'Université. Finalement, avec le retard accumulé et l'application développée, tout a été mis en place dans la salle noire de Thales et avec le même vidéoprojecteur.

Une fois le choix sur la résolution du vidéoprojecteur fait, une autre question se pose sur le type de technologie du vidéoprojecteur. Deux technologies sont envisagées par les ingénieurs opticiens : LCOS ou DLP. La technologie LCOS (Liquid Crystal On Silicon) est utilisée pour la vidéo-projection par réflexion avec des cristaux liquides. La technologie DLP (Digital Light Processing) utilise des miroirs et est une technologie par transmission.

Des mesures ont été réalisées pour comparer les vidéoprojecteurs utilisant deux technologies : notre vidéoprojecteur DLP et un vidéo projecteur utilisant la technologie EDP (Enhanced Dot Ptich). Le projecteur EDP ne correspond pas à notre besoin en raison de performances insuffisantes pour la restitution des niveaux de nuit. Le projecteur DLP est retenu car il permet de restituer des niveaux de nuits jugés suffisants et il a, pour caractéristique, d'émettre dans l'infra rouge ce qui est favorable pour la réalisation des expérimentations (figure 84).

Le vidéo-projecteur choisi utilise donc la technologie DLP, avec une résolution native 1920 x 1080.

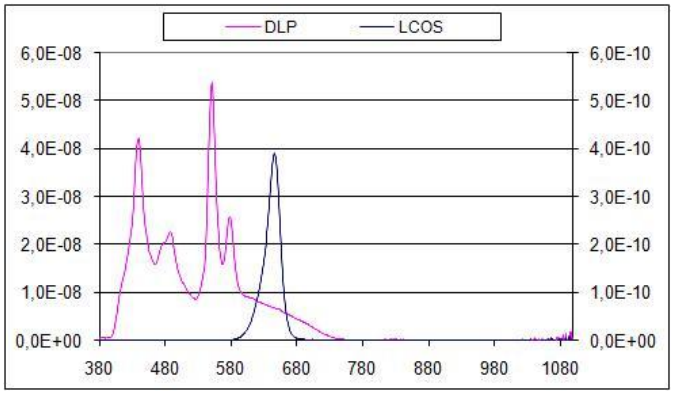


Figure 84: spectre de sensibilité de deux vidéoprojecteurs entre 380 et 1100 nm.
En rose: vidéoprojecteur DLP 800x600 : en bleu: vidéoprojecteur EDP

Notre choix se porte sur le Benq w4000. Les mesures pour calibrer et valider ce vidéoprojecteur sont effectuées en octobre dès l'achat (figures 85 et 86).

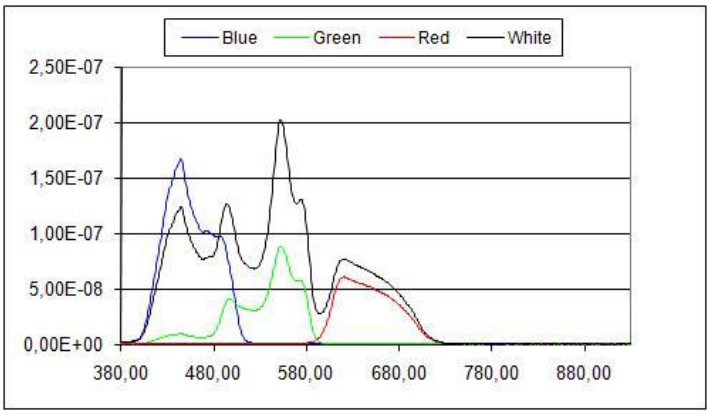


Figure 85: spectre de luminance du Benq W400 entre 380 et 900 nm.

Contrast			
contrast du vidéo	100		50
appareil de mesure	PR1980	PR1980	PR1980
	mur	magnésie	mur
Lum du blanc (cd/m²)	13	102	13,1
Lum du noir (cd/m²)	0,036	0,22	0,033
contrast	**361**	**464**	**397**

Figure 86: mesures de contraste effectuées sur le vidéoprojecteur Benq w4000

Il est également nécessaire d'effectuer les calculs pour obtenir les niveaux de nuit correspondants à ceux établis avec une source lumineuse de type corps noir à 2856K. La résolution et le contraste obtenus correspondent aux spécifications indiquées et ont été jugés satisfaisants.

7.1.3. Polariseurs

Pour obtenir les différents niveaux de nuit ou obtenir une gamme de luminance variable, il a été choisi d'utiliser des filtres polarisés, plutôt que des densités optiques. Ce choix repose sur le fait qu'il y avait deux options possibles pour les densités optiques ::

- utiliser des densités de type Wratten, assez souples et fines, qui se déforment sous la chaleur et dont le filtrage n'aurait plus été uniforme.
- faire fabriquer des densités en verre, adaptées à l'optique du vidéoprojecteur. L'inconvénient de cette solution était le temps d'obtention de ces densités par rapport à nos besoins.

Une 3^{e} solution a donc été envisagée, l'utilisation de filtres polarisés et, après des essais de validation sur des polariseurs de qualité moindre, même si la lumière de notre vidéoprojecteur

n'est pas polarisée, nous avons obtenu un filtrage très satisfaisant. Pour cela, nous utilisons deux filtres polarisés : un filtre est maintenu fixe tandis que l'autre se déplace selon un axe de rotation par rapport à l'autre.

7.2. Equivalence en niveaux de nuit

Les niveaux de nuit sont établis à partir de la référence d'un corps noir à 2854°K. Nous avons donc déterminé, à partir de la référence d'un corps noir à 2854K, les niveaux de radiance NVIS-A et -B sur lesquels il faut ajuster l'atténuation du projecteur HD afin d'être équivalent au référentiel des niveaux de nuit sur CN 2854K.

Nous avons les valeurs de luminance photopique à obtenir sur le projecteur pour que la radiance NVIS associée soit égale à celle d'un corps noir dans les niveaux de nuit définis.

Ces calculs sont effectués sur la base spectrale du projecteur HD et de 2 polariseurs éclairant le mur noir latéral, la transmission spectrale de ces polariseurs est donc prise en compte. Ils prouvent qu'avec des polariseurs, il est possible d'obtenir, avec le vidéoprojecteur, différents niveaux de nuit de 1 à 5 (figure 87).

	Référence CN 2854°K	Nvis-A	Nvis-B	Lum phot projecteur HD + 2 polariseurs	Coefficient d'atténuation avec les polariseurs
sans atténuation		3,20E-04	2,06E-04	6,70E-01	1
nuit 1	70	1,66E-04	1,56E-04	5,07E-01	1,32
nuit 1	50	1,18E-04	1,11E-04	3,62E-01	1,85
nuit 2	25	5,91E-05	5,57E-05	1,81E-01	3,70
nuit 3	6	1,42E-05	1,34E-05	4,34E-02	15,43
nuit 4	1,3	3,07E-06	2,90E-06	9,41E-03	71,20
nuit 5	0,5	1,18E-06	1,11E-06	3,62E-03	185,11

Figure 87: calculs des niveaux de nuit équivalents pour le vidéoprojecteur Benq w4000

7.2.1. Support pour les polariseurs

Pour maintenir les polariseurs en position devant le vidéoprojecteur, nous avons demandé à une société spécialisée dans les prestations de systèmes optiques de développer un support spécifique adapté. Le schéma ci-dessous présente le support demandé (figure 88).

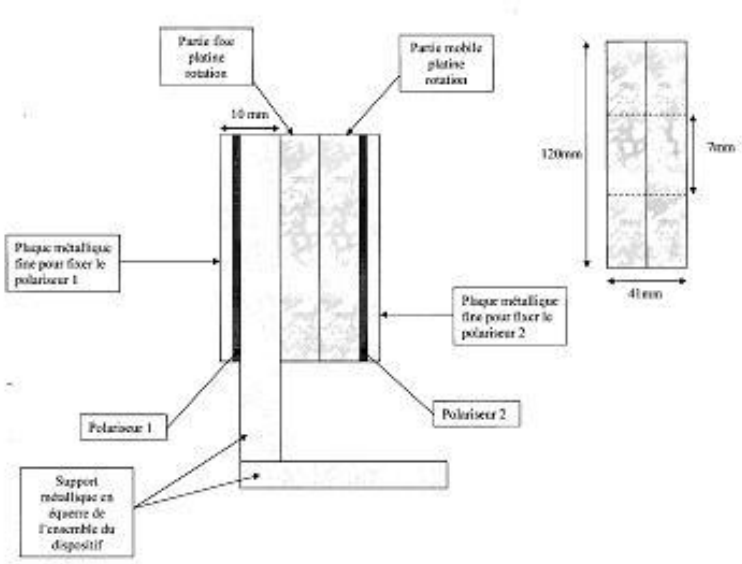


Figure 88: support fabriqué pour les polariseurs placé devant le vidéoprojecteur

7.2.2. Calcul du réglage des polariseurs et des niveaux de nuit

Une fois établi que le Benq w4000 permet de faire les niveaux de nuit 1 à 5, et le choix fixé sur l'utilisation de polariseurs pour atténuer la luminance, nous avons étalonné notre système vidéoprojecteur/polariseurs/surface de projection en fonction du type d'image affiché.

Pour cela, nous avons réalisé un étalonnage sur une image issue de nos vidéos et nous avons effectué 9 points mesures sur cette image (figure 89).

Ces mesures sont effectuées avec les polariseurs réglés pour avoir la luminance maximale (angle 213°20') et la luminance minimale (angle 303°20'). Elles sont effectuées sur les vidéos avec le filtre vert (pour les expérimentations de simulation) et sans le filtre (pour les conditions de stimulation). Les résultats de ces mesures sont résumés dans le tableau suivant (figure 90).

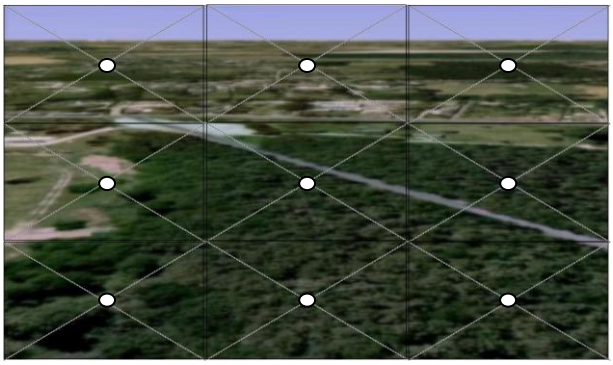


Figure 89: figure utilisée pour les mesures de luminance

Points de mesure	mlux	Luminance photopique	Moyenne lum.	Niveau de nuit
1	48,61	3,52E-01		
2	465,40	3,37E+00		
3	43,78	3,17E-01		
4	90,32	6,54E-01		
5	35,63	2,58E-01	167,52	nuit 1
6	74,57	5,40E-01		
7	126,50	9,16E-01		
8	314,87	2,28E+00		
9	307,97	2,23E+00		
1	3,87	2,80E-02		
2	4,96	3,59E-02		
3	0,84	6,10E-03		
4	0,19	1,40E-03		
5	0,14	1,00E-03	1,50	nuit 4
6	0,52	3,80E-03		
7	0,69	5,00E-03		
8	1,05	7,60E-03		
9	1,24	9,00E-03		

Points de mesure	mlux	Luminance photopique	Moyenne lum.	Niveau de nuit
1	1,91	1,38E-02		
2	0,35	2,50E-03		
3	6,28	4,55E-02		
4	3,55	2,57E-02		
5	2,97	2,15E-02	5,40	nuit 3
6	5,94	4,30E-02		
7	2,49	1,80E-02		
8	15,88	1,15E-01		
9	9,28	6,72E-02		
1				
2				
3				
4	Les valeurs sont trop faibles pour être détectées avec l'appareil de mesure			
5			0,50	nuit 5
6				
7				
8				
9				

Figure 90: mesures en 9 points effectués pour calibrer les polariseurs et les niveaux de nuit
En haut : les mesures avec l'image et le filtre vert (condition simulation) ; en bas : les mesures avec l'image sans filtre (condition stimulation).

Les niveaux de nuit équivalents obtenus en simulation et stimulation ne sont pas les mêmes. La différence provient de l'application du filtre vert dans le cas de la stimulation sans être toutefois capable d'expliquer comment l'application du filtre vert peut augmenter la luminance d'un tel facteur. Les expérimentations de simulation et de stimulation étant distinctes, cette différence ne pose aucun problème et elle est prise en considération.

Pour les expérimentations de stimulation, quand les polariseurs sont réglés pour obtenir la luminance la plus faible, le photomètre n'est pas assez sensible pour effectuer les mesures. Le ratio étant de 150 entre le niveau de luminance maximale et minimale pour la simulation, ce ratio doit être conservé pour la stimulation. Ce qui nous amène en théorie à une nuit 5 pour la luminance minimale en stimulation.

Ce type de mesures n'est sans doute pas forcément parfait sur le plan de la mesure optique pour plusieurs raisons. Tout d'abord, nous pouvons remarquer que les mesures varient entre les 9 points de mesures donc cela peut sembler incorrect d'effectuer une moyenne de ces points de mesures. Ensuite, les mesures de luminance obtenues pour la condition expérimentale « simulation » et celle de « stimulation » qui diffère uniquement par l'application du filtre vert (dans le cas de la simulation) sont très différents : dans le niveau de nuit le plus clair, nous avons une nuit 1 pour la simulation et une nuit 4 pour la stimulation.

Cependant, toutes choses étant égales par ailleurs, les sujets réalisant toutes les mesures dans des conditions similaires en simulation puis en stimulation, l'analyse comparative demeure pertinente. Les deux études étant totalement indépendantes l'une de l'autre, nous pouvons penser que cette méthode, même si elle n'est pas totalement rigoureuse, est suffisante pour mener des évaluations comparatives de différents systèmes.

Cela implique qu'il faut cependant reste prudent pour la comparaison des différentes vues.

8. Conclusion

Ce chapitre, sur la mise en place d'une application de simulation de vol en hélicoptère pour les expérimentations de simulation et de stimulation, présente principalement :

- les sept scénarii proposés parmi lesquels deux ont été implémentés pour les expérimentations ;
- l'application de simulation de vision nocturne avec les filtres permettant de modifier la qualité de l'image (contraste, contenu fréquentiel, luminance) ;
- l'interface expérimentateur développée pour l'application. ;
- les moyens de projection mis en place (vidéoprojecteur, polariseurs et surface de projection).

Le dispositif expérimental constitué par l'ensemble application informatique/projecteur permet donc en finale de réaliser dans des conditions satisfaisantes les deux types d'expérimentations envisagé (simulation et stimulation). Ces expérimentations utilisent donc les mêmes séquences vidéos mais différent par le traitement appliqué aux images. Pour la stimulation, les sujets utilisent des systèmes réels de vision nocturne et aucun filtre n'est appliqué sur les vidéos. Pour la simulation, le but est de simuler une image issue d'un DVN ce qui requiert le traitement des images présentées pour en modifier les caractéristiques.

- CHAPITRE 3 -

ETUDE EXPERIMENTALE

Les expérimentations ont été divisées en deux parties distinctes, dénommées « simulation » et « stimulation ». La dénomination « simulation » a été choisie car, dans cette partie expérimentale, il s'agit de simuler, à l'aide de filtres numériques et analogiques, les caractéristiques de l'image issue d'un DVN. Ceci afin d'évaluer la performance des sujets sur les différents tâches cognitives décrites précédemment. Par opposition, nous avons choisi d'appeler la seconde partie « stimulation » car l'expérimentation a alors pour but de tester la performance des sujets sur les mêmes types de tâches, en utilisant des systèmes de vision nocturne fonctionnels.

Initialement, il était prévu que la « simulation » soit considérée comme une phase préliminaire, validant la pertinence des différents scénarii ainsi que les métriques choisies. En raison du retard accumulé et de la disponibilité des sujets, il a été décidé de mener les deux expérimentations de manière simultanée plutôt que séparée.

Les participants, le matériel et une partie du protocole sont communs aux deux expérimentations. Les aspects communs seront donc présentés dans une première partie. Les conditions expérimentales particulières à chacune des expérimentations et les résultats obtenus feront l'objet de descriptions séparées.

Lors de la réalisation des expérimentations, seuls les scénarii « motopompe » et « montagne » ont été implémentés dans les délais disponibles pour les expérimentations. Seuls ces deux scénarii ont donc permis de recueillir des données expérimentales. Les résultats des expérimentations ne portent donc que sur ces deux cas. Le scénario « motopompe » permet de réaliser une tâche de détection d'objet et le scénario « montagne » permet de réaliser une tâche de reconnaissance/identification, rendant compte des capacités d'anticipation des participants, puis une tâche de prise de décision (initier une manœuvre c'est-à-dire un changement de direction).

1. Aspects communs aux deux expérimentations

1.1. Participants

Treize sujets ont participé à cette recherche. Onze d'entre eux ont été répartis dans le groupe « novice[16] » (n = 11) (tableau 34). Ces sujets avaient tous une acuité visuelle normale, sans astigmatisme et sans problème de phories. La possibilité de tester des experts étant plus difficile, la population du groupe « expert » est limitée (n = 2) (tableau 35). Les caractéristiques visuelles des sujets sont moins bonnes que celles des novices, ceci est, en particulier, lié à l'âge des experts et surtout au port de lunettes non renouvelées depuis plus de 3 ans pour un des pilotes.

Tous les participants sont naïfs par rapport à l'objectif des expérimentations

	Age (années)	Groupe	Sexe	Acuité Photopique	Acuité Mésopique
Sujet 1	26	N	H	12/10	12/10
Sujet 2	23	N	H	12/10	12/10
Sujet 3	20	N	H	12/10	12/10
Sujet 4	31	N	H	12/10	10/10
Sujet 5	22	N	F	12/10	12/10
Sujet 6	23	N	H	12/10	12/10
Sujet 7	24	N	H	12/10	12/10
Sujet 8	35	N	H	12/10	12/10
Sujet 9	24	N	H	10/10	12/10
Sujet 10	33	N	F	12/10	12/10
Sujet 11	23	N	F	12/10	12/10

Tableau 34 : caractéristiques du groupe de novices

[16] Par novices, nous parlons ici de personnes sans expérience dans le pilotage d'hélicoptère avec dispositif de vision nocturne. Un seul des sujets novices a déjà utilisé les DVN pour participer aux expérimentations sensorielles mais il n'a aucune connaissance sur le pilotage d'hélicoptère et sur l'utilisation d'information dans des images complexes.

	Age (années)	Groupe	Sexe	AP (Snellen)	AM (Snellen)	Heures vol	Heures JVN
Sujet 12	45	E	H	8/10	8/10	5800	2800
Sujet 13	37	E	H	12/10	12/10	2850	1250

Tableau 35 : caractéristiques du groupe d'experts

1.2. Matériel

Les expérimentations sont réalisées dans la salle noire de Thales Avionique Le Haillan. Le vidéo-projecteur est utilisé comme source lumineuse, calibré selon les mesures présentées dans la partie précédente. Les polariseurs sont utilisés pour obtenir les différents niveaux de nuit. Le vidéo-projecteur est relié à un ordinateur, équipé d'une souris et d'un clavier. L'ordinateur gère la passation des tests, avec l'intervention de l'expérimentateur pour lancer toutes les vidéos. Par contre, il gère automatiquement l'enregistrement des données. L'interaction des participants, c'est-à-dire leurs réponses, se fait à l'aide du clavier.

1.3. Procédure

Dans un premier temps, le sujet est placé dans l'obscurité pendant 10 minutes minimum, pour permettre l'adaptation rétinienne, en vision centrale. Ce laps de temps est utilisé pour donner les consignes informant le sujet du déroulement de l'ensemble de l'expérimentation. Quelques explications sont fournies en ce qui concerne les scénarii. Après adaptation, une vidéo d'entraînement est présentée pour chaque scénario, sans aucun filtre, avec un point de vue différent, afin de montrer au participant la tâche qu'il doit effectuer. Ce protocole demeure identique entre les deux groupes de sujets.

Chaque expérimentation se déroule comme suit :

- Le participant est placé à 6 mètres de la surface de projection. Une première série de mesures est réalisée en *nuit claire*[17]. Il s'agit de faire tout d'abord une mesure d'acuité visuelle ;
- Puis, le sujet est invité à visionner un premier scénario et à s'acquitter des tâches prescrites. Pour le scénario « motopompe », le participant doit appuyer sur les flèches du clavier pour indiquer la position de la motopompe dans la clairière au moment où il

[17] Les niveaux de nuit sont différents comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2 (« simulation » : *nuit 1* et *4* ; « stimulation » : *nuit 3* et *5*). Nous avons donc fait le choix de parler dans les aspects communs de nuit claire et nuit sombre pour simplifier le discours. Dans les parties expérimentales spécifiques, ce seront les niveaux de nuit spécifiques à chaque expérimentation qui seront utilisés.

la détecte (flèche de gauche si la motopompe est à gauche, flèche de droite quand la motopompe est à droite, flèche du haut ou du bas quand la motopompe est au centre). Pour le scénario « montagne », le sujet doit indiquer tout d'abord en appuyant sur la touche espace quand il détecte la vallée et indiquer verbalement l'orientation de la vallée. Puis, il doit appuyer sur les flèches du clavier pour indiquer le moment où il initie la manœuvre d'engagement dans la vallée.

- Les mêmes mesures sont répétées en *nuit sombre* (mesure d'acuité visuelle et tâches de détection et prise de décision à partir des scénarii).

1.4. Données recueillies

Plusieurs paramètres ont été mesurés pour évaluer la performance des sujets avec les vidéos :

- Le nombre de réponses globales, c'est-à-dire lorsque les sujets ont réussi ou non à donner une réponse en appuyant sur les différentes touches du clavier, qu'elle soit correcte ou non :
    - Pour le scénario motopompe, c'est l'appui sur les flèches du clavier et mesure du nombre de détections globales.
    - Pour le scénario montagne, deux appuis sur le clavier correspondant au nombre d'identifications globales et le nombre de prise de décisions globales.
    - A partir du nombre de réponses, les pourcentages de réponses sont calculés afin de pouvoir comparer plus facilement les résultats du groupe de novices et d'experts ;
- A chaque appui enregistré, c'est-à-dire à chaque réponse globale, est associé le temps d'appui sur la touche, en secondes (s) et millisecondes (ms), que ce soit :
    - le temps de détection pour le scénario motopompe ;
    - le temps d'identification et le temps de prise de décision pour le scénario montagne.
- Les réponses des sujets ont également été analysées en termes d'erreurs c'est-à-dire quand :
    - une position erronée a été indiquée de l'objet : c'est le nombre de détections correctes ou erronées ;

- Identification de manière incorrecte de la vallée ou manœuvre dans la mauvaise direction : nombre d'identifications ou de prises de décision correctes ou erronées ;
- Comme pour les réponses globales, les pourcentages de réponses sont calculés pour comparer les performances des deux groupes de sujets.

- Les sujets répondent en appuyant sur différentes touches du clavier selon les scénarii et la tâche à effectuer. Pour chaque appui de touche, on enregistre le temps de réponse :
  - temps des détections correctes et erronées pour le scénario motopompe,
  - temps des identifications et des prises de décision correctes et erronées pour le scénario montagne.

Ces paramètres sont mesurés en fonction des différents facteurs expérimentaux que sont la luminance, le contraste et la fréquence de coupure.
L'analyse statistique est réalisée à l'aide de tests paramétriques, les analyses de variances, et des analyses de corrélations R en z de Fisher.

2. Expérimentation en « Simulation »

2.1. Aspects méthodologiques spécifiques

L'expérimentation de « simulation » (SIM) vise à appréhender, selon le scénario utilisé, l'effet des différents facteurs que sont le contraste, la fréquence de coupure et la luminance sur la détection d'objets ou la prise de décision dans des scènes complexes.
Le niveau de nuit le plus haut utilisé dans cette expérimentation correspond à la *nuit 1* tandis que le niveau plus bas le correspond à la *nuit 4*.
Dans les deux cas, il n'y a pas utilisation de systèmes fonctionnels de vision nocturne mais seulement l'application d'un filtre numérique simulant l'image issue d'un DVN (application du filtre vert). Des filtres passe bas (« BlurMask ») et contraste sont utilisés pour modifier la fréquence de coupure et le niveau de contraste de l'image, afin de mesurer l'impact de ces facteurs sur la performance des sujets.
Quatre recueils de données sont réalisés pour chaque scénario, correspondant à quatre configurations :

- deux contrastes (C = 100% et C = 60%) ;

- deux fréquences de coupure (Fc = 1,0 cy/mrad et Fc = 1,3 cy/mrad).

Les mesures sont réalisées en *nuit 1* et *nuit 4*.

Pour les deux scénarii, il y a donc 8 configurations testées. L'ordre de passage des configurations n'a pas été contre-balancé en fonction des niveaux de nuit, en raison de la nécessité de conserver l'adaptation rétinienne. Le contre-balancement aurait augmenté de manière non négligeable la durée des expérimentations. Cependant, un tirage aléatoire des configurations a été réalisé pour chaque scénario et chaque niveau de nuit. Ces configurations sont résumées dans les tableaux 36 et 37.

Motopompe	
Nuit 1	*Nuit 4*
Contraste 100% - fréquence 1,0 cy/mrad	Contraste 60% - fréquence 1,3 cy/mrad
Contraste 60% - fréquence 1,0 cy/mrad	Contraste 100% - fréquence 1,0 cy/mrad
Contraste 60% - fréquence 1,3 cy/mrad	Contraste 60% - fréquence 1,0 cy/mrad
Contraste 100% - fréquence 1,3 cy/mrad	Contraste 100% - fréquence 1,3 cy/mrad

Tableau 36 : résumé des configurations testées pour le scénario motopompe

Montagne	
Nuit 1	*Nuit 4*
Contraste 100% - fréquence 1,3 cy/mrad	Contraste 100% - fréquence 1,3 cy/mrad
Contraste 100% - fréquence 1,0 cy/mrad	Contraste 60% - fréquence 1,3 cy/mrad
Contraste 60% - fréquence 1,3 cy/mrad	Contraste 60% - fréquence 1,0 cy/mrad
Contraste 60% - fréquence 1,0 cy/mrad	Contraste 100% - fréquence 1,0 cy/mrad

Tableau 37 : synthèse des huit configurations testées pour le scénario montagne

2.2. Résultats

2.2.1. Scénario « Motopompe »

Les résultats présentés sont une comparaison des performances des novices et des experts en exploitant les données recueillies sur les différents paramètres : le nombre de réponses globales et le temps de détection de ces réponses, le nombre de réponses correctes, le temps de détection des réponses correctes et erronées. Ces résultats sont exprimés en fonction du niveau de nuit, de contraste et de la fréquence de coupure.

2.2.1.1. Données globales

(a) Pourcentage de réponse

Il faut bien comprendre ici qu'il s'agit des pourcentages de réponses, qu'elles soient pertinentes ou non. C'est-à-dire que l'objet ait été détecté d'une manière correcte ou erronée.

	Pourcentage de réponse (%)							
	Nuit 1				***Nuit 4***			
	C 100%		**C 60%**		**C 100%**		**C 60%**	
	Fc 1,3	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***
Novices	63,6	100	90,9	100	36,4	36,4	36,4	18,2
Experts	100	100	100	100	100	50	100	50

Tableau 38 : pourcentage de détection pour le scénario motopompe (SIM)

Le pourcentage de réponses (exprimé en %) est calculé sur l'ensemble des réponses données par tous les sujets, pour les deux groupes de sujets, en fonction du niveau de nuit, de niveau de contraste et du contenu fréquentiel de l'image. C : contraste exprimée en pourcentage (%) ; Fc : fréquence de coupure, exprimée en cycles par milliradian (cy/mrad).

Le tableau 38 présente les pourcentages de réponses des sujets, c'est-à-dire les pourcentages de détections effectuées, en fonction des groupes. Il s'agit d'une analyse globale des réponses. Les détections comptabilisées ici ne prennent pas en considération si l'objet détecté est la motopompe ou une erreur.

En *nuit 1* :

- Dans le groupe des novices, on constate paradoxalement que les sujets ont un pourcentage de réponse plus faible quand le contraste est maximal (100%) et la fréquence de coupure fixée à 1,3 cy/mrad. Cette caractéristique est retrouvée pour la condition de contraste à 60%, avec une moindre différence.
- Le groupe d'experts détecte la cible, quel que soit le contraste et la fréquence de coupure.

En *nuit 4* :

- On observe un effondrement du pourcentage de détection dans la population de novices, par rapport à la *nuit 1*. Le pourcentage de détection des novices demeure équivalent, quand la fréquence de coupure est fixée à 1,3 ou à 1,0 cy/mrad, lorsque le contraste est à 100%. Pour un contraste à 60%, on observe des valeurs identiques aux précédentes pour la fréquence à 1,3 cy/mrad, mais diminuées de moitié avec une fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad.
- Dans le groupe d'experts, les performances sont équivalentes avec la fréquence de coupure à 1,3 y/mrad. Avec une fréquence à 1,0 cy/mrad, on observe que le pourcentage de réponse est divisé par deux, aussi bien pour un contraste à 100% qu'à

60%. Compte tenu de l'effectif, le chiffre de 50% doit être relativisé. Il faut préciser que les absences de réponse sont réparties entre les deux pilotes (100% et 60%).

(b) Temps de réponse

L'ensemble des détections effectuées a ensuite été analysé globalement, en termes de temps de réponse, que les réponses soient « correctes » ou « erronées » (tableau 39).

		Temps de détection (s et ms)							
		Nuit 1				***Nuit 4***			
		C 100%		**C 60%**		**C 100%**		**C 60%**	
		Fc 1,3	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***
Novices	μ	27,221	22,204	25,433	22,876	28,344	26,663	30,138	30,083
	σ	3,238	6,591	3,783	2,683	4,529	4,801	4,600	3,183
Experts	μ	31,226	26,735	23,879	25,342	33,985	31,969	33,291	34,582
	σ	3,461	8,767	7,432	9,501	0,932	0,000	0,158	0,000

Tableau 39 : temps de détection pour le scénario motopompe (SIM)

Le temps de détection, exprimé en secondes (s) et millisecondes (ms), est calculé sur l'ensemble des réponses données par tous les sujets, pour les deux groupes de sujets, en fonction du niveau de nuit, de niveau de contraste et du contenu fréquentiel de l'image. C : contraste exprimée en pourcentage (%) ; Fc : fréquence de coupure, exprimée en cycles par milliradian (cy/mrad).

Il apparaît que les novices ont des temps de réponses généralement plus faibles que celui des experts, sauf dans la condition « nuit 1- contraste 60% - fréquence 1,3 cy/mrad ».

En *nuit 1*, aussi bien les novices que les experts ont des temps de réponses inférieurs avec un contraste à 60%, par rapport au contraste 100%. Cet effet est particulièrement marqué pour la fréquence de coupure à 1,3 cy/mrad. Mais, il est également présent, à un degré moindre, à 1,0 cy/mrad.

En *nuit 4 :*

- Les temps de réponses des novices sont supérieurs à ceux obtenus en *nuit 1*. En revanche, ils sont inférieurs avec un contraste à 100% par rapport à 60%.
- Pour le groupe d'experts, les différences observées en temps de réponses sont relativement minimes. Il faut remarquer ici, comme dans la partie sur le pourcentage de réponses, que l'absence de réponses dans le groupe « expert » explique l'absence de variabilité (pas d'écart type).

2.2.1.2. Analyse des réponses correctes et erronées

Les réponses ont été ensuite analysées afin de séparer les détections correctes des détections erronées (tableau 13). La position de la motopompe étant connue, pour chaque condition dans l'application, la réponse des sujets pouvait donc être contrôlée et reportée sur

le fichier de données sortant. Le but est de vérifier si la détection effectuée par les sujets est pertinente.

(a) Pourcentages des réponses correctes et erronées

		Pourcentage de réponse							
		Nuit 1				***Nuit 4***			
		C 100%		**C 60%**		**C 100%**		**C 60%**	
		Fc 1,3	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***
Novices	**Correctes**	54,5	90,9	90,9	90,9	18,2	0	9,1	9,1
	Erronées	9,1	9,1	0	9,1	18,2	36,4	27,3	9,1
Experts	**Correctes**	100	100	50	100	100	0	100	50
	Erronées	0	0	50	0	0	50	0	0

Tableau 40 : pourcentage de détection correcte et erronée, pour le scénario motopompe (SIM)

Le pourcentage de réponses (exprimé en %) est calculé sur l'ensemble des réponses données par tous les sujets, pour les deux groupes de sujets, en fonction du niveau de nuit, de niveau de contraste et du contenu fréquentiel de l'image. C : contraste exprimée en pourcentage (%) ; Fc : fréquence de coupure, exprimée en cycles par milliradian (cy/mrad). Il faut noter ici que les valeurs à zéro témoignent soit d'une absence de réponse soit d'une absence d'erreurs (score < 100%).

Les résultats du tableau 40 montrent que, globalement, sur l'ensemble des 8 conditions testées, les novices réalisent, en pourcentage, plus d'erreurs de détections que les experts. Les experts ne commettent que deux détections erronées, alors que les novices font des erreurs pratiquement dans toutes les conditions (7 sur 8), avec des pourcentages qui vont jusqu'à plus de 30%, dans une condition.

En *nuit 1* :

- En condition de contraste 100%, les novices ne font pas plus de détections incorrectes 1,0 ou 1,3 cy/mrad. Cependant, on remarque que le pourcentage de bonnes réponses à 1,3 cy/mrad est bien inférieur à celui observé à 1,0 cy/mrad. Pour le contraste à 60% et la fréquence à 1,3 cy/mrad, on note l'absence de détections erronées mais également l'existence d'absence de réponses.
- Les experts ne réalisent qu'une détection erronée dans la condition « contraste 60% - fréquence de coupure 1,3 cy/mrad ».

En *nuit 4* :

- Les novices font plus de détections erronées en *nuit 4* par rapport à la *nuit 1*. Le taux de détections erronées devient alors globalement supérieur aux détections correctes. Dans la condition de contraste à 100%, et avec la fréquence de coupure à 1,3 cy/mrad, les novices font relativement moins d'erreurs par rapport à la condition à 1,0 cy/mrad où toutes les détections effectuées sont erronées. Avec un contraste à 60%, le

pourcentage de bonnes détections devient très faible (Fc 1,3 cy/mrad et Fc 1,0 cy/mrad : μ = 9,1%) et le taux de réponses erronées est très important.

- Bien que les pilotes experts soient affectés par la condition de *nuit 4*, on constate que le pourcentage de détections correctes est à 100% pour la fréquence à 1,3 cy/mrad, aussi bien pour le contraste à 100% qu'à 60%. En revanche, il n'y a pas de bonnes détections pour le contraste 100% à une fréquence de coupure de 1,0 cy/mrad et seulement 50% de détections correctes pour la fréquence 1,3 cy/mrad.

(b) Temps de réponse

Comme pour les détections globales, les détections correctes et erronées ont été analysées en fonction du temps de réponse, que l'on appelle ici temps de détection. Les conditions menant à un pourcentage de détections incorrectes nul apparaissent grisées dans le tableau (tableau 41). Dans ce cas, les sujets n'ont pas donné de réponses.

On retrouve, globalement, dans les temps de détection, des tendances déjà identifiées, en particulier, le fait que les novices ont des temps de réponses correctes inférieurs à ceux des experts (tableau 41).

			Temps de détection (s)							
			Nuit 1				***Nuit 4***			
			C 100%		**C 60%**		**C 100%**		**C 60%**	
			Fc 1,3	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***
Novices	**Correctes**	μ	28,052	23,892	25,154	23,272	28,689		24,054	32,333
		σ	2,603	3,663	3,783	2,772	7,789		0,000	0,000
	Erronées	μ	22,233	5,317		21,314	27,778	26,663	32,165	27,832
		σ	0,000	0,000		0,000	0,138	4,801	2,659	0,000
Experts	**Correctes**	μ	31,226	26,735	18,624	25,342	33,985		33,291	34,582
		σ	3,461	8,767	0,000	9,501	0,932		0,158	0,000
	Erronées	μ			29,134			31,969		
		σ			0,000			0,000		

Tableau 41 : temps de détection correcte et erronée de la motopompe (SIM)

Le temps de détection, exprimé en secondes (s) est calculé sur l'ensemble des réponses données par tous les sujets, pour les deux groupes de sujets, en fonction du niveau de nuit, de niveau de contraste et du contenu fréquentiel de l'image. C : contraste exprimée en pourcentage (%) ; Fc : fréquence de coupure, exprimée en cycles par milliradian (cy/mrad).

D'une manière générale, pour les réponses incorrectes, il est difficile de dégager des tendances pour le groupe de novices et pour les experts. Le temps de réponse des experts apparait généralement supérieur à celui des novices dans les conditions de détections erronées, bien qu'il n'existe pas de différence flagrante avec les temps de réponses correctes. En *nuit 1* :

- Pour les novices, quand les fréquences spatiales sont coupées à partir de 1,0 cy/mrad, la différence est très faible entre les niveaux de contraste. Le tableau 14 indique cependant que les novices sont plus rapides quand ils font des détections erronées par rapport aux cas où ils ne font pas d'erreurs. Chez les experts, il n'y a pas de différence de temps de détection de la motopompe entre les deux niveaux de contraste, quand la fréquence est fixée à 1,0 cy/mrad. Par contre, quand la fréquence est réglée à 1,3 cy/mrad, les experts ont des temps de réponses correctes plus rapides dans la condition de contraste à 60%.

En *nuit 4* :

- Pour la population de sujets novices et pour la fréquence de coupure 1,3 cy/mrad, le temps de détections correctes de la motopompe est proche de celui mesuré en *nuit 1*, pour les deux niveaux de contraste. Si la scène est filtrée à 1,0 cy/mrad et le contraste à 100%, on constate que les novices ne réalisent aucune détection correcte. Pour un contraste à 60%, les temps de détections correctes mesurés deviennent importants.
- Pour les experts, il y a peu de différence dans les temps de détection correctes, quelle que soit la condition.

2.2.1.3. Analyse statistique

(a) Analyse de variance : Effets simples

Les résultats indiquent trois effets simples :

- Il y a un effet groupe (novices vs. experts) sur le nombre de réponses ($F(1,88) = 6,93$; $p < 0,01$), le nombre de réponses correctes ($F(1,88) = 10,49$; $p < 0,005$), le temps de détection des réponses ($F(1,88) = 12,05$; $p < 0,0005$) et celui des réponses correctes ($F(1,88) = 14,64$; $p < 0,0005$).
    - Sur l'ensemble de ces données, on constate que les experts répondent plus fréquemment que les novices.
    - En revanche, leurs temps de réponses sont supérieurs à ceux des novices.
    - Ils donnent aussi plus de réponses correctes que les novices.
    - Le temps de réponse des détections correctes chez les experts est supérieur à celui des novices.
- Il y a un effet du niveau de nuit (*nuit 1* vs. *nuit 4*) sur le nombre de réponses ($F(1,88) = 11,86$; $p < 0,001$), le nombre de réponses correctes ($F(1,88) = 28,71$; $p < 0,0001$),

le temps de détection des réponses ($F(1,88) = 13,28$; $p = 0,0005$) et celui des réponses correctes ($F(1,88) = 14,05$; $p < 0,0005$).

- L'ensemble des sujets donne plus de réponses en *nuit 1* qu'en *nuit 4.*
- Ils ont des temps de détection inférieurs en *nuit 1* par rapport à la *nuit 4*.
- Les sujets donnent plus de réponses correctes en *nuit 1*.
- Les temps mesurés sont plus faibles en *nuit 1* par rapport à la *nuit 4*.

- Il y a un effet de la fréquence de coupure sur le temps de détection des réponses ($F(1,88) = 5,52$; $p < 0,05$) et celui des réponses correctes ($F(1,88) = 7,61$; $p < 0,01$).
  - Les temps de détection des réponses globales et ceux des réponses correctes sont inférieurs quand la fréquence de coupure est fixée à 1,0 cy/mrad plutôt qu'à 1,3 cy/mrad pour l'ensemble des sujets.
- Il n'y a pas d'effet du contraste sur les variables mesurées (nombre de réponses, temps de détection des réponses, nombre de réponses correctes, temps de détection des réponses correctes, temps de détection des réponses erronées : $F(1, 88) < 1$, ns).

(b) Analyse de variance : Interactions

Les résultats mettent en évidence plusieurs interactions :

- Il y a une interaction entre le niveau de nuit et la fréquence de coupure pour le nombre de réponses ($F(1,88) = 4,10$; $p < 0,05$) et le nombre de réponses correctes ($F(1,88) = 12,17$; $p < 0,001$).
  - En *nuit 1*, la fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad, aussi bien pour le nombre de réponses globales que pour les réponses correctes, permet d'obtenir plus de détections qu'à 1,3 cy/mrad pour l'ensemble des sujets.
  - En *nuit 4*, quelle que soit la fréquence de coupure, il n'y a pas de différence en termes de nombre de réponses (globales et correctes) dans l'ensemble des conditions évaluées.
- Il existe une interaction entre le facteur groupe et le niveau de nuit sur le nombre de réponses correctes ($F(1,88) = 6,85$; $p < 0,05$) et le temps de détection des réponses correctes ($F(1,88) = 4,15$; $p < 0,05$).
  - Les novices donnent plus de réponses correctes en *nuit 1* qu'en nuit 4.

- Les experts donnent globalement autant de réponses correctes dans les deux conditions de nuit.

- Il y une interaction entre le niveau de nuit et le niveau de contraste sur le temps de détection des réponses correctes ($F(1,88) = 6,65$; $p < 0,05$).
  - En *nuit 1*, l'ensemble des sujets émet une détection plus rapide lorsque le contraste est fixé à 60% plutôt qu'à 100%.
  - En *nuit 4*, les sujets ont des temps de réponse équivalents, quel que soit le niveau de contraste.
- Il y a une interaction entre le niveau de contraste et la fréquence de coupure sur le temps de détection des réponses correctes ($F(1,88) = 5,35$; $p < 0,05$).
  - Les sujets ont des temps de détections correctes inférieurs avec un contraste à 100% et une fréquence de coupure à 1,3 cy/mrad plutôt qu'à 1,0 cy/mrad.
  - Avec un contraste à 60%, il n'y a pas de différence entre les temps des réponses correctes, quelle que soit la fréquence de coupure.

(c) Analyse de corrélations

Il existe trois corrélations entre différentes variables :

- une entre le nombre de réponses et celui de réponses correctes ($p < 0.0001$),
- une entre le temps de détection des réponses et celui des réponses erronées ($p < 0.0001$),
- une dernière entre le temps de détection et celui des réponses correctes ($p < 0.0001$).

2.2.2. Scénario « Montagne »

2.2.2.1. Données globales

Le scénario « montagne » comporte deux phases :

- la 1e phase correspond à l'identification de la vallée (« il y a une vallée ») et de son orientation (« droite ou gauche »);
- la 2e phase implique plus clairement un processus de prise de décision correspondant à l'engagement à droite ou à gauche, dans la vallée identifiée par les sujets.

Comme dans le scénario « motopompe », les résultats ont d'abord été analysés, sans prendre en compte les erreurs des sujets. Les résultats présentés dans le tableau 42 présentent les réponses globales, exprimées en pourcentage.

Pour la 1e phase, le pourcentage de réponse est acquis par l'appui sur la barre d'espace du clavier et le rapport verbal d'orientation simultané. Pour la phase de décision, le pourcentage de réponse est fondé sur l'appui sur le pavé directionnel et l'existence de la manœuvre d'engagement dans la vallée.

(a) Pourcentage de réponse

Dans la 1e phase, les novices et les experts détectent globalement bien la vallée et son orientation. En *nuit 1* :

- Pour le groupe de novices, seul un sujet ne parvient pas à identifier la vallée, en condition « contraste 100% - fréquence 1,0 cy/mrad » et « contraste 60% - fréquence 1,3 cy/mrad ».
- Le groupe d'expert identifie toujours l'existence de la vallée.

		Pourcentage de réponse (%)							
		Nuit 1				***Nuit 4***			
		C 100%		**C 60%**		**C 100%**		**C 60%**	
		Fc 1,3	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***
Phase 1 Identification	**Novices**	100	90,9	90,9	100	100	100	100	100
	Experts	100	100	100	100	100	50	100	100
Phase 2 Décision	**Novices**	100	72,7	81,8	100	90,9	63,6	100	81,8
	Experts	100	100	100	100	50	50	100	50

Tableau 42 : pourcentage de réponses pour le scénario montagne (SIM)

Le pourcentage de réponses (exprimé en %) est calculé sur l'ensemble des réponses données par tous les sujets, pour les deux groupes de sujets, en fonction de la phase du scénario, du niveau de nuit, de niveau de contraste et du contenu fréquentiel de l'image. La phase 1 correspond à l'identification de la vallée et de son orientation ; la phase 2 à l'engagement sur la gauche ou la droite, dans la vallée donc au mouvement.

C : contraste exprimée en pourcentage (%) ; Fc : fréquence de coupure, exprimée en cycles par milliradian (cy/mrad).

En *nuit 4* :

- L'ensemble des novices donne une réponse d'identification la vallée.
- On constate que l'un des expert n'identifie pas l'orientation de la vallée dans la condition « contraste 100% - fréquence 1,0 cy/mrad ».

Dans la phase de prise de décision, en *nuit 1* :

- Le pourcentage d'action d'engagement dans la vallée est pour les novices est assez largement inférieur au résultat obtenu en identification. Particulièrement pour la

condition « contraste 100% - fréquence 1,0 cy/mrad » et « contraste 60% - fréquence 1,3 cy/mrad ». On constate, dans ce groupe, que certains sujets n'ont pas réussi à déterminer le moment où ils pouvaient s'engager dans la vallée.

- Dans le groupe d'experts, pour l'ensemble des conditions en *nuit 1*, la décision d'engagement dans la vallée est toujours obtenue.

En *nuit 4* :

- Pour le groupe de novices, les pourcentages de prises de décisions chutent considérablement, particulièrement pour la condition « contraste 100% - fréquence de coupure 1,0 cy/mrad. Pour le contraste à 60%, les résultats sont légèrement supérieurs.
- Pour le groupe d'experts, les pourcentages de prise de décision diminuent deviennent inférieurs aux pourcentages d'identification de la vallée sauf dans la condition « contraste 60% - fréquence 1,3 cy/mrad ».

(b) Temps de réponse

De la même manière, les réponses globales ont été analysées en termes de temps de réponses, pour la phase d'identification (tableau 43) et de prise de décision (tableau 44).

		Phase 1 : Temps d'identification (s et ms)							
		Nuit 1				***Nuit 4***			
		C 100%		**C 60%**		**C 100%**		**C 60%**	
		Fc 1,3	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***
Novices	μ	14,567	25,862	18,099	12,775	29,213	24,793	23,760	39,268
	σ	16,172	15,680	14,074	11,633	13,705	13,404	12,758	12,655
Experts	μ	24,736	27,320	24,045	17,711	36,980	19,158	19,518	49,506
	σ	5,169	13,462	0,663	11,814	5,694	0,000	12,277	8,555

Tableau 43 : temps d'identification de la vallée (SIM)

Le temps d'identification, exprimé en secondes (s) et millisecondes (ms) est calculé sur l'ensemble des réponses données par tous les sujets, par les deux groupes de sujets, en fonction du niveau de nuit, de niveau de contraste et du contenu fréquentiel de l'image. C : contraste exprimée en pourcentage (%) ; Fc : fréquence de coupure, exprimée en cycles par milliradian (cy/mrad).

Les analyses de ces deux phases seront présentées successivement.

La 1^{e} constatation est que les déviations standards des novices, sont très importantes (tableau 16) et que les résultats sont donc à prendre avec certaines précautions.

En *nuit 1* :

- Dans le groupe de novices, pour le contraste à 100%, l'identification de la vallée est obtenue plus rapidement lorsque la fréquence est à 1,3 cy/mrad par rapport à 1,0

cy/mrad. En revanche, pour le contraste à 60%, c'est la fréquence à 1,0 cy/mrad qui permet apparemment d'obtenir les temps de réponse les plus courts.

- Le groupe d'experts, en dépit de son faible effectif, montre une variabilité interindividuelle globalement moins importante que les novices. D'une manière générale, le temps d'identification de la vallée est plus important avec un contraste à 100% qu'à 60%. Pour la fréquence à 1,3 cy/mrad, on constate que les valeurs recueillies en termes de temps de d'identification sont très proches. En revanche, pour la fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad, les résultats obtenus indiquent que les temps d'identification sont meilleurs avec un contraste à 60%.

Dans la condition de *nuit 4* :

- On observe que les novices ont globalement des temps de réponse plus importants, pour l'identification de la vallée, en contraste 60% par rapport au contraste 100%, surtout avec la fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad. Les écarts apparaissent moins importants entre les fréquences de coupures pour la condition de contraste à 100%.

- Pour les experts, les temps d'identifications les plus courts sont observés pour la fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad et un contraste de 100%. Pour la même fréquence de coupure, les temps de réponse apparaissent supérieurs avec un contraste à 60%.

		Phase 2 : Temps de prise de décision (s et ms)							
		Nuit 1				***Nuit 4***			
		C 100%		**C 60%**		**C 100%**		**C 60%**	
		Fc 1,3	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***
Novices	μ	51,752	41,995	57,477	47,631	46,278	46,491	52,398	55,893
	σ	9,872	18,103	5,924	15,375	20,454	11,007	17,666	12,124
Experts	μ	60,320	59,368	65,615	61,473	61,367	52,921	63,199	63,488
	σ	7,825	4,944	2,819	0,384	0,000	0,000	0,453	0,000

Tableau 44 : temps de prise de décision pour s'engager dans la vallée (SIM)

Le temps de prise de décision, exprimé en secondes (s) et millisecondes (ms) est calculé sur l'ensemble des réponses données par tous les sujets, par les deux groupes de sujets, en fonction du niveau de nuit, de niveau de contraste et du contenu fréquentiel de l'image. C : contraste exprimée en pourcentage (%) ; Fc : fréquence de coupure, exprimée en cycles par milliradian (cy/mrad).

Dans le processus de prise de décision (tableau 44), le clivage entre les groupes novices et experts s'accentue considérablement pour l'aspect temps de réponse. On observe clairement que, pour toutes les conditions, les temps de réponse des experts sont systématiquement supérieurs à ceux des novices.

En *nuit 1* :

- Quelle que soit la fréquence de coupure, les temps de prise de décision des novices sont plus élevés avec un contraste à 60% par rapport au contraste à 100%. Quel que soit la condition de contraste, leurs temps de réponse pour la décision sont plus faibles avec la fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad par rapport à 1,3 cy/mrad.
- Dans le groupe d'experts, on retrouve une tendance à des temps de décision plus longs avec un contraste à 60%, pour les deux fréquences de coupure (tableau 17). Les temps de réponse pour le contraste à 100% sont pratiquement équivalents pour les deux fréquences de coupure. Il existe une légère différence pour la condition de contraste à 60% où la fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad génère des temps de réponse inférieurs par rapport à la fréquence à 1,3 cy/mrad.

En *nuit 4* :

- Dans le groupe des novices, les temps de réponse pour la décision suivent la tendance observée en *nuit 1,* avec des temps plus courts pour le contraste à 100% qu'à 60%. Ce résultat ne semble pas dépendant du contenu en fréquences spatiales. Avec un contraste à 60%, ils ont des temps de prise de décision plus élevés avec la fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad.
- Dans cette condition, les résultats obtenus sont très fragmentaires pour les experts. En effet, on constate que dans la condition de contraste 100%, seul un pilote est en mesure de fournir une réponse. Pour le contraste à 60% et la fréquence de coupure à 1,3 cy/mrad, les deux pilotes émettent une réponse. En revanche, un seul est capable de donner une réponse de décision avec une fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad.

2.2.2.2. <u>Analyse des réponses correctes et erronées</u>

(a) Pourcentages de réponses correctes et erronées

Les réponses des sujets ont été étudiées en détail afin de mettre en évidence l'existence d'identifications et de prises de décisions correctes ou erronées (tableau 45). Les réponses sont vérifiées différemment pour les deux phases du scénario :

- pour la 1^{e} phase (celle d'identification), l'appui sur barre d'espace et les réponses orales données par les sujets servent de vérification ;
- pour la 2^{e} phase, c'est l'appui sur les touches directionnelles, (flèches du clavier) qui permettent de valider la pertinence des réponses.

Dans la phase d'identification de la vallée et de son orientation (tableau 45), en *nuit 1 :*

- Les novices ne donnent aucune réponse erronée dans deux conditions : « contraste 100% - fréquence 1,3 cy/mrad », « contraste 60% - fréquence 1,0 cy/mrad ». Un seul sujet fait une erreur dans la condition « contraste 60% - fréquence 1,3 cy/mrad » (tableau 18). Dans le groupe des novices, les erreurs surviennent principalement (μ = 36,4%) avec le contraste à 100% et la fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad.
- De leur côté, les experts commettent des erreurs, uniquement quand le contraste est à 100% et la fréquence de coupure à 1,3 cy/mrad.

			Pourcentage de réponse (%)							
			Nuit 1				***Nuit 4***			
			C 100%		**C 60%**		**C 100%**		**C 60%**	
			Fc 1,3	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***	***Fc 1,3***	***Fc 1,0***
Phase 1 Identification	**Novices**	**Correctes**	100	54,5	81,8	100	72,7	90,9	100	81,8
		Erronées	0	36,4	9,1	0	27,2	9,1	0	18,2
	Experts	**Correctes**	50	100	100	100	0	50	100	100
		Erronées	50	0	0	0	100	0	0	0
Phase 2 Décision	**Novices**	**Correctes**	100	45,4	72,7	63,6	63,6	54,5	100	72,7
		Erronées	0	27,3	9,1	36,4	27,3	9,1	0	9,1
	Experts	**Correctes**	100	100	100	100	50	50	100	50
		Erronées	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 45 : pourcentage de réponses correctes et erronées, pour le scénario montagne (SIM)

Le pourcentage de réponses (exprimé en %) est calculé sur l'ensemble des réponses données par tous les sujets, pour les deux groupes de sujets, en fonction des phases du scénario, du niveau de nuit, de niveau de contraste et du contenu fréquentiel de l'image. C : contraste exprimée en pourcentage (%) ; Fc : fréquence de coupure, exprimée en cycles par milliradian (cy/mrad).

En *nuit 4* :

- Les novices identifient tous la vallée sans erreur dans la condition « contraste 60% - fréquence 1,3 cy/mrad ». Dans le groupe des novices, on observe des erreurs dans les autres conditions, mais les identifications correctes restent supérieures aux réponses erronées. Avec un contraste à 100%, c'est avec la fréquence de coupure à 1,3 cy/mrad que ce groupe de novices fait le plus d'identifications erronées. Quand le niveau de contraste est à 60%, ils font par contre plus d'erreurs avec la fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad.
- En *nuit 4*, les experts ne font aucune erreur avec le niveau de contraste le plus faible (à 60%). En revanche, ils n'ont aucune détection correcte dans la condition contraste 100% - fréquence de coupure 1,3 cy/mrad et seul un des deux pilotes donne une réponse correcte à 1,0 cy/mrad.

Dans la 2^{e} phase, en *nuit 1* :

- L'ensemble des novices parviennent à réaliser la manœuvre d'engagement dans la vallée sans erreurs, dans la condition « contraste 100% - fréquence de coupure 1,3 cy/mrad ». Dans la condition « contraste 60% - fréquence 1,0 cy/mrad », là où les novices ne faisaient pas d'erreurs de détection, on constate une dégradation sensible au niveau de la prise de décision avec un pourcentage notable de réponses erronées (μ = 36,4%). On observe également que la condition « contraste 60% - fréquence de coupure 1,3 cy/mrad » génère un pourcentage de réponses correctes supérieur aux deux conditions où la fréquence de coupure est à fréquence 1,0 cy/mrad. Les erreurs d'identification initiales semblent dans ce cas globalement suivies sur la prise de décision. Ceci, sauf pour un novice qui, dans la condition « contraste 100% - fréquence 1,0 cy/mrad » parvient à corriger l'erreur initiale d'identification.
- En ce qui concerne les experts (tableau 45), les pilotes ne commettent aucune erreur. L'un des pilotes, qui commet une erreur d'identification dans la condition « contraste 100% - fréquence 1,3 cy/mrad », réussit à corriger son erreur initiale d'identification à la phase de prise de décision.

En *nuit 4 :*

- Le groupe de novices ne fait pas de réponses erronées à la prise de décision dans la condition « contraste 60% - fréquence de coupure 1,3 cy/mrad » (tableau 45). Pour la même fréquence de coupure, avec un contraste de 100%, on observe des réponses erronées, essentiellement dans la tâche initiale d'identification (μ = 23,7%). Avec une fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad, comme pour la fréquence de coupure à 1,3cy/mrad, les novices ont, avec un contraste à 60%, un pourcentage de réponses correctes supérieur à celui de la condition contraste 100%. On constate une décroissance du nombre de réponses, surtout avec le contraste 100%, associée à une réduction du nombre de réponses erronées (μ = 9,1% pour la fréquence 1,0 cy/mrad).
- Les pilotes experts accomplissent tous deux correctement la tâche de prise de décision dans la condition « contraste 60% - fréquence de coupure 1,3 cy/mrad ». Pour le même filtrage spatial et un contraste à 100%, les deux pilotes identifient incorrectement l'orientation de la vallée (rapport verbal). L'un des pilotes (celui qui a la meilleure acuité visuelle) parvient toutefois à corriger son erreur initiale et à prendre une décision correcte pour l'engagement dans la vallée. Dans la condition fréquence de coupure 1,0 cy/mrad, aussi bien avec un contraste 100% qu' 60%, seul ce même pilote parvient à donner des réponses correctes.

(b) Temps des réponses correctes et erronées

Les réponses correctes et erronées ont été analysées dans le domaine temporel, pour les deux phases du scénario, en termes de temps d'identification et de temps de prise de décision (tableau 46).

				Temps de réponse (s et ms)							
				Nuit 1				*Nuit 4*			
				C 100%		C 60%		C 100%		C 60%	
				Fc 1,3	*Fc 1,0*	*Fc 1,3*	*Fc 1,0*	*Fc 1,3*	*Fc 1,0*	*Fc 1,3*	*Fc 1,0*
Phase 1 Identification	**Novices**	**Correctes**	μ	14,567	24,526	21,164	10,950	29,474	30,108	23,760	38,915
			σ	16,172	16,668	16,066	12,832	11,399	12,438	12,758	12,913
		Erronées	μ		32,233	8,708	15,968	28,153	6,493		40,883
			σ		14,835	0,000	10,020	23,378	0,000		0,000
	Experts	**Correctes**	μ	28,391	27,320	24,045	17,711		19,158	19,518	49,506
			σ	0,000	13,462	0,663	11,814		0,000	12,277	8,555
		Erronées	μ	21,081				36,980			
			σ	0,000				5,694			
Phase 2 Décision	**Novices**	**Correctes**	μ	51,752	45,017	59,010	56,302	53,702	45,824	52,398	57,525
			σ	9,872	21,769	3,989	8,390	14,956	11,901	17,666	11,856
		Erronées	μ		36,957	45,207	32,457	28,955	50,494		42,830
			σ		11,761	0,000	12,837	23,844	0,000		0,000
	Experts	**Correctes**	μ	60,320	59,368	65,615	61,714	61,367	52,921	63,199	63,488
			σ	7,825	4,944	2,819	0,384	0,000	0,000	0,453	0,000
		Erronées	μ								
			σ								

Tableau 46 : temps d'identification et de prise de décision, correctes et erronées, pour le scénario montagne (SIM)

Le temps d'identification et celui de prise de décision, exprimés en secondes (s) et millisecondes (ms), sont calculés sur l'ensemble des réponses données par tous les sujets, pour les deux groupes de sujets, en fonction du niveau de nuit, du niveau de contraste et du contenu fréquentiel de l'image. C : contraste exprimée en pourcentage (%) ; Fc : fréquence de coupure, exprimée en cycles par milliradian (cy/mrad).

Lors de phase d'identification, en *nuit 1* :

- Dans la condition fréquence de coupure à 1,3 cy/mrad le groupe des novices mets en moyenne un temps inférieur pour identifier la vallée. Ceci que les réponses soient correctes ou erronées, dans la condition de contraste 100%, par rapport à celle de 60%. Il faut noter que dans la condition contraste 100% et fréquence de coupure 1,3 cy/mrad, ce groupe identifie la vallée, sans aucune erreur. Dans cette même condition de contraste avec la fréquence de coupure 1,0 cy/mrad, on observe une proportion élevée d'identifications erronées. Dans ce cas, le temps de réponse devient supérieur à celui des identifications correctes. Paradoxalement, avec cette même fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad et le contraste à 60%, les novices ont des temps d'identification de la vallée bien inférieurs aux autres conditions. Ils font cependant des erreurs et, là aussi, les identifications erronées génèrent des temps de réponses supérieurs à ceux des réponses correctes.

- Les experts, pour leur part, ne font aucune détection erronée, quelles que soient les conditions, sauf pour un pilote, dans la condition « fréquence de coupure 1,3 cy/mrad - contraste 100% ». Le temps de réponse erronée est, dans ce cas, sensiblement inférieur à celui de la réponse correcte. On constate également dans ce groupe que les temps d'identification corrects les plus rapides sont obtenus dans la condition « fréquence de coupure 1,0 cy/mrad - contraste 60% ».

En *nuit 4* :

- Les résultats obtenus par les novices montrent que les temps d'identification sont globalement plus rapide avec la fréquence de coupure à 1,3 cy/mrad quel que soit le contraste. Dans cette condition de fréquence de coupure, on observe que ce groupe ne fait aucune identification erronée dans la condition contraste à 60%. Il faut aussi remarquer que dans la condition de contraste 100%, les temps d'identification de la vallée sont pratiquement identiques pour les identifications correctes ou erronées. Dans cette même condition, on note également que la fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad génère un temps de réponse moyen très proche de la valeur obtenue avec la fréquence de coupure à 1,3 cy/mrad et qu'un seul sujet commet une erreur d'identification. Enfin, dans la condition de contraste à 60%, les temps de réponses observés sont largement supérieurs à ceux de toutes les autres conditions. Dans cette condition, le temps moyen des identifications erronées devient même légèrement supérieur à celui des identifications correctes.

- Dans le groupe des experts, aucune réponse correcte n'est donnée dans la condition « fréquence de coupure 1,3 cy/mrad - contraste 100% ». Le temps moyen de détection pour les réponses erronées est assez largement supérieur à ceux obtenus en nuit 1. Dans toutes les autres conditions aucune erreur de détection n'est relevée dans ce groupe. Cependant, dans la condition « fréquence de coupure 1,0 cy/mrad – contraste 100% », seul l'un des pilotes donne une réponse (correcte). Les temps de réponses correctes apparaissent paradoxalement beaucoup plus courts qu'en *nuit 1*, sauf dans la condition « fréquence de coupure 1,0 cy/mrad - contraste 60% ».

Pendant la phase de prise de décision :

- D'une manière générale, les novices ont toujours tendance à effectuer plus rapidement que les experts la manœuvre d'engagement et tourner dans la vallée, quelle que soit la condition et que les réponses soient correctes ou erronées.

En *nuit 1* :

- Rappelons que le groupe de novice ne commet aucune erreur de prise de décision dans la condition « fréquence de coupure 1,3 cy/mrad - contraste 100% ». Pour cette fréquence de coupure, les temps de réponses sont ici supérieurs à la condition fréquence de coupure. On note cependant que cette dernière condition génère des prises de décision erronées, associées à une réduction du temps de prise de décision. Avec un contraste à 60%, le temps de prise de décision augmente pour les prises de décision correctes, légèrement moins pour la fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad que pour celle à 1,3 cy/mrad. Dans les deux cas, on remarque la tendance à la diminution du temps de prise de décision pour les réponses erronées.
- Les deux pilotes experts ne commettent dans cette condition de nuit aucune erreur dans leurs décisions. Les temps de prise de décision observés sont cependant largement supérieurs à ceux du groupe des novices. Apparemment la condition la plus favorable serait le contraste 100% avec une fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad.

En *nuit 4* :

- On remarque dans le groupe des novices que les temps de réponses correctes avec la condition fréquence de coupure 1,3 cy/mrad sont relativement proches dans les deux conditions de contraste (100 et 60%). Rappelons qu'avec le contraste à 60%, ce groupe ne commet aucune erreur pour cette fréquence de coupure. En revanche, pour la fréquence de coupure à 1,0 cy/mrad, il existe une différence très sensible dans les temps de prise de décision entre le contraste 100% (μ = 45,824 s) et le contraste à 60% (μ = 57,525 s). Si l'on analyse les temps de réponse de prise de décision erronée, on constate que les temps les plus courts sont obtenus dans la condition 1,3 cy/mrad et contraste 100%. A l'inverse, pour la condition fréquence de coupure 1,0 cy/mrad les temps de décisions erronées sont plus élevés que pour les décisions correctes.
- Dans le groupe des experts aucune réponse erronée n'apparaît. Dans ce groupe, seul l'un des pilotes donne des réponses correctes dans toutes les conditions. L'autre pilote ne donne une réponse que dans la condition « 1,3 cy/mrad - contraste 60% ». Les temps de réponses observés en *nuit 4* demeure largement supérieurs à ceux des novices, mais restent très proches des temps mesurés en *nuit 1*.

2.2.2.3.Analyse statistique

(a) Analyse de variance : effets simples

Les résultats mettent en évidence trois effets :

- Il y a un effet groupe (novices vs. experts) sur le temps de prise de décision des réponses ($F(1,88) = 6,55$; $p < 0,05$) et des réponses correctes ($F(1,88) = 4,96$; $p < 0,05$), mais sur aucune autre variable mesurée.
    - Cela signifie que les experts donnent autant de réponses et de réponse correctes que les novices dans ce scénario.
    - Cela veut aussi dire que les experts identifient la vallée et son orientation au même moment que les novices mais, qu'ils engagent la manœuvre pour entrer dans la vallée plus tardivement.
- Il y a un effet du niveau de nuit (*nuit 1* vs. *nuit 4*) avec un effet significatif sur le nombre de réponses ($F(1, 88) = 5,06$; $p < 0,05$), le temps d'identification de ces réponses ($F(1, 88) = 4,84$; $p < 0,05$) et celui des réponses correctes ($F(1, 88) = 7,52$; $p < 0,01$).
    - Les sujets ont plus de difficulté à identifier la vallée en *nuit 4* (c'est-à-dire qu'ils la détectent moins souvent en *nuit 4* qu'en *nuit 1*). Ils sont donc incapables de prendre la décision de s'engager de tel ou tel côté.
    - Ils sont aussi plus lents à identifier la vallée en *nuit 4,* sans qu'il y ait de différence sur le temps de prise de décision ($F(1, 88) < 1$, *ns*).
- Il y a un effet du contraste sur le nombre d'identifications correctes ($F(1, 88) = 6,44$, $p < 0,05$).
    - Les sujets identifient donnent plus de réponses correctes sur l'orientation de la vallée quand le contraste des vidéos est de 60%.

(b) Analyse de variance : interactions

Il y a deux interactions entre les variables qui sont mises en évidence :

- Une interaction entre les facteurs groupe et contraste pour le nombre des identifications correctes ($F(1, 88) = 5,37$; $p < 0,05$).
    - Les novices répondent de manière équivalente, quel que soit le niveau de contraste.
    - Les experts donnent moins de réponses correctes quand le contraste est maximal.

- Une interaction entre les facteurs groupe et fréquence de coupure pour le nombre d'identifications correctes ($F(1, 88) = 3,94$; $p < 0,05$).
    - Chez les experts, la modification de la fréquence de coupure n'a pas d'effet sur le nombre d'identifications correctes des sujets.
    - Par contre, les novices donnent plus des réponses correctes quand la fréquence de coupure est fixée à 1,3 cy/mrad plutôt qu'à 1,0 cy/mrad.

(c) Analyse de corrélations

Il existe des corrélations entre certaines variables. Elles sont présentées dans le tableau 47 qui résume ces corrélations et les valeurs des p correspondants.

Variables corrélées		R en z de Fisher	p
Temps d'identification	Temps de prise de décision	0,22	< 0,05
Temps d'identification	Temps d'identification « RC »	0,91	< 0,0001
Temps d'identification	Temps décision « RC »	0,20	< 0,05
Temps d'identification	Temps de décision des « RE »	0,42	< 0,0001
Temps de prise de décision	« IC »	0,30	< 0,005
Temps de prise de décision	Temps de décision des « RC »	0,80	< 0,0001
Temps de prise de décision	« PDC »	0,34	< 0,0005
Temps de prise de décision	Temps de décision des « RE »	0,37	0,0001
Réponses	« PDC »	0,676	< 0,0001
« IC »	« PDC »	0,613	<0,0001

Tableau 47 : résumé des corrélations entre les variables, pour le scénario montagne (SIM)

RC : réponses correctes ; RE : réponses erronées ; IC : identifications correctes ; PDC : prises de décision correctes.

3. Stimulation

3.1. Aspects méthodologiques spécifiques

L'expérimentation dite de « stimulation » a pour objectif d'effectuer une validation de la méthode en utilisant des systèmes de vision nocturnes fonctionnels. Il s'agit donc de mener une évaluation comparative de différents types de DVN, en utilisant les scénarios développés dans l'expérimentation de simulation.

3.1.1. Systèmes de vision nocturne

Les participants utilisent des systèmes de vision nocturne fonctionnels. Il n'y a donc aucun traitement au niveau des images utilisées dans l'expérimentation en dehors de la différence de luminance des scènes. Deux DVN sont testés afin de pouvoir les comparer. Il s'agit de deux systèmes :

- de type 1 dernière génération, équipé de tubes IL de 3^{e} génération, à 64 paires de lignes par millimètres (pl/mm) ;
- de type 2 d'ancienne génération, avec des tubes IL de 3^{e} génération, à 64 pl/mm.

Les expérimentations sur chaque système ont été menées séparément, sur deux journées distinctes. Tous les sujets commencent par l'expérimentation avec le DVN de type 1 puis la 2^{e} journée avec le DVN de type 2. Il aurait été préférable de contrebalancer le passage des systèmes de vision nocturne, mais les considérations logistiques n'ont pas permis d'utiliser cette approche.

3.1.1.1. DVN de type 1

Le sujet est assis à une table sur laquelle est placé un support optique pour le système de type 1. L'ensemble du dispositif support et DVN est fixe. Il est possible pour le sujet de régler le siège à la bonne hauteur pour avoir une vision confortable et se positionner bien en face des oculaires.

Pendant la période d'adaptation à l'obscurité (10 minutes), le sujet règle la mentonnière et l'écart entre les oculaires. Ensuite, il ajuste le réglage de focalisation des objectifs afin d'obtenir une image nette. Les objectifs sont réglés, l'un après l'autre, dans la condition de nuit la plus claire. Cette mise au point est réalisée à l'aide d'une mire de résolution (type USAF 1951). Le sujet sélectionne le plus petit groupe et élément dont il perçoit l'alternance noir/blanc afin d'ajuster le réglage le plus précisément possible. Cette étape est répétée pour chaque œil. Enfin, le sujet termine par le réglage de mise au point au niveau des oculaires.

3.1.1.2. DVN de type 2

Le sujet, assis sur une chaise, porte le système de type 2 directement sur la tête. Un masque empêche la vision directe pour ne laisser que la vision issue des tubes IL.

Pendant la période d'adaptation à l'obscurité (10 minutes), l'ajustement de la focalisation des objectifs est conduit d'une manière identique à celle utilisée pour le DVN type 1. Dans le DVN de type 2 utilisé, l'oculaire est fixe ; aucun réglage n'est donc nécessaire au niveau des oculaires.

3.1.2. Déroulement des sessions expérimentales

Les sessions se déroulent à l'identique des expérimentations de simulation. Les mêmes actions et critères utilisés pour la validation des actions sont conservés. Pour chaque sujet, l'expérimentation commence par la mesure de l'acuité visuelle limite obtenue avec chaque DVN. Les tâches de détection et prise de décision sont ensuite réalisées sur les deux scénarii développés lors de la phase de simulation.

3.1.2.1. Acuité visuelle

Pour chaque niveau de nuit, des mesures d'acuité visuelle limite avec les différents DVN testés ont été effectuées. Ce type de mesure sert de référence pour établir les performances visuelles de base des différents sujets en fonction du type de DVN utilisé. Les performances des opérateurs avec les systèmes testés sont donc vérifiées par cette mesure. Elle permet ensuite d'établir des corrélations entre les mesures d'acuité visuelle et les performances obtenues sur les différents scénarii.

3.1.2.2. Tâches cognitives

Tout comme pour l'expérimentation de « simulation », lors de la réalisation des expérimentations de « stimulation », seuls les scénarii « motopompe » et « montagne » ont été utilisés. Le niveau de nuit le plus haut utilisé pour cette expérimentation correspond à une *nuit 3* tandis que le niveau le plus bas correspond à une *nuit 5*.

Afin d'avoir un protocole avec le même nombre de mesures que pour la simulation, quatre mesures sont réalisées pour chaque scénario (ce qui permet d'augmenter le nombre de répétitions). Quatre recueils de données sont réalisés, pour chaque scénario et chaque niveau de nuit, correspondant à quatre répétitions pour chaque niveau de nuit (*nuit 3* et *nuit 5*).

3.2. Résultats

3.2.1. Acuité visuelle limite

3.2.1.1. Données

		Acuité visuelle (cy/mrad)			
		Nuit 3		*Nuit 5*	
		Type 1	**Type 2**	**Type 1**	**Type 2**
Novices	μ	1,06	0,85	0,51	0,45
	σ	0,12	0,32	0,06	0,18
Experts	μ	1,29	0,95	0,57	0,49
	σ	0,11	0,25	0,01	0,12

Tableau 48 : mesures d'acuité visuelle limite (STIM)

L'acuité visuelle est exprimée en cycles par milliradian (cy/mrad) pour les deux groupes sujets, en fonction du niveau de nuit et du type de DVN. Type 1 : DVN de type 1 ; Type 2 : DVN de type 2.

Le tableau 48 présente les mesures d'acuité visuelle limite obtenues par les deux groupes de sujets avec les deux DVN, pour les deux niveaux de nuit. Les résultats indiquent que l'acuité visuelle diminue fortement en *nuit 5* par rapport à la *nuit 3*, pour les deux groupes de sujets et les deux types de DVN.

L'acuité visuelle obtenue par les sujets est supérieure avec le DVN de type 1, par rapport au système de type 2, quel que soit le niveau de nuit et le groupe de sujets. On remarque aussi que la variabilité des résultats est plus importante, quelle que soit le groupe de sujets et le niveau de nuit le DVN de type 2. La comparaison des performances novices/experts montre que les experts obtiennent globalement une acuité visuelle supérieure à celles des novices, ceci pour les deux DVN. Cette différence est surtout présente pour le système de type 1 et la *nuit 3*.

3.2.1.2. Effets statistiques

Il y a un effet nuit (*nuit 3* vs. *nuit 5*) avec une acuité visuelle limite meilleure en *nuit 3* qu'en *nuit 5* ($F(1,44) = 91{,}74$, $p < 0{,}0001$). L'acuité visuelle des sujets est meilleure en *nuit 3* qu'en *nuit 5*.

Il y a un effet du type de DVN ($F(1,44) = 6{,}65$, $p < 0{,}05$): la valeur de l'acuité visuelle limite du système de type 1 et de type 2 sont respectivement 0,81 (± 0,061) et 0,71 (± 0,05) cy/mrad. L'acuité des sujets avec le DVN de type 1 est meilleure que celle atteinte avec le système de type 2.

Il n'y a pas d'effet significatif du groupe ($F(1,44) = 1{,}88$, *ns*), ni d'interactions significatives des effets ($F(1,44) < 1$, *ns*).

3.2.2. Scénario « Motopompe »

3.2.2.1. Données globales

Les résultats présentés comparent les performances des novices et des experts en exploitant les données recueillies sur les différents paramètres : le nombre de réponses (totales ou correctes) et le temps de détection (pour toutes les réponses, les correctes et les erronées). Ces résultats sont exprimés en fonction du niveau de nuit et du type de DVN.

(a) Pourcentage de réponse

	Pourcentage de réponse (%)			
	Nuit 3		***Nuit 5***	
	Type 1	**Type 2**	**Type 1**	**Type 2**
Novices	100	100	56,8	65,9
Experts	100	100	62,5	100

Tableau 49 : pourcentage de réponse pour le scénario motopompe (STIM)

Le pourcentage de réponse (exprimé en %) est calculé sur l'ensemble des réponses des sujets données dans une condition de nuit donnée, en fonction du type de DVN

Le tableau 49 présente, pour les deux groupes de sujets, le pourcentage de réponses pour la détection correcte ou erronée de la motopompe. Il s'agit d'une analyse globale des réponses.

En *nuit 3*, les experts et les novices détectent tous la présence d'une motopompe, avec les deux DVN (type 1 et 2).

Dans le niveau de nuit plus sombre (*nuit 5*), les experts obtiennent un pourcentage de détection plus important que celui des novices en particulier avec le type 2 plus qu'avec le type 1. Certains sujets ne parviennent pas à détecter l'objet.

(b) Temps de réponse

		Temps de détection (s et ms)			
		Nuit 3		***Nuit 5***	
		Type 1	**Type 2**	**Type 1**	**Type 2**
Novices	μ	2,630	2,504	24,621	27,221
	σ	1,468	1,862	2,332	6,452
Experts	μ	2,390	2,207	29,837	26,619
	σ	1,929	1,219	9,843	4,376

Tableau 50 : temps de détection pour le scénario motopompe (STIM)

Le temps de détection, exprimé en secondes (s) et millisecondes (ms), est calculé sur l'ensemble des réponses des sujets, en fonction du niveau de nuit et du type de DVN.

Les données du tableau 50 montrent qu'en *nuit 3*, il n'y a que très peu de différence dans les temps de réponses observés pour les deux groupes, quel que soit le type de DVN.

En *nuit 5* :

- le groupe des novices a des temps de réponse légèrement plus courts avec le système de type 1.
- A l'inverse, les temps de réponse des experts sont légèrement meilleurs avec le système de type 2 qu'avec celui de type 1.

D'une manière générale, pour les deux groupes, le temps de détection augmente de manière très sensible entre les deux niveaux de nuit.

3.2.2.2. Analyse des réponses « correctes » et « erronées »

(a) Pourcentage de réponse

En *nuit 3 :*

- les novices détectent la motopompe sans erreur avec le DVN de type 2, et avec un faible taux d'erreur pour le système de type 1 (tableau 51).
- Les experts détectent la motopompe sans erreur, avec les deux DVN.

		Pourcentage de réponse (%)			
		Nuit 3		*Nuit 5*	
		Type 1	**Type 2**	**Type 1**	**Type 2**
Novices	**Correctes**	97,7	100	43,2	47,7
	Erronées	2,3	0	13,6	18,2
Experts	**Correctes**	100	100	50	100
	Erronées	0	0	12,5	0

Tableau 51 : pourcentage de réponses correctes et erronées, pour le scénario motopompe (STIM)

Le pourcentage de réponse (exprimé en %) est calculé sur l'ensemble des réponses des sujets, en fonction du niveau de nuit et du type de DVN

En *nuit 5*, les novices et les experts ont plus de difficultés à détecter l'objet par rapport à la *nuit 3*, et ils font plus de détections erronées (tableau 51) :

- Le groupe de novices obtient un pourcentage de détections correctes plus élevé avec le DVN de type 2 mais fait aussi plus de détections incorrectes dans cette condition.
- Avec le système de type 2, les experts ne font pas d'erreurs, ce qui n'est pas le cas avec le DVN de type 1.

(b) Temps de réponse

En *nuit 3*, les novices et les experts détectent la motopompe (détections correctes) aussi rapidement (tableau 52). Seul un novice fait une erreur (détection erronée) dans une seule vidéo, avec le système de type 1. Dans ce cas, le temps de réponse est très supérieur à celui des « bonnes » réponses.

			Temps de détection (s et ms)			
			Nuit 3		*Nuit 5*	
			Type 1	**Type 2**	**Type 1**	**Type 2**
Novices	**Correctes**	μ	2,472	2,504	22,504	25,612
		σ	1,543	1,862	3,264	6,127
	Erronées	μ	8,646		30,487	31,443
		σ	0,000		3,283	6,547
Experts	**Correctes**	μ	2,390	2,207	25,741	26,619
		σ	2,011	1,219	10,971	4,376
	Erronées	μ			35,601	
		σ			0,000	

Tableau 52 : temps de détection correcte et erronée, pour le scénario motopompe (STIM)

Le temps de détection, exprimé en secondes (s) et millisecondes (ms), est calculé sur l'ensemble des réponses des sujets, en fonction du niveau de nuit et du type de DVN

En *nuit 5* :

- les novices ont des temps de réponse plus courts pour détecter la motopompe (réponses correctes) avec le système de type 2 (tableau 52). Pour les détections erronées, les temps de réponses sont supérieurs à ceux des détections correctes; ils sont légèrement supérieurs avec le DVN de type 2.
- Les temps de détection des experts sont équivalents entre les deux types de DVN. Les experts ne font aucune détection erronées avec le système de type 2. Pour les erreurs commises avec le système de type 1, on observe un temps de réponse très supérieur à celui des réponses correctes.

3.2.2.3. Effets statistiques

(a) Analyse de variance

Les résultats mettent en évidence un seul effet simple. Il y a un **effet du niveau de nuit** (*nuit 3* vs. *nuit 5*) significatif sur le nombre de réponses ($F(1, 44) = 9,52$; $p < 0,005$) et de réponses correctes ($F(1, 44) = 16,65$; $p < 0,0005$), sur le temps de détection des réponses ($F(1, 44) = 130,08$; $p < 0,0001$) et celui des réponses correctes ($F(1, 44) = 114,73$; $p < 0,0001$).

- En *nuit 3*, les sujets donnent plus de réponses et de réponses correctes.
- Ils détectent plus vite la motopompe en *nuit 3*, sans commettre d'erreurs ni sans omettre de réponse.

Il n'y a pas d'interactions significatives entres les différentes variables.

(b) Analyse de corrélations

Il existe aussi des corrélations entre certaines variables. Elles sont présentées dans le tableau 53 qui résume ces corrélations et les valeurs des p correspondants.

Variables corrélées		R en z de Fisher	p
AV limite	Temps de détection	-0,80	< 0,0001
AV limite	Réponses	0,53	< 0,0001
AV limite	« RC »	0,62	< 0,0001
AV limite	Temps détection « RC »	-0,77	< 0,0001
Temps de détection	Réponses	-0,44	< 0,001
Temps de détection	« RC »	-0,61	< 0,0001
Temps de détection	Temps détection « RC »	0,96	< 0,0001
Temps de détection	Temps détection des « RE »	0,32	< 0,05
Réponses	« RC »	0,93	< 0,0001
Réponses	Temps détection « RC »	-0,35	< 0,01
« RC »	Temps détection « RC »	-0,51	< 0,0001
Temps détection « RC »	Temps détection des « RE »	0,30	< 0,05

Tableau 53 : résumé des corrélations entre les variables, pour le scénario motopompe (STIM)

RC : réponses correctes; RE : réponses erronées ; AV : acuité visuelle.

3.2.3. Scénario « Montagne »

3.2.3.1. Données globales

(a) Pourcentage de réponse

		Pourcentage de réponse (%)			
		Nuit 3		***Nuit 5***	
		Type 1	**Type 2**	**Type 1**	**Type 2**
Phase 1 Identification	**Novices**	95,4	100	97,7	95,4
	Experts	100	75	62,5	62,5
Phase 2 Décision	**Novices**	81,8	81,8	95,4	90,9
	Experts	100	100	75	100

Tableau 54 : pourcentage de réponse des sujets, pour le scénario montagne (STIM)

Le pourcentage de réponse (exprimé en %) est calculé sur l'ensemble des réponses des sujets, pour les deux phases du scénario, en fonction du niveau de nuit et du type de DVN

Dans la phase d'identification (tableau 54), en *nuit 3* :

- les novices ont un pourcentage de réponses légèrement inférieur avec le système de type 1.

- A l'inverse, pour les experts, le pourcentage d'identification de l'orientation de la vallée est inférieur avec le système de type 2.

En *nuit 5* :

- Le groupe de novices conserve un pourcentage de réponse pratiquement constant par rapport à la nuit 3, quel que soit le type de DVN.
- Au contraire, on constate une dégradation sensible du pourcentage de réponses, identique pour les deux types de DVN chez les experts.

Dans la phase de prise de décision, en *nuit 3* :

- Pour les novices, on constate des pourcentages de réponse équivalents avec les deux systèmes. Ils ont cependant, au niveau de la décision, des difficultés à donner une réponse correcte pour l'engagement dans la vallée.
- Les experts, de leur côté, parviennent toujours à effectuer la tâche, quel que soit le DVN.

En *nuit 5 :*

- Dans le groupe des novices, le pourcentage de réponses pour la tâche de prise de décision est légèrement supérieur avec le DVN de type 1.
- On constate l'inverse pour le groupe des experts où le pourcentage est de 100% avec le système de type 2.

(b) Temps de réponse

		Phase 2 : Temps d'identification (s et ms)			
		Nuit 3		***Nuit 5***	
		Type 1	**Type 2**	**Type 1**	**Type 2**
Novices	μ	16,579	16,970	25,932	22,734
	σ	8,897	11,490	7,090	7,764
Experts	μ	14,406	14,467	18,906	17,064
	σ	19,197	11,488	10,043	8,894

Tableau 55 : temps d'identification de la vallée et de son orientation (STIM)

Le temps d'identification, exprimé en secondes (s) millisecondes (ms), est calculé sur l'ensemble des réponses pour les deux groupes de sujets, en fonction du niveau de nuit et du type de DVN.

Dans la phase d'identification (tableau 55), en *nuit 3* :

- Le temps d'identification de l'orientation de la vallée par les novices est similaire avec les deux DVN.

- Les experts ont des temps d'identification plus rapides que les novices, mais similaires pour les deux DVN.

En *nuit 5* :

- On constate que les novices ont des temps d'identification plus courts pour l'orientation de la vallée avec le système de type 2.
- Pour les experts, les temps de réponse sont relativement proches pour les deux systèmes, légèrement plus courts pour le type 2. On note aussi que les experts, comme en *nuit 3*, ont des temps de réponse plus courts que les novices, avec les deux DVN.

Dans la phase de prise de décision (tableau 56) :

- D'une manière générale, les résultats montrent que les experts ont tendance à avoir des temps de réponses supérieurs à ceux du groupe des novices.

		Phase 2 : Temps de prise de décision (s et ms)			
		Nuit 3		***Nuit 5***	
		Type 1	**Type 2**	**Type 1**	**Type 2**
Novices	μ	50,374	55,328	54,857	52,889
	σ	4,745	1,240	2,181	2,673
Experts	μ	60,523	57,846	58,317	57,121
	σ	5,989	6,603	11,214	2,686

Tableau 56 : temps de prise de décision, pour le scénario montagne (STIM)

Le temps de prise de décision, exprimé en secondes (s) et millisecondes (ms), est calculé sur l'ensemble des réponses, pour les deux groupes de sujets, en fonction du niveau de nuit et du type de DVN.

En *nuit 3* :

- Les temps de réponses du groupe des novices indiquent que la manœuvre d'engagement dans la vallée à tendance à être plus précoce avec le système de type 1.
- Pour les experts, les temps de réponse pour la décision demeurent relativement proches, légèrement plus courts avec le DVN de type 2.

Pour le niveau de *nuit 5 :*

- A l'inverse de la nuit 3 ; les novices ont tendance à initier la manœuvre d'engagement dans la vallée avec un temps de réponse moyen légèrement plus court pour le système de type 2.
- Les temps de réponses des experts demeurent pour leur part assez proches, quelque soit le DVN.

3.2.3.2. Analyse des réponses correctes et erronées

(a) Pourcentage de réponse

			Pourcentage de réponse (%)			
			Nuit 3		*Nuit 5*	
			Type 1	**Type 2**	**Type 1**	**Type 2**
Phase 1 Identification	**Novices**	**Correctes**	88,6	84,1	95,4	88,6
		Erronées	6,8	15,9	2,3	6,8
	Experts	**Correctes**	100	75	62,5	62,5
		Erronées	0	0	6,8	0
Phase 2 Décision	**Novices**	**Correctes**	65,9	77,3	88,6	86,4
		Erronées	15,9	4,5	6,8	6,8
	Experts	**Correctes**	100	100	75	100
		Erronées	0	0	12,5	0

Tableau 57 : pourcentage de réponses correctes et erronées, pour le scénario montagne (STIM)

Le pourcentage de réponse (exprimé en %) est calculé sur l'ensemble des réponses, pour les deux groupes de sujets, en fonction du niveau de nuit et du type de DVN

Dans la phase d'identification (tableau 57), en *nuit 3* :

- Dans le groupe des novices, on observe une tendance à détecter correctement l'orientation la vallée avec un pourcentage plus élevé pour le système de type 1 qu'avec le système de type 2 Le pourcentage de détections erronées est également moindre dans ce cas.
- Les experts détectent correctement l'orientation quel que soit le DVN. On remarque cependant que sur certaine passes du scénario, les pilotes ne sont pas parvenus à détecter l'orientation de la vallée et, donc, n'ont pas donné de réponse dans la phase d'identification.

En *nuit 5* (tableau 57) :

- Le pourcentage de réponses correctes fournies par le groupe de novices est sensiblement plus élevé avec le système de type 1 pour la détection de l'orientation de la vallée. Dans cette condition ils génèrent également moins de détections erronées par rapport au DVN de type 2.
- Les experts ont un pourcentage d'identification identique quel que soit le DVN (Type 1 ou 2). Par contre, on constate l'existence d'identifications erronées avec le système de type 1.

Dans la phase de prise de décision, en *nuit 3* (tableau 57) :

- Les novices ont un pourcentage de réponses correctes plus important avec le DVN de type 2 qu'avec le type 1. Ils font également moins de détections erronées avec le système de type 2.
- Pour leur part, les experts détectent toujours correctement l'orientation de la vallée, quel que soit le DVN utilisé.

En *nuit 5* :

- Dans le groupe des novices, le pourcentage de réponses correctes est relativement proche quel que soit le DVN., On observe la même tendance dans le cas des réponses erronées.
- Les experts ont, pour l'engagement dans la vallée un pourcentage de réponses correctes a 100% avec le DVN type 2. Avec le DVN de type 1, on constate dans le groupe des experts l'existence de réponses erronées dans la manœuvre d 'engagement.

(b) Temps de réponse

				Temps de réponse (s et ms)			
				Nuit 3		Nuit 5	
				Type 1	***Type 2***	***Type 1***	***Type 2***
Phase 1 Identification	**Novices**	**Correctes**	μ	16,376	15,940	26,222	23,028
			σ	22,464	25,427	16,059	15,189
		Erronées	μ	29,444	34,527	21,738	32,002
			σ	11539	15712	0	7412
	Experts	**Correctes**	μ	14,406	17,477	17,392	17,064
			σ	19,197	11,488	12,875	8,894
		Erronées	μ			21,430	
			σ			2489	

Tableau 58 : temps d'identification correcte et erronée de la vallée et de son orientation (STIM)

Le temps d'identification, exprimé en secondes (s) et millisecondes (ms), est calculé sur l'ensemble des réponses, pour les deux groupes de sujets, en fonction du niveau de nuit et du type de DVN

Dans la phase d'identification, (tableau 58), en *nuit 3* :

- Le groupe des novices a, en termes de temps de réponse pour identifier l'orientation de la vallée, des résultats très proches entre les DVN de type 1 ou 2. Dans le cas des identifications erronées, on observe une tendance dans ce groupe à générer des temps de réponse plus courts avec le système de type 1 qu'avec le type 2. Dans les deux cas les temps de réponses erronées pour l'identification de la vallée se révèlent assez largement supérieurs à ceux des réponses correctes.

- Dans ce niveau de nuit, les experts ne commettent aucune détection erronée Ils ont des temps de réponse très légèrement supérieurs à ceux des réponses correctes observés dans le groupe des novices, pour les deux DVN. Ils ont une tendance à identifier l'orientation de la vallée avec des temps de réponse plus courts pour le DVN de type 1 par rapport au type 2

En *nuit 5* :

- On constate dans le groupe des novices une augmentation très sensible des temps de réponse correctes pour la tâche d'identification, légèrement plus courts avec le DVN de type 2 qu'avec le type 1. Cependant, les déviations standards sont tellement grandes que cette différence n'a pratiquement pas de signification. On n'observe qu'une seule identification erronée avec le système de type 1, le temps de réponse étant dans ce cas inférieur à celui des réponses correctes. Avec le DVN de type 2, les novices génèrent des réponses erronées et, dans ce cas, on remarque que le temps de réponse est supérieur au temps de réponse des identifications correctes.
- Comme en *nuit 3*, les experts ont des temps de réponses inférieurs à ceux des novices et pratiquement identiques quel que soit le système de vision nocturne utilisé. Les experts ne font pas d'erreur d'identification de la vallée avec le DVN de type 2. Avec le système de type 1, des erreurs apparaissent et le temps des réponses erronées est légèrement supérieur à celui des réponses correctes.

				Temps de réponse (s et ms)			
				Nuit 3		***Nuit 5***	
				Type 1	**Type 2**	**Type 1**	**Type 2**
Phase 2 Décision	**Novices**	**Correctes**	μ	53,834	56,498	55,585	54,281
			σ	3,158	3,457	1,918	2,795
		Erronées	μ	39,020	45,213	46,378	41,693
			σ	17,449	17,704	6,031	6,329
	Experts	**Correctes**	μ	60,523	57,846	62,260	57,671
			σ	5,989	6,603	4,501	2,933
		Erronées	μ			34,654	
			σ			0	

Tableau 59 : temps de prise de décision correcte et erronée, pour le scénario montagne (STIM)

Le temps de prise de décision, exprimé en secondes (s) et millisecondes (ms), est calculé sur l'ensemble des réponses, pour les deux groupes de sujets, en fonction du niveau de nuit et du type de DVN

Dans la phase de prise de décision, en *nuit 3* (tableau 59) :

- Pour initier l'engagement dans la vallée à droite ou à gauche, dans le cas des réponses correctes, le groupe de novices a tendance a avoir des temps de réponse plus courts

avec le DVN de type 1. Ils ont également des temps de réponse plus courts avec le système de type 1 lorsque leurs réponses sont erronées et, dans ce cas, leurs temps de réponse sont très sensiblement inférieurs à ceux des réponses correctes, ceci pour les deux DVN.

- Les experts ne donnent que des réponses correctes dans la condition de nuit 3. Ils ont un temps moyen de prise de décision sensiblement équivalents a celui des novices, avec le DVN de type 2. On remarque dans ce groupe qu'avec le système de type 1 leurs temps de réponse sont sensiblement plus élevés que ceux recueillis dans la population novice. Enfin, leurs temps de réponse pour la décision d'engagement dans la vallée sont plus courts avec le système de type 2 qu'avec celui de type 1.

En *nuit 5* :

- Les temps de réponse des novices sont pratiquement équivalents quel que soit le DVN utilisé, lorsqu'ils s'engagent correctement dans la vallée. S'ils commettent une erreur, on constate que leur temps de réponse est généralement inférieur au temps de réponse correcte. Dans ce cas, le temps de réponse moyen est inférieur avec le DVN de type 2 par rapport à celui de type 1.
- Comme pour la *nuit 3*, les temps d'initiation de la manœuvre d'engagement dans la vallée observés pour les experts sont plus courts avec le système de type 2 qu'avec celui de type 1 notons ici qu'aucune erreur n'apparaît avec le DVN de type 2. Pour le de type 1, on remarque l'existence d'une décision erronée d'engagement dans la vallée. Dans ce cas, le temps de réponse pour la prise de décision est très inférieur à celui des décisions correctes avec le système type 1.

3.2.3.3. Effets statistiques

(a) Analyse de variance : Effets simples

Les résultats mettent en évidence trois effets principaux :

- Il y a un effet du niveau de nuit pour le temps des identifications correctes ($F(1,44) = 19,40$; $p < 0,0001$).
    - Les sujets identifient plus rapidement l'orientation de la vallée en *nuit 3* qu'en *nuit 5*.
- Il y a un effet du type de DVN sur le temps des identifications correctes ($F(1,44) = 10,8$; $p < 0,005$).

- Les sujets identifient plus rapidement l'orientation de la vallée avec le système de type 2 qu'avec celui de type 1.

- Il y a un effet groupe sur le nombre de identifications correctes ($F(1,44) = 5,78$; $p < 0,05$) et de prises de décisions correctes ($F(1,44) = 6,22$; $p < 0,05$).
  - Les novices donnent plus de réponses correctes que les experts ($\mu = 3,00 \pm 0,43$) pour identifier l'orientation de la vallée.
  - Dans la tâche de prise de décision, ce sont les experts qui donnent plus de réponses correctes que les novices.

(b) Analyse de variance : Interactions

Il y a des interactions entre les facteurs :

- Groupe et type de DVN pour le nombre d'identifications globales ($F(1,44) = 6,63$; $p < 0,05$) et le temps de réponses des identifications correctes ($F(1,44) = 6,19$; $p < 0,05$).
  - Les novices ont des performances similaires avec les deux DVN : ils identifient globalement l'orientation de la vallée qu'elle soit correcte ou non avec le même nombre de réponses ; en cas d'identification correcte, le temps de réponse est similaire entre les deux DVN.
  - Par contre, les experts n'arrivent pas donner une réponse à chaque fois avec le système de type 2, alors qu'ils en sont capables avec le système de type 1.
  - En ce qui concerne les temps de réponse pour les identifications correctes, les experts sont beaucoup plus lents avec le DVN de type 1 qu'avec celui de type 2

- Groupe et niveau de nuit pour le nombre d'identifications correctes ($F(1,44) = 6,75$; $p < 0,05$) et de prises de décisions correctes ($F(1,44) = 5,30$; $p < 0,05$).
  - En *nuit 3*, les novices et les experts réalisent autant d'identifications correctes tandis qu'en *nuit 5*, les novices donnent plus de réponses correctes que les experts.
  - Pour la tâche de décision, l'effet est différent. En *nuit 5*, les novices et les experts ont des performances équivalentes ; en *nuit 3*, les experts sont capables de prendre des décisions correctes à chaque fois alors que les novices commettent des erreurs ou ne parviennent pas à répondre.

(c) Analyse de corrélations

Il existe des corrélations entre certaines variables, présentées dans le tableau 60 qui résume ces corrélations et les valeurs des p correspondants.

Variables corrélées		R en z de Fisher	p
AV limite	Temps d'identification	-0,29	< 0,05
AV limite	Prise de décision	-0,28	< 0,05
AV limite	Temps d'identification « RC »	-0,33	< 0,05
Temps d'identification	Temps d'identification « RC »	0,74	< 0,0001
Temps d'identification	Temps d'identification des « RE »	0,29	< 0,05
Identifications	« IC»	0,41	< 0,005
Décisions	« PDC »	0,69	< 0,0001
Décisions	Temps d'identification des « RE »	0,28	< 0,05
Temps prise décision	Temps décision des « RC »	0,96	< 0,0001
Temps prise décision	Temps décision des « RE »	0,46	0,0005
Temps décision des « RC »	Temps décision des « RE »	0,35	< 0,01

Tableau 60 : résumé des corrélations entre les variables, pour le scénario montagne (STIM)
RC : réponses correctes ; RE : réponses erronées ; IC : identifications correctes ; AV : acuité visuelle.

4.Discussion

4.1. Méthodologie : application et scénarii

En ce qui concerne les scénarii, les critiques sont essentiellement à prendre en compte pour les experts qui ont l'habitude du terrain et du vol en hélicoptère.

Pour le scénario de la « motopompe », il est considéré comme globalement bon même si, selon les experts, le défilement est peut être un peu trop rapide pour être totalement réaliste.

Quant au scénario où les sujets évoluent dans le paysage montagneux, la procédure de « tenir la droite », même pour tourner n'a été pas respectée comme elle aurait dû l'être. Ceci est visible en particulier sur les scènes où le virage s'effectue sur la gauche. Les séquences ont également été jugées parfois un peu trop courtes. Cependant, les pilotes estiment que cela n'empêche pas d'effectuer la tâche demandée et ils considèrent que le temps « manquant » est négligeable pour répondre. Il faut aussi considérer que tous les sujets sont testés dans les mêmes conditions et les mêmes séquences enregistrées.

Globalement, le retour des experts est très positif sur les scénarii développés, sur le réalisme et l'intérêt de la méthode pour évaluer l'utilisation opérationnelle des DVN. Les évaluations

menées en laboratoire sur les DVN sont classiquement des mesures d'acuité visuelle ou de sensibilité aux contrastes. L'utilisation de ces séquences enregistrées introduit de la notion de contexte signifiant, différent du contexte spatial (Buffat, 2007). Ces informations appartiennent aux informations dites descendantes (de type « top-down), liées aux connaissances innées ou acquises. Neisser (1967) puis Bruner (1973) ont mis en évidence que les simples informations perceptives ne sont pas toujours suffisantes pour permettre l'identification d'un objet. Cela confirme l'intérêt de proposer une méthodologie intégrant des tâches de plus haut niveau et prenant en compte le contexte.

L'application logicielle développée a été utilisée pour les deux expérimentations. En ce qui concerne l'interface expérimentateur, une amélioration est proposée avec une décomposition en 3 parties :

- Informations sur le sujet ;
- Informations sur les scénarii et les pré-sets ;
- Informations sur les valeurs des filtres (qui doivent être supérieures à deux selon les besoins).

Pour le reste de son utilisation, l'application constitue un outil d'évaluation permettant d'appliquer de manière automatique un protocole et de recueillir les données, facilitant ainsi une partie du traitement des données.

Pour l'application en simulation, le filtre vert semble modifier la valeur de luminance. On constate que les mesures de luminance effectuées pour calibrer le vidéoprojecteur mettent en évidence une différence entre la condition « simulation » (167,52 cd/m²) et celle de « stimulation » (1,50 cd/m²). Apparemment, une explication possible serait que, pendant la modification des valeurs (voir partie 4 - chapitre 2 - paragraphe 3.4.1), les valeurs de luminance aient été modifiées en même temps que celle de chrominance par notre équation. Cet événement pourrait être survenu soit à l'étape de transformation en image monochrome, soit au changement de valeurs des canaux RGB. Cette hypothèse demeure à vérifier, ce qui à ce jour n'a pu être réalisé dans le cadre de cette thèse.

Nous discuterons successivement les résultats obtenus lors de ces expérimentations en commençant par l'expérimentation de « simulation ».

4.2. Simulation

Il s'agissait de vérifier l'hypothèse d'effets significatifs résultant des différentes conditions expérimentales, niveau de nuit, contraste et contenu fréquentiel, sur les tâches de détection et de prise de décision.

4.2.1. Détection

4.2.1.1. Expertise

Comme l'on pouvait s'y attendre, il apparaît que les tâches de détection sont susceptibles d'être influencées par l'expérience préalable des sujets. Ces résultats, peuvent être examinés en faisant référence au modèle de raisonnement et de prise de décision de Rasmussen (1983), déjà utilisé pour l'étude de l'organisation de l'expertise des pilotes d'hélicoptère. Les tâches prescrites consistent ici à donner des réponses à des évènements des scenarii au moyen des touches du clavier ou verbalement. L'exécution de cette action, implique que les sujets aient préalablement mis en place en place une séquence cognitive d'évaluation et d'interprétation de la situation et de la tâche.

Dans les tâches de détection, par exemple « détecter une motopompe au milieu d'une clairière », l'analyse de la scène a pour objet de détecter l'endroit où se trouve la motopompe. Une fois la clairière identifiée, les sujets portent donc leur attention sur la détection d'une forme représentative de la motopompe dans la clairière. La recherche de la position correcte requiert alors l'exploitation des informations de l'environnement plus en détail, afin de localiser précisément l'objet. Les résultats obtenus indiquent que dans cette tâche, les experts détectent et localisent mieux la motopompe dans l'environnement. Ils sont cependant en général plus lents que les novices à détecter la localisation, correcte ou erronée. La différence de performance entre les groupes peut sans doute s'expliquer par le fait que les experts, en sus de leurs habiletés perceptives pour les taches de localisation, appliquent une procédure (c'est-à-dire la règle) adaptée à ce type de situation. Les novices de leur côté, pourraient alors davantage utiliser une approche intuitive, essentiellement fondée sur leurs habiletés perceptives.

Les experts repèrent un premier champ clair triangulaire au fond de la scène puis, dans le même axe, la clairière entourée d'une zone de forêt plus sombre et enfin, dans cette clairière, un carré vert (la motopompe) qui se détache du fond. Ceci peut également indiquer un comportement plus prudent des experts, prudence dans l'interprétation des images représentatives de tubes IL (Stankovic, Raufaste et Averty, 2008). En finale, on constate

cependant que les experts font moins d'erreurs et ils parviennent à détecter la motopompe plus souvent que les novices.

La procédure mise en place par les experts « coûte un peu plus » en termes de charge cognitive, se qui pourrait expliquer la différence entre les temps de réponses des deux groupes. Compte tenu du faible effectif des pilotes experts, il faut certainement rester prudent sur ce sujet. Des expérimentations complémentaires seraient nécessaires pour confirmer ou infirmer cette interprétation.

Les données expérimentales indiquent également que les stratégies comportementales diffèrent en fonction du niveau de nuit selon le groupe de sujets. Il n'y a pas d'effet du niveau de nuit chez les experts, alors qu'il y en a pour les novices. Ceci confirmerait que la procédure utilisée par les experts est efficace et les conduit, quel que soit le niveau de nuit, à donner une réponse correcte.

4.2.1.2. Niveau de nuit

Cette expérimentation met en évidence un effet du niveau de nuit sur toutes les mesures de la tâche de détection, sauf sur le temps de réponse des détections erronées. La connaissance du niveau de nuit est une information d'entrée nécessaire au moment de la détection pour exécuter correctement la tâche. De nombreuses études sur des mires ont mis en évidence l'impact du niveau de nuit sur l'acuité visuelle (Kotulak et Morse, 1994 ; Kotulak et Rash, 1992 ; Levine et Rash, 1989 ; Riegler, Whiteley, Task et Schueren, 1990) et la sensibilité aux contrastes (Hughes, 2001 ; Kotulak et Rash, 1992 ; Rabin, 1992 ; Rabin, 1993 ; Rabin, 1994 ; Wiley, 1989).

Les stratégies comportementales des sujets varient aussi en fonction du niveau de nuit, selon le contenu fréquentiel et le niveau de contraste de l'image. Quand le niveau de luminance diminue (*nuit 4*), le contenu fréquentiel et le niveau de contraste de l'image n'ont pas d'effet sur les performances des sujets (nombre de réponses ou temps de réponses. A des niveaux de luminances plus élevées (*nuit 1*), les sujets sont plus performants avec des vidéos contenant des moyennes fréquences spatiales (MFS : 1,0 cy/mrad) et un contraste moyen (60%) que des hautes fréquences (HFS : 1,3 cy/mrad) et un contraste maximal (100%).

4.2.1.3. Contraste et contenu fréquentiel spatial

Contrairement aux hypothèses initiales, sur des images complexes, il ne semble pas exister d'effet simple du contraste. Par contre, il y a un effet de la fréquence de coupure (contenu fréquentiel). Les résultats obtenus montrent que, dans la tâche de détection, les sujets ont des

temps de réponses plus rapides quand les images contiennent des basses fréquences spatiales (BFS) et des MFS. Quand les vidéos contiennent aussi des HFS (ce qui est le cas avec une fréquence à 1,3 cy/mrad), le temps de réponse des sujets est généralement supérieur.
Il y a en revanche un effet conjugué des deux sur le nombre d'erreurs. On ne trouve également pas d'effet du contraste à haute fréquence (1,3 cy/mrad), mais un effet apparaît dans les moyennes fréquences (1,0 cy/mrad). Ceci reste cohérent avec les données des courbes de sensibilité aux contrastes (variations du contraste en fonction des fréquences spatiales). Plusieurs études ont montré qu'au-delà de 3 cpd (cycles par degré) (0.18 cy/mrad), donc bien au-delà de la valeur utilisée pour notre expérimentation, le contraste maximal n'est pas efficace sur des mires cycliques ou de Foucauld (Van Meeteren et Vos, 1972). Ceci est d'autant plus valable que le niveau de luminance diminue (Van Nes et Bouman, 1967). L'interaction du contraste et des fréquences spatiales tend à faire penser que la fonction de sensibilité aux contrastes jouerait donc un rôle dans les tâches de détection.

4.2.2. Prise de décision

4.2.2.1. Expertise

Les résultats obtenus au cours de l'expérimentation indiquent que les tâches de prise de décision sont encore plus fortement influencées par l'expérience des sujets que pour les tâches de détection pure. Dans les tâches de prise de décision (type « initier une manœuvre pour s'engager dans une vallée »), tout comme pour la tâche de détection, les sujets doivent analyser la situation afin de repérer l'existence d'une vallée dans un massif montagneux. Ceci demande d'explorer et d'observer globalement la scène de façon à rechercher des informations permettant:
1) d'identifier l'existence d'une vallée dans le paysage
2) d'identifier de quel côté (D/G) s'engage la vallée.
3) de prendre une décision finale sur le sens d'engagement dans la vallée (D/G)

La mesure du temps mis pour identifier la vallée permet d'évaluer la capacité d'anticipation de la prise de décision du sujet. Cette mesure n'est, en général, pas influencée par l'expérience des sujets. Par contre, dans la tâche de prise de décision, c'est-à-dire pour l'initiation de la manœuvre d'engagement, les experts sont plus lents à initier ce mouvement. Comme pour la tâche de détection, ces résultats peuvent être expliqués en faisant appel au modèle de Rasmussen (1983). Là aussi, les experts utilisent leurs habiletés pré-établies et les

règles adaptées à la situation tandis que les novices effectuent une réponse de type purement intuitive et « perceptive ».Les experts expliquent en fait très clairement qu'en hélicoptère : « le pilote cherche toujours à se placer le plus à droite possible. Pour tourner, il faut tourner au plus tôt tout en laissant assez de place pour un couloir à droite afin qu'un hélicoptère arrivant en sens inverse puisse éventuellement le croiser ».

Les stratégies comportementales des sujets varient aussi selon le contenu fréquentiel et le niveau de contraste de l'image. Cet effet est visible au moment où l'on évalue la capacité d'anticipation des sujets (nombre d'identifications correctes). Le contenu fréquentiel n'a pas d'effet sur les performances des experts tandis que les novices ont de meilleures performances avec des scènes contenant des MFS (1,0 cy/mrad) plutôt que des HFS (1,3 cy/mrad). Par contre, les performances des experts sont différentes selon le niveau de contraste puisque ces sujets sont plus performants quand le contraste est modéré (60%) par rapport à un contraste maximal (100%). Les novices, quand à eux, conservent plutôt des performances identiques quelque soit le niveau de contraste. Là aussi, compte tenu du faible effectif des experts, il convient de garder une certaine prudence pour l'interprétation de ces résultats.

4.2.2.2. Niveau de nuit

Le scénario montagne, permet de mettre en évidence un effet du niveau de nuit sur le nombre de réponses correctes ou erronées, le temps d'identification associé à ces réponses et des réponses correctes. Aucun effet du niveau de nuit n'a été constaté pour le temps de prise de décision.

Dans le scénario utilisé pour cette tâche, les pilotes doivent initier la manœuvre d'engagement dans la vallée au plus tôt pour ne pas percuter la montagne qui se trouve face à eux. Il ne faut cependant pas effectuer cette activité trop tôt, au risque de percuter les flancs montagneux de la vallée.

Ainsi qu'indiqué précédemment dans la tâche de détection, le niveau de nuit constitue une information importante pour l'opérateur lors de la création de sa représentation. Ceci pourrait expliquer l'effet sur le temps d'identification. Même si l'identification de la vallée est plus tardive en *nuit 4* par rapport à la *nuit 1*, la prise de décision ne serait pas modifiée par le niveau de nuit. Cette activité doit être assurée au plus tôt, d'une manière sûre, quel que soit le niveau de nuit, ce qui pourrait expliquer la réduction des écarts dans les temps de réponse ainsi que les effets associés.

4.2.2.3. Contraste et contenu en fréquences spatiales

Contrairement aux hypothèses initialement posées, il n'y a pas d'effet du contraste, du contenu fréquentiel ou d'effet conjugué de ces deux facteurs. Les résultats obtenus indiquent dans ce cas l'absence de lien entre la fonction de sensibilité aux contrastes et les tâches de prise de décision.

4.2.3. Conclusion sur les expérimentations en simulation

Cette première expérimentation a permis de recueillir des données dans des conditions où l'ensemble des paramètres de l'image simulée étaient rigoureusement contrôlés et reproductibles. Les sujets observaient les différentes scènes en vision directe, émettant leurs réponses en fonction des diverses conditions expérimentales simulées.
La seconde expérimentation, revêt plutôt un objectif de validation de la méthode, appliquée à l'évaluation de dispositifs d'aide à la vision nocturne. Les résultats obtenus lors de la seconde étude expérimentale, réalisée avec des systèmes de vision nocturne fonctionnels, sont présentés dans la section suivante.

4.3. Stimulation

Cette phase expérimentale reprend les mêmes tâches de détection et de prise de décision que la précédente expérimentation, les sujets observant les scènes présentées au moyen de deux types de systèmes (Types 1 et 2).
L'hypothèse de base de cette expérimentation est que le système de type 1 de génération récente permettrait d'obtenir de meilleures performances dans les tâches de détection et de prise de décision que le système de type 2, équipé de tubes intensificateurs d'ancienne génération. Le système de type 1 est généralement référencé pour avoir de meilleures performances en résolution spatiale, permettant aux opérateurs d'avoir une meilleure acuité visuelle. L'effet du niveau de nuit et de l'expérience des sujets sur ce type de tâches a également été investiguée.

4.3.1. Acuité visuelle

Les performances des deux systèmes sont vérifiées en début d'expérimentation, par une mesure d'acuité visuelle limite. Les performances des DVN ont déjà été établies à plusieurs reprises, pour les deux DVN. Cette mesure permet de valider et vérifier les performances des systèmes, en fonction des différents groupes de sujets.

Les mesures d'acuité visuelle effectuées sur des mires confirment que les sujets obtiennent de meilleurs résultats avec le DVN de type 1, de dernière génération, possédant des tubes IL de meilleure résolution, qu'avec le DVN de type 2, dont la résolution est plus limitée.
En accord avec les données de la littérature, il y a un effet du niveau de nuit sur les mesures d'acuité visuelle (Kotulak et Morse, 1994 ; Kotulak et Rash, 1992 ; Levine et Rash, 1989 ; Riegler, Whiteley, Task et Schueren, 1990). Les mesures d'acuité visuelle en *nuit 3* sont supérieures à celles mesurées en *nuit 5*.
Par contre, sur ce type de mesure, on voit qu'il n'existe pas d'effet de l'expertise. Des sujets « sélectionnés » comme ayant une bonne acuité visuelle photopique et scotopique, sans problèmes de phories ni d'astigmatisme, sont capables de produire des performances équivalentes, voire meilleures, que celles des pilotes.

4.3.2. Détection

Les résultats indiquent que, lorsque les sujets utilisent des DVN fonctionnels dans une tâche de détection, ils donnent moins de réponses et de réponses correctes quand le niveau de nuit diminue. Ils détectent aussi moins vite la motopompe. Là aussi, les études précédentes réalisées principalement avec des DVN de type 1 sur des mires ont montré les effets du niveau de nuit sur les mesures d'acuité visuelle. Cette expérimentation permet donc de mettre en évidence l'effet du niveau de nuit sur des tâches de plus haut niveau cognitif qu'une tâche sensorielle d'acuité visuelle.
Bien qu'une meilleure acuité visuelle avec le DVN de type 1 soit observée, il n'y pas de différence réellement significative entre les deux systèmes (Type 1, Type 2) pour la tâche de détection. Compte tenu de ce fait, il semble donc difficile d'établir un lien entre l'acuité visuelle obtenue, aussi bien par les systèmes type 1 ou 2 par rapport à la tâche de détection.
Il n'existe pas non plus de différence entre les deux groupes de sujets étudiés. Cette absence d'effet peut s'expliquer par le peu de différence entre les systèmes. La variabilité interindividuelle importante sur les différentes mesures (nombres de réponses et de réponses correctes, temps de détection et temps de détections correctes), pourrait également jouer un rôle, surtout chez les experts.

4.3.3. Prise de décision

4.3.3.1. Expertise

Dans la tâche de prise de décision, les novices sont plus performants que les experts dans l'anticipation de la vallée puisqu'ils font plus d'identifications correctes. En ce qui concerne

les prises de décision, les experts donnent toutefois plus de réponses correctes que les novices. Ce résultat indique que les novices persistent dans leur choix, une fois qu'ils ont identifié l'orientation de la vallée et se révèlent généralement incapables de modifier ce choix initial. Les experts, de leur côté, semblent parvenir plus facilement à corriger les erreurs d'identification initiales et à modifier leur option afin de prendre la bonne décision, fonction des informations complémentaires issues de l'environnement dans la phase d'engagement.

Les performances des groupes de sujets varient en fonction du type de DVN, notamment dans la phase d'identification de l'orientation de la vallée. Les novices ont des performances similaires avec les deux systèmes, tandis que les experts ne font aucune erreur avec le système de type 1, même s'ils sont significativement plus lents à répondre. Ceci nous montre que sur ce type de tâche opérationnelle, il est difficile de mettre en évidence des différences de performances entre des systèmes, avec une population qui n'a pas l'habitude de réaliser des activités de ce type.

Les résultats montrent aussi des stratégies comportementales différentes mises en jeu selon le niveau de nuit entre les deux groupes de sujets. Les novices ont des performances meilleures que celles des experts dans la phase d'identification de l'orientation de la vallée en donnant plus de réponses correctes, notamment en *nuit 3*. Cependant, pour la prise de décision, en *nuit 3,* les experts parviennent à donner plus de réponses correctes que les novices, alors que ceux-ci commettent des erreurs ou ne parviennent pas à répondre. En *nuit 5*, les deux groupes de sujets ont des performances globalement similaires. Ceci confirme l'idée que les experts sont plus capables de corriger les erreurs d'identification qu'ils ont pu faire initialement.

4.3.3.2.Niveau de nuit

L'analyse des résultats obtenus dans le scénario montagne en fonction des niveaux de nuit permet de mettre en évidence que les sujets utilisant des DVN ont des temps d'identification de réponses correctes différents. Globalement, les sujets identifient plus vite la vallée en *nuit 3* qu'en *nuit 5*. Comme pour les tâche de détection pure, rappelons ici encore une fois que différentes études ont montré les effets du niveau de nuit sur l'acuité visuelle, principalement avec des DVN de type 1 (Kotulak et Morse, 1994 ; Kotulak et Rash, 1992 ; Levine et Rash, 1989 ; Riegler, Whiteley, Task et Schueren, 1990).

L'expérimentation conduite avec le scénario montagne, indique que l'effet du niveau de nuit avec des DVN peut être mis en évidence sur des tâches de plus haut niveau qu'une tâche sensorielle.

4.3.4. Conclusion sur les expérimentations en stimulation

Dans cette seconde expérimentation, nous avons recueilli des données dans des conditions plus proches de la réalité, en utilisant des DVN fonctionnels avec des scénarii identiques à ceux utilisés lors de l'expérimentation en simulation. Contrairement à cette première expérimentation, les résultats obtenus dépendent du type du DVN utilisé et du niveau de nuit. Ils indiquent globalement qu'il existe des différences notables entre les groupes d'experts et de novices en particulier pour les tâches de haut niveau du type prise de décision.

5. Conclusion sur les méthodologies cognitives

A partir de ces deux expérimentations, il a été montré, qu'au delà du niveau perceptif, les caractéristiques cognitives des deux populations jouaient un rôle non négligeable. Les experts ont la caractéristique d'utiliser la mise en place de procédures ou de règles en sus de leurs habiletés perceptives. Il a d'ailleurs été déjà été identifié (Temme, Still et Fatcheric, 1995) dans l'environnement des pilotes de chasse que ceux-ci ne « voient » pas mieux qu'une population de novices, mais que leurs stratégies visuelles font la différence dans les tâches de haut niveau. Les novices ont des réponses s'appuyant plus sur des mécanismes purement perceptifs. Les habiletés intrinsèques développées par les experts leur permettent en fait de répondre plus rapidement dans des tâches de détection. Dans les tâches de prise de décision, l'utilisation de règles procédurales allonge le temps de réponse par rapport à l'approche moins structurée des novices. Par contre, de manière générale, elles conduisent les experts à faire moins d'erreurs que les novices et, en cas d'erreur, à savoir corriger l'erreur initiale.

Les deux expérimentations à contenu cognitif qui ont été conduites dans le cadre de cette thèse ont permis de mettre en place les fondements d'une méthodologie opérationnelle de « stimulation ». Cette méthodologie peut potentiellement trouver une application dans l'évaluation comparative de différents types de DVN. En tout état de cause, les résultats obtenus indiquent que ce type d'évaluation ne prend réellement de sens qu'avec une population d'experts. Il ne s'agit donc pas d'avoir des sujets expérimentés dans l'utilisation en laboratoire de systèmes de vision nocturne, mais aussi dans la réalisation des tâches et activités de pilotes d'hélicoptères. Il apparaît que seuls des pilotes ayant une expérience pratique de l'utilisation des DVN soient en mesure de mettre en évidence des différences entre différents DVN avec ce type de méthodologie opérationnelle. Il ne peut cependant être exclu que la méthode de « simulation » puisse trouver un intérêt dans certaines phases de développement des systèmes de visionique.

DISCUSSION GENERALE

« Rien de grand ne s'est accompli dans le monde sans passion »

Hegel

1. Introduction

Le travail mené dans le cadre de cette thèse s'appuie sur une démarche méthodologique visant à l'amélioration et à la définition de méthodes d'évaluation des dispositifs de vision nocturne (DVN) avec l'opérateur humain dans la boucle. Les diverses expérimentations menées tout au long de cette thèse prennent en considération les traitements sensoriels et cognitifs effectués sur les informations visuelles issues de tubes intensificateurs de lumières (IL).

Dans une première partie, nous avons analysé l'état de l'art des connaissances pertinentes pour recenser la nature des informations visuelles fournies par les DVN, ainsi que les différentes composantes des traitements sensoriels et cognitifs effectués.

Dans un second temps, nous avons abordé le domaine de l'évaluation des DVN. Il existe actuellement un déficit de méthodologies, sensorielles et surtout cognitives, permettant d'évaluer plus exhaustivement les performances de l'ensemble « système/opérateur ». En finale, l'objectif était d'établir une méthode permettant l'évaluation en laboratoire des performances de systèmes de vision nocturne par des pilotes, confrontés à des tâches et conditions dites « opérationnelles », se rapprochant de celles pratiquées dans leur activité quotidienne.

Dans la partie expérimentale, nous avons établi une démarche progressive dans la mise en place des différentes méthodes d'évaluation des DVN. Ceci, tout en prenant en considération des facteurs essentiels dans le domaine de la vision nocturne. Ce travail a été réalisé sur deux séries d'études (méthodes sensorielles et cognitives), recouvrant au total 6 expérimentations, avec des sujets humains, principalement des novices et quelques experts.

Les données recueillies pour chaque partie expérimentale constituent ainsi un socle de connaissances dans le domaine étudié et permettent de parvenir à :

- des arguments fondamentaux relatifs à la perception et au traitement des informations visuelles lors de l'utilisation des DVN;
- des pré-validations et validations des méthodes utilisées au cours de ces évaluations.

Nous traiterons successivement ces deux aspects, après avoir effectué la synthèse des principaux résultats.

2. Synthèse de l'approche expérimentale

2.1. Objet de la recherche

Sur la base du rapport effectué dans le groupe de travail RTO-TR-HFM-091, résumant l'ensemble des méthodes d'évaluations recommandées pour les systèmes de visionique, il apparaît important de considérer les différents aspects permettant l'évaluation de la perception visuelle :

- l'acuité visuelle qui décrit la capacité du système visuel à discerner deux points ou deux objets distincts, en fonction de la distance entre ces points) l'observateur ;
- la sensibilité aux contrastes qui représente la capacité de détecter des différences de luminance, en fonction des fréquences spatiales ;
- la détection, qui s'établit à grande distance et qui consiste à trouver les images cibles dans l'environnement, sans pour autant en préciser la classe ni le nom ;
- la prise de décision, qui est un processus cognitif complexe visant à sélectionner une action parmi différentes alternatives.

L'originalité de la démarche expérimentale réside dans l'utilisation de scénarii opérationnels et d'images d'environnement de vol simulés. L'analyse des réponses et des temps de réponses présente des caractéristiques différentes selon l'utilisation de DVN fonctionnels (« stimulation ») ou simulés (« simulation »).

D'autres paramètres ont également été pris en considération, comme le niveau de luminance, l'uniformité de luminance dans le champ et le niveau d'expertise.

2.2. Méthodologies sensorielles

Des différences sont classiquement reconnues entre les systèmes de type 1 et 2, dans la réalisation des tâches et activités de pilotage, notamment dans les niveaux de nuit les plus sombres. Il est cependant assez difficile de quantifier l'existence de réelles différences de performances optiques entre ces deux types de systèmes.

Avant d'adresser les aspects du traitement cognitif des informations visuelles, il nous a semblé nécessaire d'étudier un premier aspect de l'évaluation des DVN, au niveau du traitement sensoriel des informations visuelles. Nous avons choisi de nous intéresser à deux aspects essentiels de la performance visuelle : l'acuité visuelle et la sensibilité au contraste. Dans les deux cas, une étude comparative entre des systèmes de type 1 et 2 a été réalisée.

La démarche a consisté, dans un premier temps, à étudier l'effet de l'hyperstéréoscopie sur l'acuité visuelle, pour des courtes distances (inférieures à 6 mètres). Puis, une méthodologie

d'évaluation de la sensibilité aux contrastes, compatible de l'utilisation des DVN a été envisagée.

Dans les deux expérimentations, les mesures sont réalisées en utilisant des anneaux de Landolt, présentés au centre du champ de vision du DVN, à différents niveaux de nuit. Cette approche permet d'établir le lien entre le niveau de luminance et la performance visuelle.

2.2.1. Effet de l'hyperstéréoscopie sur l'acuité visuelle à courte distance

Dans le premier chapitre de la partie 3, nous avons voulu comprendre comment intervient le conflit accommodation/convergence dans les systèmes de type 2, avec sur-écartement des capteurs. Ce point constitue un facteur causal possible dans les difficultés rapportées par les pilotes d'hélicoptères utilisant ce type de systèmes, notamment quand ils regardent à des distances proches (moins de 6 mètres).

Quand les objectifs du DVN sont focalisés à la distance du stimulus, l'augmentation de la séparation des tubes induit une dégradation significative de l'acuité visuelle, en particulier pour les objets proches (situés à moins de 6 mètres). Cependant, les résultats obtenus montrent que le réglage des oculaires à 4 mètres, permettant ainsi de réduire le conflit A/C, a un effet positif sur l'acuité visuelle et le confort. Ceci confirme les résultats acquis par le passé dans ce domaine (Fisher et Ciuffreda, 1990 ; Fisher et Ebenholtz, 1986 ; Kotulak et Morse, 1994) du rôle du conflit accommodation/convergence, relatif à l'hyperstéréoscopie. Les données d'études précédentes montrent que, quand les sujets peuvent régler l'oculaire, ils ont tendance à placer l'image entre 1 et 4 mètres, mais principalement entre 1 et 2 mètres (Gleason et Riegler, 2001 ; Kotulak and Morse, 1994 ; Menu et al., 1984 ; Task, 2000). En condition d'hyperstéréoscopie, ce réglage diminue effectivement le conflit accommodation/convergence.

Quand les objectifs du DVN sont focalisés à l'infini, conditions identiques à celle du vol, on n'observe pas d'effet de l'augmentation de la séparation des tubes dans les conditions expérimentales réalisées. Compte-tenu de ces résultats, il semble improbable que le conflit accommodation/convergence puisse réellement jouer un rôle dans la dégradation des informations visuelles relevée par les pilotes lors d'atterrissage avec les systèmes de type 2.

2.2.2. Mesure de la sensibilité au contraste

La mise en place d'une méthodologie d'évaluation de la sensibilité au contraste, utilisable pour les DVN de type 1 et 2, fait l'objet du deuxième chapitre de la partie 3. Toutes les études antérieures auxquelles nous avons comparé nos résultats, n'ont été réalisées que sur des

systèmes de type 1. Il n'existe, à notre connaissance, aucune étude de ce genre sur des systèmes de type 2.

En dépit d'une importante variabilité interindividuelle, la sensibilité au contraste diminue quand la fréquence spatiale du stimulus augmente, pour les deux types de DVN. Cette constatation est en accord avec les données d'études antérieures, qui montrent une diminution de la sensibilité au contraste, particulièrement pour les hautes fréquences spatiales (Biondini et Mattiello, 1985 ; Hughes, 2001 ; Kotulak et Rash, 1992 ; Rabin, 1993 ; Rabin, 1996 ; Wiley, 1989).

On constate que la sensibilité aux contrastes diminue avec le niveau de nuit, quel que soit le type de DVN, ce qui confirme les données acquises dans le domaine déjà largement citées dans cette thèse (Hughes, 2001 ; Kotulak et Rash, 1992 ; Levine et Rash, 1989 ; Rabin, 1992 ; Rabin, 1993 ; Rabin, 1994a ; Wiley, 1989).

Dans l'étude 1, réalisée en isoluminance à l'œil, la mesure de sensibilité au contraste indique qu'il n'existe pas de différence entre les deux types de DVN. Dans l'étude 2, la quantité de lumière délivrée à l'oculaire varie en fonction du système. Cette différence représente les conditions normales de luminance à l'oculaire entre les deux systèmes. Elle est représentative de la réalité opérationnelle. Les résultats indiquent une différence de sensibilité aux contrastes entre les deux systèmes, pour le niveau de *nuit 4*. Ces deux expérimentations permettent de confirmer notre hypothèse de départ selon laquelle la différence de luminance en sortie des tubes, entre un système de type 1 et un de type 2, conduit à observer une différence de sensibilité au contraste entre les deux.

L'utilisation de cette méthode, qui combine le logiciel FrACT (Bach, 1996), couplé à la présentation d'image sur fond rouge (Rabin, 1993), permet de conduire des expérimentations sur le contraste, pour les deux types de DVN. Il demeure cependant difficile de maîtriser l'environnement lumineux et son impact sur les mesures de sensibilité au contraste, en particulier pour les très basses luminances.

2.3. Méthodologies cognitives

La prise en compte des aspects sensoriels du traitement des informations visuelles n'est en elle-même pas suffisante pour mener une évaluation prédictive, totalement satisfaisante en termes d'utilisabilité opérationnelle. Il apparaît donc intéressant de considérer une approche méthodologique plus proche des activités opérationnelles des pilotes. Ceci pourrait permettre d'appréhender plus efficacement les caractéristiques des traitements cognitifs effectués à partir des images issues des tubes IL.

La démarche a consisté, dans un premier temps, à simuler des images issues des tubes IL afin de mettre en place les scénarii opérationnels permettant d'évaluation. Il s'agit là tout d'abord de tester l'influence de différents paramètres (fréquences spatiales, contraste, niveau de nuit) sur les tâches choisies pour les évaluations. Ensuite, ces mêmes scénarii ont été utilisés pour identifier les effets observés lors de l'utilisation de systèmes vision nocturne fonctionnels, dans des tâches de détection et de prise de décision, sur des images simulant un vol en hélicoptère. La méthode élaborée en simulation a ainsi permis de comparer les performances de deux DVN, un système de type 1 et un type 2, sachant que le système de type 1est reconnu pour avoir une meilleure résolution spatiale que celui de type 2, d'ancienne génération.
Les mesures ont été réalisées à différents niveaux de nuit, afin d'évaluer le lien avec entre la luminance et la performance visuelle sur les tâches de détection et de prise de décision.

2.3.1. Simulation

Cette étude montre que les tâches de détection peuvent être influencées par l'expérience des sujets. Les résultats montrent des arguments en faveur de la prudence des experts, dans l'interprétation des images issues des tubes IL.
Dans la tâche de détection d'un objet, le niveau de nuit constitue une information d'entrée essentielle, comme dans toute prise d'information visuelle. De nombreuses études, largement citées dans cette thèse se sont intéressées aux effets du niveau de nuit. Cette étude a cependant l'originalité de mettre en évidence l'effet du niveau de nuit dans le contexte d'une tâche de détection, proche de l'activité opérationnelle.
Les performances de détection sont dépendantes de la fonction de sensibilité au contraste, en particulier, des moyennes fréquences. Ceci est en accord avec les données des courbes de sensibilité aux contrastes.

Comme pour la tâche de détection, les tâches de prise de décision sont fortement influencées par l'expérience des sujets. La procédure mise en place par les experts est plus coûteuse d'un point de vue cognitif, mais elle est en fait plus sûre, au détriment de la rapidité. Les pilotes explicitent la procédure en termes d'exigences de sécurité et d'efficacité en s'appuyant sur l'expertise acquise en conditions réelles. Les novices ne peuvent connaître ce genre d'exigences liées aux conditions de vol et s'appuient essentiellement sur des habiletés perceptives.

Les performances de prise de décision ne sont pas dépendantes du niveau de luminance. Même si l'identification est plus tardive en *nuit 4*, la prise de décision n'est pas réellement modifiée en raison de la contrainte temporelle imposée par le déroulement du scénario.
Nos résultats indiquent l'absence de lien entre la fonction de sensibilité aux contrastes et les tâches de prise de décision. Par contre, un contraste modéré améliore les performances d'identification des sujets sans pour autant avoir d'impact sur leurs performances de prise de décision.

2.3.2. Stimulation

L'acuité visuelle des sujets avec les deux DVN est évaluée au début de cette expérimentation. Ceci a permis de vérifier que, conformément à nos hypothèses, le système de type 1 permet d'obtenir de meilleures performances que celui de type 2.
Dans la tâche de détection, l'effet du niveau de nuit est mis en évidence. Ceci confirme les données acquises antérieurement qui montrent les effets du niveau de nuit sur l'acuité visuelle, évaluée avec des mires de résolution spatiale, avec des DVN de type 1. Cette expérimentation permet de mettre en évidence un effet du niveau de nuit sur des tâches de plus haut niveau qu'une tâche sensorielle d'acuité visuelle.
Bien que l'acuité visuelle des sujets soit meilleure avec le DVN de type 1, aucune différence n'a été mise en évidence entre les deux systèmes pour la tâche de détection. Cependant, une corrélation a été mise en évidence entre l'acuité visuelle, le nombre de réponses (globales et correctes) et leurs temps de réponses. La signification la plus probable est qu'il existe sans doute un lien entre l'acuité visuelle et la tâche de détection.
Avec des systèmes fonctionnels, l'étude met en évidence l'absence d'effet de l'expérience. Cette absence d'effet peut s'expliquer par l'importance de la variabilité interindividuelle (déviation standard) ; parfois les valeurs sont aussi importantes que celles des moyennes. Chez les experts, un des pilotes présente des variations de performance importante par rapport à tous les sujets et comparativement à l'étude de « simulation ». Il a été identifié, chez ce sujet, que son acuité visuelle photopique est en-dessous de nos critères malgré sa correction (8/10). Ses verres correcteurs n'ont, en fait, pas été vérifiés depuis au moins 3 ans. La variabilité de ses résultats peut être expliquée par une acuité visuelle nettement en dessous des critères d'inclusion normalement utilisés dans les diverses expérimentations rapportées dans cette thèse.
Dans la tâche de prise de décision, l'effet de l'expérience est présent dès la phase d'identification, contrairement aux résultats de l'expérimentation en simulation. Cela signifie

que des différences existent entre experts et novices dès la phase d'identification de la vallée, tout comme lors de la prise de décision. La tactique des experts est plus prudente et ils s'assurent d'avoir bien identifié leurs repères avant de prendre une décision. Même si les experts apparaissent moins performants lors de l'identification, en partie liée à l'acuité visuelle médiocre déjà rapportée d'un sujet, ils obtiennent cependant une plus grande régularité dans leurs comportements. Le pilote, plus âgé et mal corrigé, parvient à réaliser 3 identifications correctes sur les 4, mais seulement 1 seule prise de décision. L'autre pilote parvient à prendre une décision à chaque fois qu'il identifie la vallée. Ces pilotes montrent qu'ils sont capables, contrairement aux novices, de corriger leurs erreurs et de modifier leurs choix initial pour s'engager sur la bonne trajectoire. On peut voir, dans ces résultats, l'effet combinée d'un comportement procédural et d'habiletés perceptives plus efficaces que celles des novices. Par rapport au groupe des novices, ils génèrent des temps de réponse plus longs, mais un taux de réponses correctes nettement meilleur.

Les résultats mettent en évidence un effet du type de DVN en faveur du système de type 2, lors de la phase d'identification de la vallée. Cet effet n'est pas retrouvé dans la prise de décision. En dépit du fait que le système de type 2 limite l'acuité visuelle équivalente, les sujets apparaissent plus rapides dans l'identification de la vallée, sans pourtant donner plus de réponses correctes. Il existe aussi des corrélations négatives entre l'acuité visuelle limite et le temps d'identification (de toutes les réponses et des réponses correctes) et du temps de prise de décision (toutes réponses confondues). Cela indique l'existence d'un lien entre l'acuité visuelle, en fonction du type de DVN, et de la performance sur ce type de tâche.

Comme dans toutes nos autres expérimentations, l'effet du niveau de nuit est présent, dans la tâche de prise de décision.

3. Apports sur les méthodologies d'évaluation des DVN

Dans la première partie de cette thèse, l'étude de la littérature sur les méthodologies existantes pour évaluer les DVN à intensification de lumière a mis en évidence qu'il existe peu de tests impliquant des sujets humains. L'approche méthodologique utilisée dans le cadre des évaluations, que ce soit pour la partie sensorielle ou cognitive, ont permis de progresser vers des méthodes impliquant directement les utilisateurs.

Dans les méthodologies sensorielles, nous avons mis en place des méthodes basées sur celles existantes, en apportant des modifications sur :

- Le type de stimuli utilisés : pour l'évaluation de l'acuité visuelle et de la sensibilité aux contrastes, ce sont les anneaux de Landolt qui ont été utilisés au lieu des mires recommandées (USAF 1951 pour l'acuité et Pelli-Robson pour le contraste) ;
- La distance d'évaluation : pour le contraste, il est recommandé d'effectué les mesures à 40 cm de l'écran. Cependant, le système de type 2 testé est un dispositif dont les tubes IL sont déplacés sur le côté, ce qui augmente la demande en convergence environ d'un facteur 4. De plus, la gamme de réglage des objectifs ne permet pas de faire la mise au point en-dessous de 3,50 mètres. Il est donc difficile de faire les évaluations de sensibilité aux contrastes à si courte distance.

Ce type d'évaluation a permis de mettre en évidence la difficulté et l'importance de la maitrise de l'environnement lumineux dans ce type de méthodologie.

L'importance de la restitution de l'environnement lumineux est un problème qui a été rencontré à nouveau lors de la mise en place des méthodologies cognitives.

Pour ce type de méthodes, les moyens mis en place sont nouveaux par rapport à ceux généralement recommandés :

- Tout d'abord, pour ces évaluations, un vidéoprojecteur haute résolution, compatible des dispositifs de vision nocturne, a été utilisé pour servir de source lumineuse et afficher les vidéos des scénarii. Pour obtenir les niveaux de nuit, la calibration d'une source lumineuse classique et d'un vidéoprojecteur diffère. Il a donc été nécessaire de convertir la luminance du vidéoprojecteur en niveaux de nuits équivalents ainsi que réfléchir aux modalités d'atténuation du flux lumineux sortant.
- Les scénarii reproduisant des activités typiques des vols réalisés par les pilotes sont affichés afin d'évaluer l'effet de différents facteurs. Il n'y a pas de contrôle actif de la part des sujets, ce qui permet de recueillir des données contrôlées et reproductibles.
- Les tâches considérées ici sont du type de type détection/reconnaissance/identification et prise de décision, à fort contenu cognitif.

Le point essentiel qui ressort de cette approche de méthodologie cognitive est l'importance de l'expertise des sujets, mais aussi la manière dont ils réalisent les tâches. Les résultats indiquent des différences entre experts et novices, sur les variables mesurées, ainsi que l'utilisation de procédures par les experts pour prendre des décisions plus efficacement. Dans un cadre d'évaluations prédictives, en amont des essais en vol de systèmes de vision nocturne, il apparaît donc indispensable de travailler avec une population de pilotes qualifiés pour obtenir une fiabilité satisfaisante des résultats.

En résumé, l'approche méthodologique utilisée a permis :

- De reproduire des activités/tâches de type opérationnel (détection et prise de décision) sans qu'il y ait intrusion dans l'activité de vol des pilotes ;
- D'obtenir des résultats relativement reproductibles sur l'effet de plusieurs facteurs que sont le contraste, le contenu fréquentiel et la luminance ;
- De mettre en place un environnement contrôlé, avec des variables et conditions contrôlées pour la réalisation des évaluations ;
- De réaliser une évaluation qualitative, c'est-à-dire une comparaison de deux systèmes de vision nocturne, de différent type ;
- De mettre en évidence l'importance de réaliser ce type d'évaluation préférentiellement avec une population d'experts pour mettre en évidence des différences entre des systèmes, si elles existent.

4. Perspectives et conclusion

Les expérimentations menées ont permis d'apporter des méthodes nouvelles pour l'évaluation de systèmes de vision nocturne à base d'intensification de lumière avec « l'Homme dans la boucle ». Il s'agit de l'apport d'améliorations à des méthodes existantes, mais aussi l'élaboration de nouvelles méthodes originales, fondées sur l'utilisation d'indices cognitifs. Les expérimentations sur des populations de « non-pilotes », sans déficit visuel, sans expertise spécifique, permet de mener des évaluations sensorielles de type mesure d'acuité visuelle et de sensibilité au contraste. Par contre, dans le cadre d'évaluations impliquant des tâches cognitives de haut niveau, il est impératif de travailler avec une population d'experts pour avoir une chance d'obtenir des résultats utilisables pour la préparation d'essais en vol.

Les résultats obtenus n'ont apporté parfois que des réponses partielles ou en ont soulevé d'autres.

Une des premières limitations de ces expérimentations concerne le faible effectif du groupe d'experts et le groupe de novices qui a été testé. Le lien entre les performances « opérationnelles » des sujets et celles des DVN n'a été partiellement établi que pour la résolution spatiale. Il apparaît que la performance des sujets dans les tâches d'identification dépend de la résolution spatiale du DVN utilisé. Pour conforter ce résultat, il serait néanmoins prudent d'approfondir ce sujet en testant d'autres DVN et analysant les relations avec d'autres critères physiques caractérisant les DVN.

Concernant les tâches utilisées pour les évaluations, une approche comparable de DRI et prise de décision pourrait être intéressante en y apportant deux modifications :

- pour analyser la perception de la pente et du mouvement, il serait intéressant de mettre en place les scénarii proposés après analyse des entretiens, mais non développés pour les évaluations ;
- les moyens mis en place nous ont conduits à réaliser des tâches en mode passif, avec un rôle de commandant de bord (CdB) pour le sujet. Dans les vols réels, il s'agit d'une coopération entre le pilote équipé du DVN et du CdB. Cet aspect mérite d'être approfondi en réalisant des tâches avec deux opérateurs.

Enfin, l'étude sur des images de simulation d'environnement de vol soulève des questions sur le contenu de l'image par rapport à des images naturelles de vol en hélicoptères. Il est difficile de rendre compte, par exemple, de l'albedo qui traduit la capacité de réflexion de la lumière par les objets de l'environnement. Cet élément est essentiel en vision nocturne. Il serait intéressant de réaliser ce type d'évaluation avec des images naturelles enregistrées en vol.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Adelson, E.H. (1995). Checker shadow Illusion. http://web.mit.edu/persci/people/adelson/checkershadow_illusion.html
2. Adelman, L., Bresnick, I., Black, P.K., Marvin, F.F. et Sak, S.G. (1996). Research with patriot at defense officers: examining information order effects. *Human Factors, 38*(2), 250-261.
3. Alpern, M. et Ellen, P. (1956). A quantitative analysis of the horizontal movements of the eyes in the experiment of Johannes Mueller. I. Method and results. *American Journal of Ophthalmology, 42*(4 Part 2), 289-296.
4. Amalberti, R., Valot, C. et Menu, J.P. (1987). *Etude préliminaire dans le cadre du développement d'aides intelligentes au pilotage : formalisation de l'expertise d'un pilote de combat et maquettage d'un système interactif de représentations opérationnelles*. Rapport CERMA 87-31. Paris, France: Centre d'Etudes et de Recherche de Médecine Aérospatiale.
5. Anderson, J.R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
6. Anderson, J.R. (1985). Development of expertise. In Freeman (Ed.), *Cognitive psychology and its implications, 2nd edition* (Chap. 9, 232-259).
7. Anderson, J.R. (1990). Analysis of student performance with the LISP tutor. In N. Frederiksen, R.Glaser, A. Lesgold & M.Shafto (Eds.), *Diagnostic monitoring of skill and knowledge acquisition* (27-50). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
8. Annett, J. et Duncan, K. D. 1967. Task analysis and training design. *Journal of Occupational Psychology, 12*, 211-221.
9. Atkinson, R. et Shifrin, R. (1968). Human Memory: a proposed system and its control processes. In *The Psychology of Learning and Motivation* (88-95). New York: Academic Press.
10. Atwood, M.E. et Polson, P.G. (1976). A process model for water jar problems. *Cognitive psychology, 8*, 191-216.
11. Aymeric, B. (1996). *Perception de la situation verticale d'un pilote en phase d'approche*. Mémoire de DEA. Paris VI.
12. Baber, C., Borras, C., Hone, G., MacLeod, I., McAster, R., Salmon P. et Stanton N. (2005). *Cognitive task analysis: current use and practive in the UK Armed Forces and elsewhere*. Report HFIDTC/WP22.3.1/1. UK Defence technology Centre.
13. Bach, M. (1996). The "Freiburg Visual Acuity Test", Automatic measurement of visual acuity. *Optometry and vision science, 73*(1), 49-53.
14. Baddeley, A.D. et Hitch, G. (1974). Working memory. In G.H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (*8*, 47-89). New York: Academic Press.
15. Barnett, S.M. et Kolowski, B. (2002). Adaptative expertise: effects of type of experience and the level of theorical understanding it genertes. *Thinking and Reasoning, 8*, 237-267.
16. Baudou, J., Reynaud, G., Poussin, G. et Leger, A. (2005). Double protection passive pour les équipages de l'hélicoptère d'attaque "Tigre": concept et étude expérimentale. In *Nouvelles orientations pour l'amélioration des techniques audio* (17-1 – 17-14). Compte rendu de réunion RTO-MP-HFM-123, Communication 17. Neuilly-sur-Seine, France: RTO.
17. Berkley, W.E. (1992). *Visual problems in Night Operations*. Agard Lecture Series 187 (1-1, 1-4).

18. Biederman, I. (1985). Human image understanding: Recent research and theory. In Academic press (Ed.), *Human and Machine Vision II* (13-57).
19. Biederman, I. et Cooper, E.E. (1991). Object recognition and laterality: Null effects. *Neuropsychologia, 29*, 685–694.
20. Biondini, A.R. et de Mattiello, M.L.F. (1985). Suprathreshold contrast perception at different luminance levels. *Vision Research, 25*(1), 1-9.
21. Bishop, P.O. (1989). Vertical disparity, egocentric distance and stereoscopic depth constancy: a new interpretation. In the *Proceedings of the Royal Society of London, Series B* (*237*, 445-469).
22. Blanchet, A. (1989). Les relances de l'interviewer dans l'entretien de recherche : leurs effets sur la modalisation et la déictisation du discours de l'interviewé. *L'année psychologique, 89* (3), 367-391.
23. Bloch,I., Gousseau, Y., Maître, H., Matignon, D., Pesquet-Popescu, B., Schmitt, F., Sigelle, M. et Tupin, F. (2005). *Le traitement des images tome 2*. Département TSI - Télécom-Paris.
24. Bobier, W.R. et McRae, M. (1996). Gain changes in the accommodative convergence cross-link. *Ophthalmic and Physiological Optics, 16*, 318-325.
25. Bonnet, C. (1994). Modèles pour la description des situations perceptives: l'analyse du signal. In R. Ghiglione & J.F. Richard (Eds.), *Cours de psychologie, 3*. Paris: Dunod-CNED.
26. Bonnet, C. (1989). La perception visuelle des formes. In C. Bonnet, R.Ghiglione, & J.F. Richards (Eds.), *Traité de psychologie cognitive*. Paris: Dunod.
27. Bonnet, A., Haton, J-P. et Truong-Ngoc, J-M. (1986). *Systèmes-experts : vers la maîtrise technique*. Paris : InterEditions.
28. Brettel, H., Corno-Martin, F. et Denieul, P. (1993). Accommodative accuracy to sinusoidal grating patterns. In G. Von Bally & S. Khanna (Eds), *Optics in medicine, biology and environmental research* (115-117).Garmish-Partenkirchen, Germany.
29. Brickner, M.S. (1989). *Helicopter flights with night vision goggles: Human factors aspects*. NASA Technical Memorandum 101039. Moffett Field, CA: National Aeronautics and Space Administration.
30. Brown, J.L. (1965). The structure of the visual system. In C.H. Graham, N.R. Bartlett, J.L. Brown, Y. Hsia, C.G. Mueller & L.A. Riggs (Eds.), *Vision and Visual Perception*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
31. Bruner, J. S. (1973). *Beyond the information given*. New York: W.W. Norton.
32. Buffat, S. (2007). *Reconnaissance d'objets dans des environnements bruités et fusion d'informations visuelles naturelles*. Thèse de doctorat en sciences cognitives, Paris VI.
33. Bühren, J., Terzi, E., Bach, M., Wesemann, W. et Kohnen, T. (2006). Measuring contrast sensitivity under different lighting conditions: comparison of three tests. *Optometry and vision science, 83*(5), 290-298.
34. Buser, P. et Imbert, M. (1987). *Vision-Neurophysiologie fonctionnelle IV*. Paris: Hermann.
35. Campbell, F.W. et Gregory, A.H. (1960). Effect of pupil size on visual acuity. *Nature, 187*, 1121-1123.

36. Campbell, F.W. et Robson, J. (1968). Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology, 197*(3), 551-566.
37. Carlson, V.R. (1962). Adaptation in the perception of visual velocity. *Journal of Experimental Psychology, 64,* 192-197.
38. Cavanagh, P. et Mather, G. (1989). Motion: the long and short of it. Spatial vision, 4(2-3), 103-129.
39. Cave, C.B. et Kosslyn, S.M. (1993). The role of parts and spatial relations in object identification. *Perception, 22*, 229-248.
40. Chapanis, A. (1947). The dark adaptation of the color anomalous measured with lights of different hues. *Journal of General Physiology, 30*(5), 423-437.
41. Chevreul, M.E. (1839). *De la loi du contraste simultané des couleurs et de l'assortiment des objets colorés*. Paris : Pitois-Levrault.
42. Ciavarelli, A., Kishore, A. S. et Baer, W. (1994). *Night vision goggle training technology*. Technical Report. Monterey, CA: Naval Postgraduate School.
43. CIE standard (1924). *Luminous efficiency functions: photopic V(λ).*
44. CIE standard (1951). *Luminous efficiency functions: scotopic V(λ).*
45. Ciuffreda, K.J. (1991). Accommodation and its anomalies. In W.W. Charman (Ed.), *Vision and Visual Dysfunction* (231-279). London: MacMillian Press.
46. Cook, R.I. et Woods, D.D. (1994). Operating at the sharp end: the complexity of human error. In M.S. Bogner (Ed.), *Human error in medicine* (255-301). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
47. Craig, J.L. et Geiselmann, E.E. (1998). Further development of the panoramic night vision goggle. In *Proceedings of the 1998 SAFE Association Symposium*. Phoenix, AZ: SAFE Association.
48. Craig, J., Task, L. et Filipovic, D. (1997). Development and Evaluation of the Panoramic Night Vision Goggle. In the *Proceedings of Shepard's 6th International Night Vision Conference and Exhibition*. Arlington, Virginia, U.S.
49. Cutting, J.E. et Proffitt, D.R. (1982). The minimum principle and the perception of absolute, common and relative motions. *Cognitive Psychology, 14,* 211-246.
50. Davson, H. (1949). Some considerations on the salt content of fresh and old ox corneae. *British Journal of Ophthamology, 38*, 175-182.
51. Dennis, R.J., Beer, J.M.A., Baldwin, J.B., Ivan, D.J., Lorusso, F.J. et Thompson, W.T. (2006). Using the Freiburg Visual Acuity Test to measure visual performance in USAF personnel after PRK. *Optometry and vision science, 81*(7), 516-524.
52. Department of Defense, Military Specification MIL-I-49428 (1989). *Image Intensifier Assembly, 18-mm Microchannel Wafer, MX-10160/AVS-6*.
53. Department of Defense, Military Specification, MIL-A-49425 (CR) (1992). *Aviator's Night Vision Imaging System, AN/AVS -6(V)1, AN/AVS-6(V)2*.
54. De La Hire, P. (1711). Remarques sur quelques couleurs. *Mémoires de l'académie royale des sciences*, 78-80.
55. De Mont-Mollin, M. (1984). *L'intelligence de la tâche*. In P. Lang (Ed.). Berne.
56. De Palma, J.J. et Lowry, E.M. (1962). Sine-wave response of the visual system. II. Sine-wave and square-wave contrast sensitivity. *Journal of Optical Society of America, 52*, 328-335.

57. De Valois, R.L., Abramov, I. et Jacobs, G.H. (1966).Analysis of response patterns of LGN cells. *Journal of Optical Society of America, 56,* 966-977.
58. De Valois, R.L. et De Valois, K.K (1975). Neural coding of color. In Carterette E.C. & Friedman M.P (Eds), *Handbook of perception volume V Seeing* (117-168). New York: Academic Press.
59. De Valois, R.L. et De Valois, K.K (1988). *Spatial Vision*. New York, NJ: Oxford University Press
60. Donderi D.C. (1994). Visual acuity, colour vision, and visual search performance at sea. *Human Factors, 36,* 705-709.
61. Dowling, J.E. (1987). *The retina: an approachable part of the brain*. Cambridge, MA: Belknap.
62. Dyer, J.L. et Young, K.M. (1998). *Night vision goggle research and training issues for ground forces: A literature review*. Alexandria, VA: US Army Research Institute.
63. Ealet, F. (2004). *Une architecture multi-agent pour la détection, la reconnaissance et l'identification de cibles*. Thèse de doctorat en Informatique, Grenoble I.
64. Einhorn, H.J. et Hogarth, R.M. (1978). Confidence in judgment: persistence of the illusion of validity. *Psychological review, 85,* 395-416.
65. Endsley, M.R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors, 37,* 85-104.
66. Ericsson, K.A et Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review, 102,* 211-245.
67. Ericsson, K.A et Lehmann, A.C. (1996). Expert and exceptional performance: evidence of maximal adaptation to task constraints. *Annual Review of Psychology, 47,* 273-305.
68. Essock , E.A., Sinai, M.J., McCarley, J.S., Krebs, W.K. et DeFord, J.K. (1999). Perceptual ability with real-world nighttime scenes: image-intensified, infrared, and fused-colour imagery. *Human factors, 41,* 438-452.
69. Evans, L. (1991). *Fixed wing night attack EO integration and sensor fusion*. AGARD Conference proceedings, 517, 1-5.
70. Farrell, R.J., et Booth, J.M. (1984). *Design Handbook for imagery interpretation equipment.* Seattle: Boeing Aerospace Company.
71. Felleman, D. J. et Van Essen, D. C. (1991). Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cerebral Cortex, 1*(1), 1-47.
72. Fergusson-Hessler, M.G.M. et De Jong, T. (1987). On the quality of knowledge in the field of electricity and magnetism. *American Journal of Physics, 55,* 492-497.
73. Fincham, E.F. et Walton, J. (1957). The reciprocal actions of accommodation and convergence. *Journal of Physiology, 37,* 488-508.
74. Findley, J. M. (1995). Eye movements and peripheral vision. *Optometry and Vision Science, 72,* 461–466.
75. Finlay, D. (1982). Motion perception in the peripheral visual field. *Perception, 11*(4), 457-462.
76. Fischer, S.K. et Ciuffreda, K.J. (1990). Adaptation to optically-increased interocular separation under naturalistic viewing conditions. *Perception, 19,* 171-180.

77. Fischer, S.K. et Ebenholtz, S.M. (1986). Does perceptual adaptation to telestereoscopically enhanced depth depend on the recalibration of binocular disparity? *Perception and Psychophysics, 40*(2), 101-109.

78. Fischhoff, B. (1982). Debiasing. In D. Kanhneman, P. Slovic & A. Tversky (Eds.), *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases* (422-444). New York: Cambridge University press.

79. Fitts, P.M. (1964). Perceptual-Motor Skill Learning 1. In A.W. Melton (Ed.), *Categories of human learning* (243-285). San Diego, CA: Academic Press.

80. Foyle, D.C. et Kayser, M.K. (1991). Pilot distance estimation with unaided vision, night-vision goggles and infrared imagery. *SID International Symposium Digest of Technical Papers, XXII* (314-317).

81. Gao, Y. (1992). *Etude psychophysiologique de la vision en relief humaine en télévision stéréo*. Thèse de doctorat en génie biologique et médical, INSA Lyon.

82. Gatinel, D. (2010). *Anomalies de la vision : amétropies.* http://www.gatinel.com/chirurgie-refractive/anomalies-de-la-vision/ametropies/

83. Gauthier, M., Obrecht, G., Pedrono, C., Vercher, J.L. et Stark, L. (1987). Adaptive optimization of eye-head coordination with degraded peripheral vision. In J.K. O'Regan, A. Lévy-Schoen (Eds.), *Eye movements: from physiology to cognition* (201-210). New York: Elsevier Science.

84. Ghiglione, R. et Matalon, B. (1978). *Les Enquêtes Sociologiques: Théories et Pratiques*. Paris: Colin.

85. Gibson, E. J. (1969). *Principles of perceptual learning and development*. New York: Appletown-Century-Crofts.

86. Gick, M.L. (1986). Problem-solving strategies. *Educational Psychologist, 21*, 99-120.

87. Gigerenzer, G., Todd, P.M. et the ABC Group (1999). *Simple heuristics that make us smart*. New York: Oxford University Press.

88. Gilinsky, A.S. (1989). The moon illusion in a unified theory of visual space. In M. Hershenson (Ed.), *The moon illusion* (167-192). Hillsdale, NJ: Lawrence Erbaum Associates, Inc.

89. Giraudet, G. et Roumes, C. (2001). Influence of object background on spatial-frequency processing. *Perception 30*, ECVP, Abstract Supplement.

90. Giraudet, G. et Roumes, C. (2004). La signature spatiale de l'objet : une information essentielle pour la localisation de cibles dans une scène naturelle. L'année psychologique, 104(1), 9-49.

91. Gleason, A. et Riegler, J.T. (2001). *The effect of eyepiece focus on visual acuity through ANVIS night vision goggles during short- and long-term wear*. Report AFRL-HE-WP-TR-2001-0033. Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Research Laboratory.

92. Grainger, J. et Segui, J. (1990). Masquage et effet de répétition du mot: sa nature et sa localisation fonctionnelle. *L'année psychologique, 90*(3), 345-357.

93. Grill-Spector, K. et Kanwisher, N. (2005). Visual recognition: As soon as you know it is there, you know what it is. *Psychological Science, 16*(2), 152-160.

94. Guitton, D., Kearney, R.E., Wereley, N. et Peterson, B.W. (1986). Visual, vestibular and voluntary contributions to human head stabilization. *Experimental Brain Research, 64*, 59-69.

95. Hahn, U. et Ramscar, M. (2001). Introduction: similarity and categorization. In U. Hahn & M. Ramscar (Eds.), *Similarity and Categorization*. Oxford: Oxford University Press.

96. Hayhoe, M.M. (2000). Vision using routines: A functional account of vision. *Visual Cognition, 7*, 43-64.
97. Hayhoe, M.M., Ballard, D.H., Triesch, H., Aivar P. et Sullivan, B.T. (2002). Vision in Natural and Virtual Environments. In *Eye Tracking Research and Applications Symposium* (7-13).
98. Hering, E. (1964). *Outlines of a theory of the light sense*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
99. HFM-091/RTG-027 (2008). *Common methodological basis for evaluation and testing of visionic devices*. Report AC/323(HFM-091)TP/76. North Atlantic Treaty Organization's (NATO's) Research and Technology Organization (RTO) panel on Human Factors and Medicine (HFM).
100. Hoffman, R.R. (2003). An empirical comparison of CTA/CWA methods. CTA Resource Online Seminar, 17 January 2003.
101. Hollingworth, A. (2004). Constructing visual representations of natural scenes: The roles of short- and long-term visual memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 30*, 519-537.
102. Hollingworth, A. et Henderson, J.M. (2002). Accurate visual memory for previously attended objects in natural scenes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 28*, 113-136.
103. Howell, E.R. et Hess, R.F. (1978). The functional area for summation to threshold for sinusoidal gratings. *Vision Research, 18*(4), 369-374.
104. Hubel, D.H. (1994). *L'œil, le cerveau et la vision: les étapes cérébrales du traitement visuel*. Paris: Pour la Science.
105. Hubel, D.H. et Wiesel, T.N. (1965). Receptive fields of single neurons in two nonstriate visual areas (18 abs 19) of the cat. *Journal of Physiology, 28*, 229-289.
106. Hubel, D.H. et Wiesel, T.N. (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *Journal of Physiology, 195*(1), 215-243.
107. Hubel, D.H. et Wiesel, T.N. (1979). Brain mechanism and vision. *Scientific and American, 241*(3), 150-162.
108. Hughes, P.K. (2001). What is different about vision trough night vision goggles? In G. Kearney, M. Creamer, R.marshall, & A. Goyne (Eds.), *Managing stress in the Australian defence force*. Canberra: Defence Publishing Service.
109. Ignizio, J.P. (1991). *Introduction to expert systems: the development and implementation of rule-based expert systems*. New York, NY: McGraw-Hill.
110. Jakobi, J-M., Blanchet, A. et Grossir-Le Nouvel, B. (1990). Quatre formes d'interrogation propositionnelle dans l'entretien de recherche. *Revue de psychologie française, 35*(3), 207-215.
111. Johnson, E.M., Cavanagh, R.C., Spooner, R.L. et Samet, M.G. (1973). Utilization of reliability measurements in Bayesian inference: models and human performance. *IEEE Transactions on Reliability, 22*, 176-183.
112. Jovancevic, J., Sullivan, B. et Hayhoe, M. (2006). Learning gaze allocation priorities in complex environments [Abstract]. *Journal of Vision, 6*(6), 480a.

113. Judge, S.J. et Miles, F.A. (1985). Changes in the coupling between accommodation and vergence eye movements induced in human subjects by altering the effective interocular separation. *Perception, 14*, 617-629.

114. Kahnemann, D., Slovic, P. et Tversky, A. (1982). *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases*. New York: Cambridge University Press.

115. Kahnemann, D. et Tversky, A. (1984). Choices, values, and frames. *American Psychologist, 39*, 341-350.

116. Kandel E.R. et Robert H.W. (2000). Constructing the visual image. In Kandel E.R., Schwartz, J.H. & Jessell T.M. (Eds.), *Principles of Neural Science* (492-506). New York: McGraw-Hill.

117. Kandel E.R., Schwartz, J.H. et Jessell T.M. (2000). *Principles of Neural Science*. New York: McGraw-Hill.

118. Kandel, E.R. et Wurtz, R.H. (2000). Constructing the visual image. In Kandel E.R., Schwartz, J.H. & Jessell T.M. (Eds.), *Principles of Neural Science* (492-506). New York: McGraw-Hill.

119. Kanizsa, G. (1979). *Organization in vision*. New York: Praeger.

120. Kasper, E.F., Haworth, L.A. et Girolamo, H.J. (1997). Effects of in-flight field of view restriction on rotorcraft pilot head movement. In R.J. Lewandowski, L.A. Haworth & H.J Girolamo (Eds.), *Head-Mounted Displays II, Proceedings of SPIE* (*3058*, 34-45). Bellingham, Washington: the International Society of Optical Engineering (SPIE).

121. Kellman, P.J. (2003). Interpolation processes in the visual perception of objects. *Neural Networks, 16*, 915-923.

122. Kellman, P.J. et Loukides, M.G. (1987). An object perception approach to static and kinetic contours. In S. Petry & G. E. Meyer (Eds.), *The perception of illusory contours*. Berlin: Springer.

123. Kobatake, E. et Tanaka, K. (1994). Neuronal selectivities to complex object features in the ventral visual pathway of the macaque cerebral cortex. *Journal of Neurophysiology, 71*(3), 856-867.

124. Koffka, K. (1935). *Principles of Gestalt Psychology*. Londres: Routledge & Kegan Paul.

125. Komatsu, H. et Ideura, Y. (1993). Relationships between color, shape, and pattern selectivities of neurons in the inferior temporal cortex of the monkey. *Journal of Neurophysiology, 70*, 677-694.

126. Kosslyn, S.M. (1995). *Identifying Objects in Degraded Images in « Image and brain »*. Cambridge (MA): the MIT Press.

127. Kotulak, J.C. et Morse, E.M. (1994a). Relationship among accommodation, focus and resolution with optical instruments. *Journal of the Optical Society of America A, 11*(1), 71-79.

128. Kotulak, J.C. et Morse, E.M. (1994b). Focus adjustment effects on visual acuity and oculomotor balance with aviator night vision displays. *Aviation Space and Environmental Medicine, 65*(4), 348-352.

129. Kotulak, J.C. et Rash, C.E. (1992). *Visual acuity with second and third generation night vision goggles obtained from a new method of night sky simulation across a wide range of target contrast*. USSARL Report 92-9. Fort Rucker, AL: U.S. Army Aeromedical Research Laboratory.

130. Kotulak, J.C., Morse, E.M. et Rabin, J.C. (1995). Optical compensation for night myopia based on dark focus and CA/C ratio. *Investigative Ophthalmology and Visual Science, 36*(8), 1573-1580.

131. Kunnapas, T.M. (1960). Scales for subjective distance. *Scandinavian Journal of Psychology, 1*,187-192.

132. Kuffler, S.W. (1953). Discharge patterns and functional organization of mammalian retina. *Journal of Neurophysiology, 25*, 819-840.

133. Larkin, J.H., McDermott, J., Simon, D.P. et Simon H.A. (1980). Expert and novice performance in solving physics problems. *Science, 208*, 1335-1342.

134. Leeper, R. (1935) A study of a neglected portion of the field of learning - the development of sensory organization. *Journal of Genetic Psychology, 46*, 41-75.

135. Leger, A., Roumes, C., Gardelle, C., Cursolle, J.P. et Kraus, J.M. (1994). Binocular HMD for fixed-wing aircraft: a trade-off approach. *Displays, 15*(2), 91-96.

136. Leger, A., Portier, L., Baudou, J. et Trosseille X. (1997). Crash Survavibility And Operational Comfort Issues Of Helmet Mounted Display In Helicopters: Simulation Approach And Flight Tests Results. In the Proceeding *The Design and Integration of Helmet Systems,* Additional paper.

137. Leger, A., Roumes, C., Bergeaud, J. M., Dareoux, P. et Gardelle, C. (1998). Flight testing of a binocular, bisensor HMD for helicopter: some human factors aspects. In R.J. Lewandowski, L.A. Haworth & H.J. Girolamo (Eds), *Helmet-Mounted Displays III, Proceedings of SPIE* (*3362*, 136-143). Bellingham, Washington: the International Society of Optical Engineering (SPIE).

138. Le Grand, Y. (1975). Sur la mesure de l'acuité visuelle au moyen de fringes d'inférence. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris, 200*, 490-91 (translated by W. N. Charman and P. Simonet, 1997).

139. Le Grand, Y. (1975). Measurement of visual stimulus. In Carterette E.C. & Friedman M.P (Eds.), *Handbook of perception volume V Seeing* (25-55). New York: Academic Press.

140. Leibowitz, H.W. et Owens, D.A. (1975a) Night myopia and the intermediate dark focus of accommodation. *Journal of Optical Society of America, 65*(10), 1121-1128.

141. Leibowitz, H. W. et Owens D.A. (1975b). Anomalous myopias and the intermediate dark focus of accommodation. *Science, 189*(4203), 646-648.

142. Leibowitz, H. W. et Owens D.A. (1978) New evidence for the intermediate position of relaxed accommodation. *Documenta Ophtalmologica, 46*(1), 133-147.

143. Leplat, J. (1986). The elicitation of expert knowledge. In: *Proccedings of the NATO Advanced Study Institute on Intelligent decision support in process environments* (107-122). New York: Springer-Verlag.

144. Leverenz, HW. (1950). *An introduction to luminescence of solids*. New York: Wiley.

145. Levine, R.R. et Rash, C.E. (1989). *Attenuating the luminous output of the An/PVS-5A night vision goggles and its effects on visual acuity*. USSARL Report 89-24. Fort Rucker, AL: U.S. Army Aeromedical Research Laboratory.

146. Levison, W. (1983). *Development of a model for human operator learning in continuous estimation and control task*. Rapport AFAMRL-TR-083-088. Wright Patterson AFB.

147. Lichtenstein, M. (1963). Spatio-temporal factors in cessation of smooth apparent motion. *Journal of Optical Society of America, 53*, 302-306.

148. Luce, R.D. et Raiffa, H. (1957). *Games and decisions: Introduction and critical survey*. New-York: Wiley.

149. Lucquiaud, V., Scapin, D.L. et Jambon, F. (2002). Outils de modélisation des tâches utilisateurs : exigences du point de vue utilisation. IHM 2002, Poitiers, 26-29 Novembre 2002.

150. Lucquiaud, V. (2005a). *Sémantique et outil pour la modélisation des tâches utilisateur : N-MDA*. Thèse en informatique, Université de Poitiers, LISI/ENSMA, Décembre 2005.

151. Lucquiaud, V. (2005b). Proposition d'un noyau et d'une structure pour les modèles de tâches orientés utilisateurs. *Proceedings of the 17th French-speaking conference on Human-computer interaction* (Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine) (83-90). Toulouse, France.

152. McLean, W.E. et Rash, C.E. (1999). Optical performance. In C.E. Rash (Ed.), *Helmet-Mounted Displays: Design Issues for Rotary-Wing Aircraft* (93-152). Bellingham, Washinghton: SPIE Press.

153. Maddox, E.E. (1893). *The Clinical Use of Prisms; and the Decentering of Lenses, 2nd edition*. Bristol: John Wright and Co.

154. Maille, M. (1999). Vision. In *Médecine Aérospatiale, 2e edition*. Paris: Expansion Scientifique Publications.

155. Marr, D. (1982). *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. Ed Broché.

156. Marr, D. et Nishihara, H.K. (1978). Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes. In *Proceedings of the Royal Society of London B, 200*, 269-294.

157. Matlin, M.W. (2005). *Cognition, 6th edition*. New York, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

158. Medin, D.L. et Ross, B.H. (1992). *Cognitive Psychology*. Orlando, FL: Harcourt Brave Jovanovich.

159. Melvill Jones, G. et Gonshor, A. (1975). Goal-directed flexibility in the vestibule-ocular reflex arc. In G. Lennerstrand & P. Bach-Y-Rita (Eds.), *Basic Mechanisms of Ocular Motility and Their Clinical Implications*. Oxford and New York: Pergamon Press.

160. Menu, J.P. (1986). *Les fonctions de sensibilité aux contrastes de luminance polychrome chez l'Homme*. Thèse de doctorat en sciences, Paris V.

161. Menu, J.P., Roumes, C. et Plantier, J. (1990). *Limites d'utilisation de la vision binoculaire dans la perception du relief*. Rapport CERMA 90-06. Paris, France: Centre d'Etudes et de Recherche de Médecine Aérospatiale.

162. Menu, J.P., Seigneur, J.M., Barrault, B., Pradella, S. et Batejat, D. (1984). *Etude du concept de visualisation intermédiaire*. Rapport CERMA 84-30. Paris, France: Centre d'Etudes et de Recherche de Médecine Aérospatiale.

163. Meyer, C.H., Lasker, A.G. et Robinson, D.A. (1985). The upper limit of human smooth pursuit velocity. *Vision Research, 25*(4), 561-563.

164. Midavaine T. (2004). *Les intensificateurs d'images*.

165. MIL-L-85762A (1986). *Night vision imaging system (NVIS) compatible interior aircraft lighting*. Military Specification.

166. MIL-HDBK-141 (1962). *Optical design*. Military Standardization Handbook.

167. Miles, F.A. et Judge, S.J. (1987). Optically induced changes in the couplings between vergence and accommodation. *Journal of Neuroscience, 7,* 2576-2589.

168. Militello, L.G. et Klein, G. (1997). Cognitive task analysis: bringing a powerful tool into wide use. *Cseriac Gateway 7*(4).

169. Morgan, M.W. (1980). The Maddox classification of vergence eye movements. *American Journal of Optometry and Physiological Optics, 57*(9), 537-539.

170. Mucchielli, R. (2007). *L'entretien de fac à face, dans la relation d'aide*. Issy-les-Moulineaux : ESF.

171. National Research Council Committee on Vision (1980*). Recommended standard procedures for the clinical measurement and specification of visual acuity*. Report of working group 39. Advanced Ophthalmology, 41,103-48. Assembly of Behavioral and Social Sciences, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C.

172. Neisser, U. (1967). *Cognitive Psychology*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

173. Newell, A. et Simon, H.A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

174. Newton, I. (1672). A new theory about light and colours. *Philosophical transactions, 1.*

175. Newton, I. (1704). A new theory about light and colours. *Treatise on Opticks*, London.

176. Noice, H. (1991). The role of explanations and plan recognition in the learning of theatrical scripts. *Cognitive Science, 15*, 425-460.

177. Norman, L. (1980). *Traitement de l'information et comportement humain, une introduction à la psychologie.* New York: Academic Press.

178. Norman, D.A. (1986). Cognitive engineering. In D.A. Norman & S.W.Draper (Eds), U*ser centered design: New perspectives on human computer interaction* (31-62). Hillsdale, NJ: Laurence Erlbaum Associates.

179. North Atlantic Treaty Organization, NATO Research and Technology Organization (RTO) panel on Human Factors and Medicine (HFM), HFM-091/RTG-027 (2008). *Common methodological basis for evaluation and testing of visionic devices.* Rapport AC/323(HFM-091) TP/76.

180. Ogle, K.N. (1950). *Researches in binocular vision*. New-York, Hafner.

181. O'Reilly, R.C. et Munakata, Y. (2000). *Computational explorations in cognitive neuroscience: Understanding the mind by simulating the brain*. Cambridge, MA: MIT Press.

182. Osterberg, G. (1935). *Acta Ophthalmologica, 6*, 1-103. Copenhague.

183. Paillard (1976). Espace visuel, et programmation motrice. *Cahiers de Psychologie, 19*, 171-180.

184. Paillard, J. (1982). The contribution of peripheral and central vision to visually guided reaching. In: D. J., Ingle, D.J.W., Mansfield & M.A. Goodale (Eds.), *Analysis of visual behavior*. Cambridge, MA: MIT Press.

185. Palmer, S.E. (1999). *Vision Science: Photons to Phenomenology*. Cambridge, MA: MIT Press.

186. Panero, J. et Zelnik, M. (1979). *Human dimension & interior space: a source book of design reference standards*. New York: Watson-Guptill.

187. Pasupathy, A. (2006). Neural basis of shape representation in the primate brain. In Martinez-Conde, Macknik, Martinez & Alonso (Eds.), *Visual Perception (Part 1): Progress in Brain Research* (*154*, 293-313). Elsevier.

188. Patel, A.S. (1966). Spatial resolution by the human visual system. The effect on mean retinal illuminance. *Journal of the Optical Society of America*, *56*, 689-693.

189. Pentland, A. (1980). Maximum likelihood estimation: the best PEST. *Perception and Psychophysics, 28*(4), 377-379.

190. Perkins, F.T. (1932). Symmetry in visual recall. *American Journal of Psychology, 44*, 473-490.

191. Petersen, J. (1990). Zur fehlerbreite der subjektiven visusmessung. *Fortschritte der Ophthalmologie, 87*, 604-608.

192. Phillips, S. et Stark, L. (1977). Blur: a sufficient accommodative stimulus. *Documenta Ophtalmologica, 43*(1), 65-89.

193. Pinkus, A. et Task, H. L. (1997). The effects of aircraft transparencies on night vision goggle-mediated visual acuity. In *Proceedings of the 1997 SAFE Association Symposium* (33-41). Nashville, TN: SAFE Association.

194. Pinkus A. et Task H.L. (1998). Measuring observers visual acuity through night vision goggles. In *Proceedings of the 1998 SAFE Association Symposium* (1-11). Nashville, TN: SAFE Association.

195. Pinkus, A.R., Task, H.L., Dixon, S.A. et Goodyear, C.D. (2000). Reproducibility limits of night vision goggle visual acuity measurements. *SAFE Journal, 30*(1), 131-139.

196. Poliak, S. L. (1941). *The Retina*. Chicago: University of Chicago Press.

197. Porter, E. H. (1950). *An introduction to therapeutic counseling*. Boston, Houghton Mifflin.

198. Priot, A.E., Hourlier, S., Giraudet, G., Léger, A. et Roumes, C. (2006). Hyperstereopsis in Night Vision Devices : basic mechanisms and impact for training requirements. In R.J. Lewandowski, L.A. Haworth & H.J. Girolamo (Eds.), *Helmet-Mounted Displays III, Proceedings of SPIE* (*6224*). Bellingham, Washington: the International Society of Optical Engineering (SPIE).

199. Priot, A.E., Hourlier, S., Barbarat, E. et Roumes, C. (2007). Adaptation to increased interocular distance: survey of Tiger pilots training. In *Human Factors and Medical Aspects of Day/Night All Weather Operations: Current Issues and Future Challenges, RTO Meeting Proceedings HFM-141* (30-1-30-12).

200. Purkinje, J.E. (1819). *Beiträge zur kenntnis des sehens in subjective hinsicht*. Prague.

201. Purkinje, J.E. (1825). *Beobachtungen und versuche zur physiologie der sinne: Neue beiträge kenntnis des sehens in subjective hinsicht*. Berlin.

202. Rabin, J.C. (1992). *Human visual limitations on suprathreshold contrast perception through ANVIS*. USSARL Report 93-3. Fort Rucker, AL: U.S. Army Aeromedical Research Laboratory.

203. Rabin J.C. (1993). Spatial contrast sensitivity through Aviator's Night Vision Imaging System. *Aviation Space and Environmental Medicine, 64*, 706-710.

204. Rabin, J.C. (1994a). Luminance effects in visual acuity and Small Letter Contrast Sensitivity. *Optometry and Vision Science, 71*(11), 685-688.

205. Rabin, J. (1994b). Optical defocus: differential effects on size and contrast letter recognition thresholds. *Investigative Ophthalmology and Visual Science, 35*(2), 646-648.

206. Rabin, J.C. (1995). Small Letter Contrast Sensitivity: an alternative measure of visual resolution for aviation candidates. *Aviation Space and Environmental Medicine, 66*, 56-58.

207. Rabin, J.C. (1996). *Image contrast and visual acuity through night vision goggles.* USSARL Report 96-26. Fort Rucker, AL: U.S. Army Aeromedical Research Laboratory.

208. Radio Technical Commission for Aeronautics, RTCA DO-925 (2004). *Civil Operators' Training Guidelines for Integrated Night Vision Imaging System Equipment*. Washington D.C.

209. Rash, C.E. (1999). *Helmet-Mounted Displays: design issues for rotaroty-wing aircraft*. Bellingham, Washington: the International Society of Optical Engineering (SPIE).

210. Rash, C.E. et Becher, J. (1982). *Analysis of image smear in CRT displays due to scan rate and phosphor persistence*. USSARL Report 83-5. Fort Rucker, AL: U.S. Army Aeromedical Research Laboratory.

211. Rash, C.E., Mozo, B.T., McLean, W.E., McEntire, B.J., Haley, J.L., Licina, J.R. et Richardson, L.W. (1996). *Assessment Methodology for Integrated Helmet and Display Systems in Rotary-wing Aircraft*. USAARL Report 96-1. Fort Rucker, AL: U. S. Army Aeromedical Research Laboratory.

212. Rash, C.E. et Verona R.W. (1987). Temporal aspects of electro-optical imaging systems. In *Imaging Sensors and Displays II, Proceedings of SID, XXV* (669-672).

213. Rash, C.E, Ledford, M.H. et Mora, J.C. (1999). Images sources. In C.E. Rash (Ed.), *Helmet-Mounted Displays: design issues for rotaroty-wing aircraft* (31-50). Bellingham, Washington: the International Society of Optical Engineering (SPIE).

214. Rash, C.E. et McLean, W.E. (1999). Optical performance. In C.E. Rash (Ed.), *Helmet-Mounted Displays: design issues for rotaroty-wing aircraft* (93-152). Bellingham, Washington: the International Society of Optical Engineering (SPIE).

215. Rash, C.E., Kalich, M.E. et McLean, W.E. (2007). A limited flight study for investigating hyperstereo-vision. In R.J. Lewandowski, L.A. Haworth & H.J. Girolamo (Eds.), *Helmet-Mounted Displays III, Proceedings of SPIE* (*6557*). Bellingham, Washington: the International Society of Optical Engineering (SPIE).

216. Rasmussen, J. (1981). Models of mental strategies in process plant diagnosis. In J. Rasmussen & W.B. Rouse (Eds.), *Human detection and diagnosis of system failure*. New York: Plenum.

217. Rasmussen, J. (1983). Skills, rules and knowledge: signals, signs and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 13*(3), 257-266.

218. Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction: an approach to cognitive engineering*. Amsterdam, The Netherlands, North Holland.

219. Rasmussen, J. (1993). Deciding and doing: decision making in natural contexts. In G. Klein, J. Orasallu, R. Calderwood & C.E. Zsambok (Eds.), *Decision making in action: Models and methods* (158-171). Norwood, NJ: Ablex.

220. Reason, J. (1990). *Human error*. New York: Cambridge University Press.

221. Reed, S.K. (2007). *Cognition, Théories et Applications.* Bruxelles: De Boeck Université.

222. Rensink, R.A. (2000). Seeing, sensing and scrutizing. *Vision Research, 40*, 1469-1487.

223. Richard, W. et Miller, J.F. (1969). Convergence as a cues to depth. *Perception and Psychophysics, 5*, 317-320.

224. Riegler, T., Whiteley J.D., Task H.L. et Schueren J. (1991). *The effect of signal to noise ratio on visual acuity through night vision goggles*. Report AL-TR-1991-0011. Wright-Patterson AFB, OH: Armstrong Laboratory (DTIC A260579).

225. Ringach, D.L. et Shapley, R. (1996). Spatial and temporal properties of illusory contours and amodal completion. *Vision Research, 36*(19), 3037-3050.

226. Rogers, C.R. (1945). The non-directive Method as a technique for social Research. *American Journal of Sociology, 50*-4, 279-283.

227. Rogers, B.J. (2003). Depth and distance scalling under telestereoscopic viewing: the roles of vergence and differential perspective. *Perception 32* ECVP.

228. Roumes, C., Plantier, J. et Leger, A. (1998). Perception of distance in a binocular helmet-mounted display. Data from helicopter in-flight video tapes. In R.J. Lewandowski, L.A. Haworth & H.J. Girolamo (Eds), *Helmet-Mounted Displays III, Proceedings of SPIE* (*3362*, 66-70). Bellingham, Washington: the International Society of Optical Engineering (SPIE).

229. Roumes, C., Plantier, J. et Menu, J.P. (1991). *Does the future lie in binocular helmet display?* AGARD Conference Proceedings 517. Neuilly-sur-Seine, France: Advisory Group for Aerospace Research and Development.

230. Roumes, C., Plantier, J. et Leger, A. (1998). Perception of distance in a binocular helmet-mounted display. Data from helicopter in-flight video tapes. In R.J. Lewandowski, L.A. Haworth & H.J. Girolamo (Eds.), *Helmet-Mounted Displays III, Proceedings of SPIE* (*3362*, 66-70). Bellingham, Washington: the International Society of Optical Engineering (SPIE).

231. Rousselet, G.A. (2003). *Catégorisation visuelle rapide des scènes naturellles: limites du parallèlisme et spécificité des visages*. Thèse de doctorat en Sciences Cognitives, Toulouse.

232. Rovamo J., Rauli, F. et Risto, N. (1992) Contrast sensitivity as a function of spatial frequency, viewing distance and eccentricity with and without spatial noise. *Vision Research, 32*(4), 631-637.

233. Rovamo J., Olavi, L. et Risto, N. (1993). Modelling the dependence of contrast sensitivity on grating area and spatial frequency. *Vision Research, 33*(18), 2773-2788.

234. Rubin, E. (1921). *Visuell wahrgenommene Figuren : Studien in psychologischer Analyse*. Copenhagen.

235. Ruffner, J.W., Antonio, J.C., Joralmon, D.Q. et Martin, E. (2001). Night Vision Goggle Training Technologies and Situational Awareness. In *Proceedings of the Advanced Technology Electronic Defense System (ATEDS) Conference/Tactical Situational Awareness (SA) Symposium*. Patuxent River, MD: Naval Aviation Systems Team.

236. Ruffner, J.W., Piccione, D.P. et Woodward, K. (1997). Development of a night driving simulator concept for night vision image intensification device training. In J.G. Verly (Ed.), *Enhanced and Synthetic Vision 1997* (*3088*, 190-197). Bellingham, Washington: the International Society of Optical Engineering (SPIE).

237. Rusthon, W.A.H. et Westheimer, G. (1962). The effect upon the rod threshold of bleaching neighbouring rods. *Journal of Physiology, 164*, 318-329.

238. Sabin, F.C. et Ogle, K.N. (1958). Accommodation-Convergence Association: Experiments with Phenylephrine, Pilocarpine, and Physostigmine. *AMA Archives of Ophthalmology, 59*(3), 324-332.

239. Sachs, M.B., Nachmias, J. et Robson, J.G. (1971). Spatial-frequency channels in human vision. *Journal of Optical Society of America, 61*, 1176-1186.

240. Sandor, P. (1992). *Intérêt d'une technique de restriction du champ visuel dans l'étude des mécanismes de la coordination œil-tête*. Thèse de doctorat en Sciences, Paris XI.

241. Sandor, P. et Leger, A. (1991). Tracking with a restricted field of view: Performance and eye-head coordination aspects. *Aviation Space and Environmental Medicine, 62*, 1026-1031.

242. Schnapf, J.L., Kraft, T.W., Nunn, B.J. et Baylor, D.A. (1988). Spectral sensitivity of primate photoreceptors. *Visual Neurosciences, 1*, 255-261.

243. Schor, C. M. (1979). The relationship between fusional vergence eye movements and fixation disparity. *Vision Research, 19,* 1359-1367.

244. Schor, C.M., Wood, I. et Ogawa, J. (1984). Binocular sensory fusion is limited by spatial resolution. *Vision research, 24*(7), 661-665.

245. Schulze-Bonsel, K., Feltgen, N., Burau, H., Hansen, L. et Bach, M. (2006). Visual acuities "Hand Motion" and "Counting Fingers" can be quantified with the Freiburg Visual Acuity Test. *Investigative Opthtalmology and visual science, 47*(3), 1236-1240.

246. Schum, D. (1975). The weighing of testimony of judicial proceedings from sources having reduced credibility. *Human Factors, 17*, 172-203.

247. Schustack, M.W. et Sternberg, R.J. (1981). Evaluation of evidence in causal inference. *Journal of Experimental Psychology, General, 110*, 101-120.

248. Sebagghi, P. (2007). *Rapport d'essai 2007-306375*. Direction des essais, Centre des Essais en Vol. France, Istres.

249. Segui J. (1989). La perception du langage parlé. In C. Bonnet, R. Ghiglione & J.F. Richard (Eds.), *Traité de Psychologie Cognitive, volume 1 : Perception, Action, Langage*. Paris: Dunod.

250. Sekuler, A.B., Gold, J., Murray, R.F. et Bennett, P.J. (2000). Visual completion of partly occluded objects: insights from behavioural studies. *Neuro-Ophtalmology, 23*(3-4), 165-168.

251. Semmlow, J.L. (1981). Oculomotor responses to near stimuli: The near triad. In B.L. Zuber (Eds) *Models of Oculomotor Behavior and Control* (161-191). Boca Raton, Florida: CRC Press.

252. Sharpe, C.R. (1974). The contrast sensitivity of the peripheral visual field to drifting sinusoidal gratings. *Vision Research, 14*, 905-906.

253. Shimon, E. (1992). Visual Perception. In S. C. Shapiro (Ed.), *Encyclopedia of Artificial Intelligence* (1655-1664). New-York: Wiley-Interscience.

254. Simon, H.A. et Gobet, F. (2000). Expertise effects in memory recall: Comment on Vicente and Wang (1998). *Psychological Review, 107*(3), 593-600.

255. Simon, H.A. et Reed, S.K. (1976). Modeling strategy shifts in a problem-solving task. *Cognitive psychology, 8*, 86-97.

256. Soulie, A. (2005). *Caractérisation de tubes intensificateurs de lumière incorporés dans le viseur de casque*. Master de maintenance aéronautique.

257. Stankovic, S., Raufaste, E. et Averty, P. (2008). Determinants of Conflict Detection: A Model of Risk Judgments in Air Traffic Control. *Human Factors: the journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 50*(1), 121-134.

258. Stark, L., Kenyon, R.V., Krishnan, V.V. et Ciuffreda, K.J. (1980). Disparity vergence: a proposed name for a dominant component of binocular vergence eye movements. *American Journal of Optometry and Physiological Optics, 57*(9), 606-609.

259. Stuart, G.W., Flanagan, P. et Gibbs, P. (2007). Hyperstereopsis in helmet-mounted NVDs: slope perception. In R.W. Brown, C.E. Reese, P.L. Marasco & T.H. Harding (Eds.), *Helmet-Mounted Displays XI, Proceedings of SPIE* (*6557*). Bellingham, Washington: the International Society of Optical Engineering (SPIE).

260. Sweller, J., Mawer, R.F. et Ward, M.R. (1983). Development of expertise in mathematical problem solving. *Journal of experimental Psychology: General, 112*, 639-661.

261. Task, H.L. (1992). *Night Vision Devices and characteristics*. AGARD Lecture Series 187. Neuilly-sur-Seine, France: Advisory Group for Aerospace Research and Development.

262. Task, H.L. (2000). Integrated panoramic Night Vision Goggles fixed-focus eyepieces: selecting a diopter setting. In *Proceedings of the 2000 SAFE Association Symposium* (415-420).

263. Task, H.L. (2001). Night vision goggles visual acuity assessments: results of interagency test. In R.J. Lewandowski, L.A. Haworth & H.J. Girolamo (Eds.), *Head-Mounted Displays VI, Proceedings of SPIE* (*4361*, 130-138). Bellingham, Washington: the International Society of Optical Engineering (SPIE).

264. Teghtsoonian, R. et Teghtsoonian, M. (1970).Scaling apparent distance in a natural outdoor setting. *Psychonomic Science, 212*, 215-216.

265. Temme, L.A., Still, D.L. et Fatcheric, A.J. (1995). Jet pilot, helicopter pilot, and college student: a comparison of central vision. *Aviation, Space and Environmental Medicine, 66*(4), 297-302.

266. Tessier-Lavigne, M. (2000). Visual processing by the retina. In E.R. Kandel, J.H. Schwartz & T.M. Jessell (Eds.), *Principles of Neural Science* (507-522). New York: McGraw-Hill.

267. Thomas, J.P. (1975). Spatial resolution and spatial interaction. In E.C. Carterette & M.P. Friedman (Eds.), *Handbook of perception volume V Seeing* (233-264). New York: Academic Press.

268. Treisman. A. (1980). Feature-Integration Theory of Attention. *Cognitive Pyschology, 12*, 97-136.

269. Triesch, J., Ballard, D.H., Hayhoe, M.M. et Sullivan, B.T. (2003). What you see is what you need. *Journal of Vision, 3*(1), 86-94.

270. Van Meeteren, A. et Vos, J.J. (1972). Resolution and contrast sensitivity at low luminances. *Vision Research, 12*(5), 825-833.

271. Van Ness, F. L. et Bouman, M. A. (1967). Variation of contrast sensitivity with luminance. *Journal of the Optical Society of America, 57*, 401-406.

272. Van Nes, F.L. et Bouman, M.A. (1967). Spatial modulation transfer in the human eye. *Journal of Optometry of the Society of America, 56*, 689-694.

273. Vecera, S.P. (1998). Visual object representation: an introduction. *Psychobiology, 26*, 281-308.

274. Velger, M. (1998). *Helmet-Mounted Displays and Sights*. Norwood, MA: Artech House.

275. Verona R.W. (1985). *Image intensifiers: past and present*. AGARD Conference Proceedings 379. Neuilly-sur-Seine, France: Advisory Group for Aerospace Research and Development.

276. Verona R.W. et Rash E.C. (1990). *Human Factors and Safety Considerations of night Vision Systems Flight*. USAARL Report 89-12. US Army Aeromedical Research Laboratory, Fort Rucker, AL.

277. Viguier, A., Clement, G. et Trotter, Y. (2001). Distance perception within near visual space. *Perception, 30*(1), 115-124.

278. Virsu, V. et Rovamo, J. (1979). Visual resolution, contrast sensitivity, and the cortical magnification factor. *Experimental Brain Research, 37*, 475-497.

279. Von Helmholtz, H.L.F. (1867). *Handbuch der physiologischen Optik*. Leipzig: Voss.

280. Von der Heydt, R. et Peterhans, E. (1989). Mechanism of contour perception in monkey visual cortex. Lines of pattern discontinuity. *Journal of Neuroscience, 9*, 1731-1748.

281. Wallach, H. et Karsh, E.B. (1963a). Why the modification of stereoscopic depth-perception is so rapid? *American Journal of Psychology, 76*, 413-420.

282. Wallach, H., Moore, M.E. et Davidson, L. (1963b). Modification of stereoscopic depth perception. *American Journal of Psychology, 76*, 191-204.

283. Watanabe, A., Mori, T, Nagata, S. et Hiwatashi, K. (1968). Spatial sine-wave responses of the human visual system. *Vision Research, 8*(9), 1245-1263.

284. Wells, M.J. et Venturino, M. (1990). Performance and head movements using a helmet-mounted display with different sized fields-of-view. *Optical Engineering, 29*, 870-877.

285. Wertheimer, M. (1923). Untersuchungen zur Lehre von der Gestalt. *Psychologische Forschung, 4*, 301-350.

286. Westheimer, G. et Mitchell, D.E. (1969). The sensory stimulus for disjunctive eye movements. *Vision Research, 9*, 749-755.

287. Westheimer, G. (1979). Scaling of visual acuity measurements. *Archives of Ophthalmology, 97*, 327-333.

288. Wickens, C.D. et Hollands, J.G. (2000). *Engineering Psychology and Human Performance, 3rd edition*. Prentice Hall (Eds.).

289. Wickens, D., Lee, J., Liu, Y.D. et Gordon-Becker, S. (2003). *Introduction to Human Factors Engineering*. Prentice-Hall., Inc. Upper Saddle River, NJ, USA.

290. Wiley, R.W. (1989). *Visual acuity and stereopsis with night vision goggles*. USSARL Report No.89-9. Fort Rucker, AL: U.S. Army Aeromedical Research Laboratory.

291. Williams, L. G. (1966). The effect of target specification on objects fixated during visual search. *Perception and Psychophysics, 1*, 315-318.

292. Wolfe, J.M. et O'Connell, K.M. (1987). Adaptation of the resting states of accommodation. *Investigative Ophthalmology and Visual Science, 28*, 992-996.

293. Wurtz, R.H. et Kandel, E.R. (2000). Perception of Motion, Depth and Form. In Kandel E.R., Schwartz, J.H. & Jessell T.M. (Eds.), *Principles of Neural Science* (548-572). New York: McGraw-Hill.

294. Young T. (1802). *On the theory of light and colours*. Printed by W. Bulmer & Co and sold by G. and W. Nicol.

295. Young, L.R. et Sheena, D. (1975). Eye-movement measurement techniques. *American Psychologist, 30*(3), 315-330.
296. Zeki, S.M. (1973). Colour Coding in rhesus monkey prestriate cortex. *Brain research, 53*, 422-427.
297. Zeki, S. (1993). *A Vision of the Brain*. Oxford: Blackwell Scientific.