

Contribution de l'analyse des mouvements oculaires à l'évaluation de la charge de travail mental

Philippe Simon

▶ **To cite this version:**

Philippe Simon. Contribution de l'analyse des mouvements oculaires à l'évaluation de la charge de travail mental. Automatique / Robotique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1993. Français. NNT : 1993VALE0028 . tel-03436856

HAL Id: tel-03436856

https://uphf.hal.science/tel-03436856

Submitted on 19 Nov 2021

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

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

1993 VALE 0028

Numéro d'Ordre : 93-33

THÈSE

présentée à

l'Université de Valenciennes
et du Hainaut-Cambrésis

pour l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité

AUTOMATIQUE
INDUSTRIELLE ET HUMAINE

par

Philippe SIMON

CONTRIBUTION DE L'ANALYSE DES MOUVEMENTS OCULAIRES À L'ÉVALUATION DE LA CHARGE DE TRAVAIL MENTAL

Soutenue le 3 décembre 1993 devant la commission d'examen :

MM :	Jean-Claude	ANGUÉ	
	Thierry	BERGER	
	Guy	BOY	*Rapporteur*
	Patrick	MILLOT	
	Michel	NEBOIT	
	Pierre	VIDAL	*Rapporteur*

Numéro d'Ordre : 93-33

THÈSE

présentée à

l'Université de Valenciennes
et du Hainaut-Cambrésis

pour l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité

AUTOMATIQUE
INDUSTRIELLE ET HUMAINE

par

Philippe SIMON

CONTRIBUTION DE L'ANALYSE DES MOUVEMENTS OCULAIRES À L'ÉVALUATION DE LA CHARGE DE TRAVAIL MENTAL

Soutenue le 3 décembre 1993 devant la commission d'examen :

MM :	Jean-Claude	ANGUÉ	
	Thierry	BERGER	
	Guy	BOY	*Rapporteur*
	Patrick	MILLOT	
	Michel	NEBOIT	
	Pierre	VIDAL	*Rapporteur*

AVANT PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Automatique Industrielle et Humaine de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, au sein de l'équipe "Modélisation de l'opérateur humain et interfaces hommes-machines" dirigée par le Professeur Jean-Claude ANGUÉ. Je tiens ici à lui témoigner toute ma reconnaissance pour m'avoir suivi et guidé au cours de ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur Guy BOY, Directeur de l'EURISCO (Institut Européen de l'Ingénierie et des Sciences Cognitives), et Monsieur Pierre VIDAL, Professeur à l'Université des Sciences et Techniques de Lille - Flandres Artois, Directeur du Centre d'Automatique de Lille, de me faire l'honneur d'être rapporteurs de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Michel NEBOIT, Chef du service "Ergonomie et Psychologie Industrielle" de l'Institut National de Recherche et de Sécurité, et à Monsieur Patrick MILLOT, Professeur à l'UVHC et Responsable de l'équipe "Informatique Industrielle et Coopération Homme-Machine" du LAIH, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de siéger à la commission d'examen.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Frédéric ROUSSEAU, pour sa participation active et constante à ce travail, ainsi qu'à Jean-Christophe POPIEUL, Pierre LOSLEVER, Jean-Marc BERNARD et Thierry BERGER pour leurs aides précieuses.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE 9

CHAPITRE I : L'ACTIVITÉ DE SUPERVISION D'UN PROCÉDÉ AUTOMATISÉ : DU PRÉLÈVEMENT D'INFORMATION A LA CHARGE DE TRAVAIL MENTAL 13

I. INTRODUCTION 14

II. CONCEPTION D'UN SYSTÈME HOMME-MACHINE : NÉCESSITÉ D'UNE PHASE D'ÉVALUATION 15
II.1 L'opérateur face à son travail de supervision 16
II.1.1 Tâches de l'opérateur 16
II.1.2 Interprétation des informations par l'opérateur et comportement cognitif 16
II.2 Démarche de conception d'un système homme-machine 17
II.3 Évaluation d'un système homme-machine : intérêt de l'estimation de la charge de travail et de l'analyse des mouvements oculaires 19
II.3.1 Estimation de la charge de travail 20
II.3.2 Analyse de l'activité 22
II.3.3 Synthèse 23

III. CHARGE DE TRAVAIL MENTAL : CONCEPT ET MÉTHODES D'ESTIMATION 24
III.1 Principaux facteurs influant la charge de travail 24
III.1.1 Facteurs relatifs à la situation de travail 24
III.1.2 Facteurs relatifs à l'individu 25
III.2 Intérêt de la charge de travail instantanée 28
III.3 Estimation de la charge de travail mental 29
III.3.1 Propriétés des méthodes d'estimation de la charge 29
III.3.2 Principales méthodes d'estimation de la charge 30
III.3.3 Synthèse 34

IV. LA PERCEPTION VISUELLE EN SUPERVISION DE PROCÉDÉ 34
IV.1 Perception visuelle : description du capteur "œil" 35
IV.1.1 Le champ visuel 35
IV.1.2 Les mouvements oculaires 36
IV.1.3 La vision centrale 37
IV.1.4 Le système perceptif périphérique 39
IV.2 La prise d'information visuelle en supervision de procédé 40
IV.2.1 Facteurs influant le comportement visuel 40
IV.2.2 Modèle du comportement oculaire 42
IV.3 Quelques exemples d'utilisation de l'oculométrie pour l'étude des systèmes hommes-machines 44
IV.3.1 Travaux centrés sur l'opérateur 44
IV.3.2 Travaux centrés sur l'évaluation ergonomique des supports d'information 44

CHAPITRE II : INFLUENCE DE LA CHARGE DE TRAVAIL SUR LA PERCEPTION VISUELLE ET SUR L'ACTIVITÉ OCULAIRE 47

I. INTRODUCTION 48

II. INDICES PHYSIOLOGIQUES 49
II.1 Diamètre pupillaire 49

II.2 Clignements palpébraux 50
II.3 Variation de la taille du champ visuel fonctionnel 50
II.4 Autres indices 52

III. INDICES LIÉS AUX CARACTÉRISTIQUES DES SACCADES OCULAIRES 52
III.1 Acquisition et codage des données oculométriques 53
III.2 Latence du système saccadique 55
III.3 Vitesse des saccades 56
III.4 Amplitude des saccades 56
III.5 Fréquences des saccades 58

IV. INDICES LIÉS AUX CARACTÉRISTIQUES DES FIXATIONS OCULAIRES 58
IV.1 Durée des fixations 59
IV.1.1 Influence de l'expérience 59
IV.1.2 Influence de la difficulté 60
IV.1.3 Influence de la nature de l'information prélevée 61
IV.2 Nombre et fréquence des fixations 61
IV.3 Taux de consultation 62

V. INDICES LIÉS AUX STRATÉGIES VISUELLES 64
V.1 Étude des trajets oculaires 66
V.1.1 Matrices de transition 66
V.1.2 Séquences de consultation 68
V.2 Organisation de la prise d'informations visuelles 68
V.2.1 Quantification du "désordre" oculaire 68
V.2.2 Détection de périodicités 70

VI. SYNTHÈSE ET CONCLUSION 71

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE DE LA CHARGE DE TRAVAIL INSTANTANÉE SUR LA PRISE D'INFORMATION VISUELLE 74

I. INTRODUCTION 75

II. CHOIX D'UN CONTEXTE EXPÉRIMENTAL 76
II.1 Principe des expérimentations 76
II.2 La méthode temporelle d'évaluation de la charge de travail 76
II.2.1 Principe 76
II.2.2 Extension à des contextes multitâches indifférenciés 77
II.3 Travail des sujets 78
II.3.1 Description des trois types de tâche 78
II.3.2 Situation multitâche 80
II.4 Scénarios de test 81

III. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL 82
III.1 Le "simulateur" 82
III.1.1 Architecture matérielle 82
III.1.2 Implémentation des cinq tâches et difficulté des scénarios 83
III.2 L'instrumentation oculométrique 84
III.2.1 Le capteur ASL (mesure des mouvements oculaires) 84
III.2.2 Le système "tout-automatique" du LAIH (mesure des mouvements de tête) 85
III.2.3 Précision de la chaîne de mesure 86

IV. DONNÉES RECUEILLIES 87
IV.1 État des variables et actions manuelles de l'opérateur 87

IV.2 Données oculométriques 88
IV.3 Indices de charge de travail 89
IV.3.1 Charge globale : échelle de Cooper-Harper Modifiée 89
IV.3.2 Charge instantanée : Méthode Temporelle 89

V. EXPÉRIMENTATIONS PRÉLIMINAIRES 91
V.1 Scénarios de test et déroulement 91
V.2 Résultats des expériences préliminaires 92

VI. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL 94

VII. CONCLUSION 95

CHAPITRE IV : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX 96

I. INTRODUCTION 97

II. DONNÉES BRUTES 97
II.1 Données recueillies 97
II.2 Données oculométriques 97
II.2.1 Répartition spatiale des fixations 101
II.2.2 Durée des fixations 102
II.3 Indice de charge de travail (Méthode temporelle) 102
II.3.1 Indice de charge instantanée 102
II.3.2 Méthode temporelle et niveau de difficulté 102

III. RÉSULTATS STATISTIQUES SUR LES FIXATIONS ET LES CONSULTATIONS 105
III.1 Fixations 105
III.1.1 Durée des fixations 105
III.1.2 Fréquence des fixations 109
III.2 Consultations 111
III.2.1 Taux de consultation 111
III.2.2 Nombre de fixations par consultation 111
III.3 Synthèse 111

IV. ÉTUDE DES TRANSITIONS ENTRE TÂCHES 116
IV.1 Longueur des saccades 116
IV.2 "Échanges" entre tâches : Matrices et graphes de transition 117
IV.3 Étude du "désordre oculaire" 119
IV.3.1 Résultats globaux 119
IV.3.2 Résultats temporels 122

V. ÉTUDE DES SÉQUENCES DE CONSULTATION 124
V.1 Extraction des séquences 124
V.2 Étude de l'influence de la difficulté 125
V.2.1 Résultat préliminaire 125
V.2.2 Mise en évidence de l'influence du niveau de difficulté 125
V.2.3 Résultats individuels 126

VI. CONCLUSION 127

CHAPITRE V : DÉVELOPPEMENTS ET PERSPECTIVES 128

I. INTRODUCTION 129

II. DESCRIPTION D'UN MODÈLE DE L'ACTIVITÉ OCULAIRE DE L'OPÉRATEUR DE SUPERVISION 129
II.1 Approche "Automatique" 129
II.2 Approche "Neurosciences" 131
II.2.1 Structure générale du modèle 131

II.2.2 Description des différents sous-systèmes 133
II.3 Proposition d'un modèle descriptif 135

III. ANALYSE QUANTITATIVE DES CHEMINS OCULAIRES EN VUE D'UNE CLASSIFICATION DES OPÉRATEURS 137
III.1 Utilisation des coordonnées cartésiennes des fixations 137
III.2 Codage spatial avec valeurs d'appartenance binaires 138
III.3 Codage spatial avec valeurs d'appartenance "floues" 140

IV. MISE EN RELATION DES DIVERSES VARIABLES 141
IV.1 Variables temporelles 142
IV.1.1 Provenance des variables 142
IV.1.2 Codage des variables 142
IV.2 Méthode d'analyse statistique 145
IV.3 Applications 147
IV.3.1 Mise en relation des variables 147
IV.3.2 Etude des décalages entre variables 147

V. CONCLUSION 148

CONCLUSION GÉNÉRALE 149

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 153

INDEX DES FIGURES ET TABLEAUX 164

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement de l'informatisation et de l'automatisation des moyens de production vise à satisfaire des impératifs économiques, en augmentant la compétitivité des entreprises. Pour cela, il faut augmenter la productivité, améliorer la qualité, diminuer les coûts de production, assurer la flexibilité de la production, ...

Il y a une quinzaine d'années, les progrès technologiques laissaient envisager "l'usine sans homme", balayant du même coup les problèmes d'ergonomie liés à la présence d'opérateurs près de l'outil de production. Aujourd'hui, la réalité dément ce rêve d'ingénieur. En effet, les automatismes affichent très vite leurs limites face aux situations imprévues, et même souvent imprévisibles. L'homme, par ses qualités de raisonnement, d'adaptation, d'improvisation, ..., reste le garant ultime de la continuité de la production. Ses interventions se limitent souvent maintenant aux phases de fonctionnement dégradé.

Le travail de l'opérateur est donc désormais essentiellement cognitif, avec une composante décisionnelle importante. Il consiste à traiter de l'information provenant du processus, à se faire l'idée la plus juste de l'état du procédé et, le cas échéant, à élaborer et effectuer une action correctrice.

Autrement dit, l'automatisation complète étant impossible, tout se passe comme si la machine assistait l'homme la plupart du temps, ce dernier n'intervenant que de manière sporadique. Se posent alors des problèmes de communication homme-machine, voire même de coopération en la présence d'outils d'aide à l'opérateur. Les interrogations sont nombreuses :

- Faut-il un ou plusieurs opérateurs ?
- Comment répartir les tâches entre l'homme et la machine ?
- Quelles informations faut-il présenter à l'opérateur ?
- Quels systèmes de commande choisir ?
- ...

Le concepteur d'un système homme-machine devra tenter de répondre à toutes ces questions. Il s'agit là d'un travail ambitieux, qu'il paraît difficile de mener à bien "d'un seul jet". Autrement dit, une phase d'évaluation s'avère souvent indispensable pour permettre un "rebouclage" sur l'étape de conception.

Or, si l'analyse du fonctionnement d'une machine ou d'un groupe de machines peut se faire par l'utilisation de capteurs et de modèles de comportement aujourd'hui bien maîtrisés, la présence d'un ou de plusieurs opérateurs humains nécessite d'utiliser des outils et des modèles particuliers.

Deux exemples illustrent notre contribution dans ce domaine :

A la notion de *performance* d'une machine doit être adjointe celle de *charge de travail mental* de l'homme, charge qu'il faut maintenir entre deux seuils de sous-charge et de surcharge pour garantir vigilance et efficacité de l'opérateur. Les meilleures conditions de travail et de sécurité du système homme-machine global sont ainsi elles-mêmes garanties. Aucune approche n'est aujourd'hui complètement satisfaisante pour estimer cette charge de travail et nous avons tenté d'établir une corrélation entre cette grandeur et le comportement oculaire de l'opérateur qui constitue l'une des rares traces observables de son activité.

Contrairement à une machine dont les mouvements peuvent souvent être "instrumentés" aisément, les traces observables de l'activité d'un opérateur sont assez limitées : activité

manuelle, activité orale ou auditive, et surtout activité de perception visuelle, alors que l'activité cognitive qui est prépondérante reste inobservable directement. Compte tenu de l'importance de la saisie visuelle, une partie importante de notre travail a porté sur la mesure, l'analyse et la modélisation des mouvements oculaires en corrélation avec les actions de l'opérateur et l'état du processus, en vue de l'évaluation du système homme-machine.

Le mémoire est composé de cinq chapitres :

• Le premier chapitre débute par une brève description de la place et des principales activités de l'opérateur de supervision au sein du système homme-machine. Une description de la conception d'un système fortement automatisé débouche sur la conclusion qu'une phase d'évaluation s'avère indispensable pour s'assurer d'une bonne intégration de l'opérateur dans le système technologique. Dans l'optique d'une telle évaluation, deux aspects primordiaux de l'interaction homme-machine sont alors décrits : ***la charge de travail mental*** et ***la prise d'informations visuelles***, qui constituent les deux parties suivantes du chapitre.

La charge de travail mental permet de rendre compte du vécu de l'opérateur quant à son interaction avec la machine. Elle vise à estimer le "coût" personnel de son activité pour l'opérateur. Si l'estimation de la charge de travail globale engendrée par un travail donné est importante, la détection des fortes variations se produisant au cours du travail l'est encore plus. Une revue critique des principales méthodes d'estimation de la charge mentale débouche sur le constat qu'aucune n'est réellement adaptée pour fournir un indice de charge de travail instantanée et souligne donc un manque à combler.

L'activité de l'opérateur est désormais essentiellement cognitive, avec des actions manuelles très sporadiques. Il en existe très peu de traces directement observables. Étant donné la prépondérance du canal visuel pour le travail de supervision, l'enregistrement de l'activité oculaire de l'opérateur semble une technique particulièrement intéressante pour analyser cette activité. Dans la troisième partie du chapitre, les mécanismes de base de la perception visuelle sont décrits, en focalisant sur les spécificités de la supervision de procédé. Enfin, quelques exemples d'application de l'oculométrie sont donnés, concernant l'analyse de l'activité des opérateurs ou l'évaluation ergonomique de systèmes de présentation de l'information.

• Le second chapitre contient une revue des principaux travaux consacrés à l'étude de l'influence de la difficulté de la tâche ou de la charge de travail sur la perception visuelle. Ces travaux concernent des indices physiologiques du fonctionnement du système visuel, des indices liés aux mouvements oculaires proprement dits (caractéristiques des saccades oculaires), des indices liés aux fixations oculaires (pauses du regard pendant lesquelles l'information est extraite), et enfin des indices liés aux tactiques oculaires, c'est à dire à l'organisation générale de la prise d'information. Une synthèse critique de tous ces travaux montre que les indices liés aux tactiques oculaires semblent les plus adaptés en vue d'une estimation de la charge de travail, dans le contexte de la supervision de procédé.

• Le troisième chapitre présente une étude expérimentale visant à tester les indices sélectionnés suite à la synthèse du second chapitre. L'objectif initial de la recherche concernant l'estimation de la charge instantanée, le problème est de disposer d'un indice "de référence". L'une des rares méthodes fournissant des résultats satisfaisants, dans des contextes expérimentaux certes très précis, est la méthode temporelle proposée par MILLOT /87/. La première partie de ce chapitre fournit une description sommaire de cette méthode, pour ensuite expliquer le choix du contexte expérimental. La plate-forme développée pour les expérimentations est alors décrite (travail donné aux sujets et instrumentation mise en œuvre pour recueillir l'activité oculaire). Ensuite, les différentes grandeurs mesurées ou calculées après chaque expérimentation sont recensées. Pour terminer, des pré-expérimentations sont présentées. Ces dernières visent à la définition du protocole expérimental définitif.

• Le quatrième chapitre présente les principaux résultats expérimentaux obtenus. Dans une première partie, les données brutes sont examinées afin de vérifier leur validité. Ensuite, les résultats obtenus avec les caractéristiques des fixations et des consultations oculaires sont présentés. Une troisième partie est consacrée aux transitions entre les différentes zones de l'interface graphique. Enfin, la dernière partie présente des indices liés aux tactiques oculaires mentionnées précédemment.

• Le cinquième chapitre débute par la présentation d'un modèle descriptif de la perception visuelle, modèle permettant d'expliquer en partie les variations de comportement oculaire observées en fonction du niveau de charge de travail. La partie suivante est consacrée à la mise en œuvre de techniques de reconnaissance de formes, et plus particulièrement de techniques de traitement de chaînes de caractères, en vue d'effectuer une classification des opérateurs en fonction de leur activité oculaire. L'intérêt d'un codage "flou" du lieu des fixations est également mis en évidence. Ensuite, une technique est proposée afin de mettre en relation l'activité oculaire avec d'autres variables, telles que la charge de travail, un indice de performance, etc. Cette technique permet également d'étudier les déphasages éventuels entre ces différents "signaux". Ce cinquième chapitre contient donc des développements ainsi que des perspectives de recherche.

CHAPITRE I : L'ACTIVITÉ DE SUPERVISION D'UN PROCÉDÉ AUTOMATISÉ : DU PRÉLÈVEMENT D'INFORMATION A LA CHARGE DE TRAVAIL MENTAL

I. INTRODUCTION

II. CONCEPTION D'UN SYSTÈME HOMME-MACHINE : NÉCESSITÉ D'UNE PHASE D'ÉVALUATION

III. CHARGE DE TRAVAIL MENTAL : CONCEPT ET MÉTHODES D'ESTIMATION

IV. LA PERCEPTION VISUELLE EN SUPERVISION DE PROCÉDÉ

V. CONCLUSION

I. INTRODUCTION

L'automatisation des moyens de production industriels a profondément modifié la nature du travail de l'opérateur humain. En effet, la tendance est à la hiérarchisation des systèmes de commande, avec un maximum d'autonomie à chaque niveau /SHERIDAN, 85/. L'opérateur se retrouve ainsi au sommet d'une structure pyramidale et sa présence est désormais justifiée par des tâches de surveillance des automatismes et de reprise à la suite d'une défaillance non-prévisible du procédé. Il s'agit donc de tâches essentiellement cognitives, avec une composante décisionnelle importante /JOHANNSEN, 92/.

Autrement dit, même si ses actions sur le procédé sont désormais sporadiques, l'opérateur n'en joue pas moins un rôle capital pour le bon fonctionnement et la sécurité de l'installation. C'est pourquoi la conception "ergonomique" d'un système homme-machine se doit d'être focalisée sur l'intégration optimale de l'opérateur dans le système technologique. En effet, si l'homme se caractérise par des qualités décisionnelles irremplaçables, son "fonctionnement" est particulièrement sensible à de nombreux facteurs (stress, baisse de vigilance, capacité de traitement limitée, ...) susceptibles de dégrader sa prise de décision.

Des travaux ont mis en évidence les aberrations consécutives à une mauvaise prise en compte de l'opérateur dans la réalisation des systèmes hautement automatisés /BAINBRIDGE, 82/. Ce premier chapitre traite donc de deux aspects primordiaux - et intimement liés - de l'interaction homme-machine dans le contexte de la supervision de procédé :

- le "coût" du travail pour l'opérateur, c'est-à-dire sa *charge de travail* ;
- la *prise d'information visuelle* et son traitement par l'opérateur.

Le chapitre comprend trois parties.

Après une description sommaire du travail d'un opérateur de supervision, une première partie focalise sur la démarche de conception d'un système homme-machine. On y met en évidence que toute la connaissance "a priori" ne suffit pas pour assurer, dès la conception, une bonne intégration de l'opérateur dans le système technologique. Une phase d'évaluation, en simulation et/ou sur site réel, s'avère indispensable.

La seconde partie est consacrée à la charge de travail mental. Cette grandeur caractérise le coût de son activité pour l'opérateur et s'avère particulièrement intéressante pour évaluer l'interaction homme-machine, telle qu'elle est effectivement vécue par l'opérateur. On examinera les problèmes liés à l'estimation de la charge de travail et les principales méthodes qui ont été proposées.

La troisième partie aborde un aspect primordial du travail de l'opérateur de supervision qui est la prise d'informations visuelles et leur traitement. Les mécanismes, tant physiologiques que mentaux, liés à la perception visuelle y sont décrits en soulignant les spécificités de notre contexte d'étude. On termine en donnant quelques exemples d'utilisation de l'enregistrement de l'activité oculaire de l'opérateur pour l'étude des interactions hommes-machines, et notamment pour l'évaluation ergonomique des supports de présentation des informations visuelles.

II. CONCEPTION D'UN SYSTÈME HOMME-MACHINE : NÉCESSITÉ D'UNE PHASE D'ÉVALUATION

Avant de décrire plus précisément le contenu de son travail, il convient de définir ce que l'on entend par "opérateur de supervision". SPERANDIO /88/ fait remarquer que le terme "opérateur humain" se réfère avant tout à l'homme *acteur de son travail, qui choisit et traite l'information utile et prend des décisions*. Cette définition est en accord avec les descriptions courantes des systèmes de conduite des procédés industriels fortement automatisés, telles que celle proposée par SHERIDAN (cité dans /BERGER, 92/) et présenté en figure I-1 :

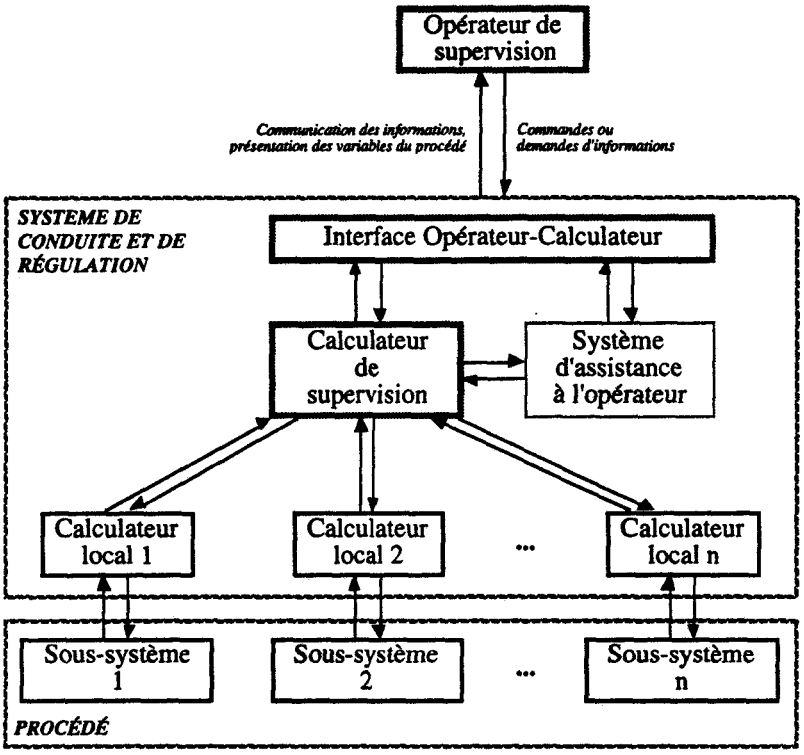


Figure I.1 : Architecture typique des systèmes de supervision de procédés fortement automatisés, d'après SHERIDAN.

SHERIDAN décrit une architecture générale d'un système de conduite à quatre niveaux : le *procédé* (continu, semi-continu, ou manufacturier), la *régulation* (niveau mis en oeuvre à l'aide de calculateurs locaux, d'Automates Programmables Industriels, etc., organes capables de décisions réflexes), le *calculateur de supervision* (génération des consignes pour le niveau inférieur, en mettant éventuellement en oeuvre des stratégies adaptatives face à certaines perturbations, une optimisation multicritère, etc.), et enfin l'*opérateur de supervision*. L'opérateur est donc devenu le superviseur d'un ensemble de sous-systèmes relativement autonomes. Son travail est désormais hautement cognitif, avec une composante décisionnelle importante, lors des phases de dysfonctionnement notamment.

On comprend aisément le qualificatif opérateur "de supervision", au sujet duquel MORAY /86/ donne les deux définitions complémentaires qui suivent :

- La surveillance ("monitoring") : il s'agit d'examiner les informations d'état du procédé, ces informations pouvant être formelles (affichées sur les écrans du poste de travail de l'opérateur) ou informelles (bruits, odeurs, vibrations, ...). Le but du travail de l'opérateur est de décider, sur la base des informations dont il dispose, si oui ou non le système est dans un état normal de fonctionnement et sous contrôle.

- Le contrôle supervisé ("supervisory control") : en plus du travail précédent, l'opérateur est susceptible d'appliquer des commandes à destination du procédé via un "contrôleur intelligent" (calculateur, voire un autre opérateur).

II.1 L'opérateur face à son travail de supervision

II.1.1 Tâches de l'opérateur

Généralement, on distingue cinq grandes catégories de tâches relatives aux différents états possibles du procédé /ROUSE, 83//STASSEN et al., 90/ :

- Les tâches de contrôle et de suivi : l'opérateur surveille l'état du procédé afin de détecter d'éventuels dysfonctionnements ou des écarts de consigne.
- Les tâches de réglage : leur but est d'optimiser les performances du procédé, en termes de production, tout en assurant la sécurité de l'installation.
- Les tâches de détection et de diagnostic : il s'agit pour l'opérateur de détecter, à partir des informations d'état dont il dispose, des signes de dysfonctionnement du procédé et d'établir un diagnostic.
- Les tâches de correction ou de compensation : à partir de son diagnostic, l'opérateur met en oeuvre une stratégie d'action sur le procédé. Cette stratégie peut conduire à une marche dégradée temporaire de l'installation.
- Les tâches de transition : elles correspondent à un changement de l'état général du procédé, comme par exemple le démarrage ou l'arrêt de l'installation.

Le travail de l'opérateur de supervision consiste donc essentiellement à traiter de l'information et met en oeuvre les processus psychologiques propres à tout "travail mental", selon /SPERANDIO, 88/ :

- La prise d'information sur le monde extérieur (la perception).
- L'analyse de l'information, c'est à dire les raisonnements sur l'information externe (provenant de la perception) ou sur l'information interne (provenant de la mémoire). Ce type d'activité comprend la mise en relation d'informations provenant de plusieurs sources, la prédiction et l'extrapolation de variables sur la base des observations passées /MORAY, 86/.
- La mémoire, à plus ou moins long terme.
- La représentation mentale, concernant notamment la dynamique du système.

II.1.2 Interprétation des informations par l'opérateur et comportement cognitif

Cette description du travail de l'opérateur, si elle est très sommaire, met en évidence l'importance du canal visuel. L'opérateur communique avec le système via le niveau le plus élevé de la structure hiérarchique décrite avec la figure I-1, c'est à dire l'interface homme-calculateur. Avec l'informatisation des systèmes de conduite, les tableaux synoptiques traditionnels (avec leurs enregistreurs et leurs indicateurs analogiques) ont laissé place aux systèmes écrans-claviers. L'information a été morcelée et des groupes de variables sont constitués au sein de "vues de conduite" /LEJON, 91/.

RASMUSSEN /83/ définit trois termes pour caractériser l'information provenant de l'interface de dialogue de l'opérateur. Cette classification est basée sur le niveau d'abstraction caractérisant chaque type d'information : Les *signaux* appartiennent au "monde physique" du procédé ; les *signes* caractérisent une situation connue, pour laquelle il existe des règles d'intervention préétablies ; les *symboles*, enfin, appartiennent au "monde mental" de l'opérateur.

A ces trois "types" d'information, RASMUSSEN (cité dans /BERGER, 92/) associe trois comportements cognitifs très différents :

- Le comportement basé sur l'habileté (skill based behavior), correspond aux signaux : activité de type réflexe, l'opérateur reproduisant des séquences opératoires simples et qu'il maîtrise parfaitement.

- Le comportement basé sur des règles (rule based behavior), répond aux signes : activité consciente, régie par des règles/procédures mises en oeuvre face à des situations connues.

- Le comportement basé sur la connaissance (knowledge based behavior), correspond aux symboles : cas des situations inconnues, dans lesquelles l'opérateur a pour seul recours ses connaissances techniques, son modèle mental du procédé, et ses aptitudes au raisonnement.

En guise de synthèse, la figure I-2 fournit un tableau récapitulatif des différentes tâches de l'opérateur ainsi que du comportement cognitif associé. On voit que ce dernier évolue en fonction des différentes phases de fonctionnement du procédé. Il en est donc de même de l'interprétation des informations visuelles, ce qui souligne une fois de plus l'importance à accorder à leur présentation.

Tâches (ROUSE) / **Comportements** (RASMUSSEN)	*Contrôle et Suivi*	*Réglage*	*Détection et Diagnostic*	*Correction ou Compensation*	*Transition*
basé sur l'habileté (signes)	*	*	*	**	*
basé sur les règles (signaux)	**	**	*	*	*
basé sur la connaissance (symboles)	*		**		**

Figure I.2 : Relation entre les tâches de l'opérateur, son comportement cognitif et son interprétation des informations /STASSEN, 90//JOHANNSEN, 92/ (le nombre d' indique l'importance de la relation).*

Le fait que le travail de l'opérateur de supervision soit à prédominance mentale le rend particulièrement difficile à étudier. En effet, l'activité mentale ne peut être connue qu'à travers des manifestations ou des traces observables /LEPLAT, 82/. Or, on a vu que les actions manuelles sont désormais sporadiques, puisque limitées à certaines phases de fonctionnement du procédé. La seule trace spontanée et observable en situation ordinaire de travail semble alors être l'enregistrement de l'activité visuelle de l'opérateur face aux différentes vues de conduite.

Mais avant de se focaliser sur l'opérateur, il convient de s'intéresser au système homme-machine dans sa globalité, et d'abord à sa conception.

II.2 Démarche de conception d'un système homme-machine

La démarche de conception généralement adoptée comprend deux phases /ABED, 90//DEBERNARD, 93/ :

- Une phase de conception proprement dite du système homme-machine, souvent dénommée phase "descendante" : il s'agit, à partir des caractéristiques techniques du procédé et des objectifs qui lui ont été assignés, de proposer une implémentation et une intégration du système homme-machine.

- Une phase d'évaluation du système homme-machine, encore dénommée phase "ascendante" : elle consiste en la validation du système homme-machine proposé.

Dans ce paragraphe, seule la phase descendante est considérée. La figure I-3 en fournit une description, proposée par MILLOT et DEBERNARD /93/ :

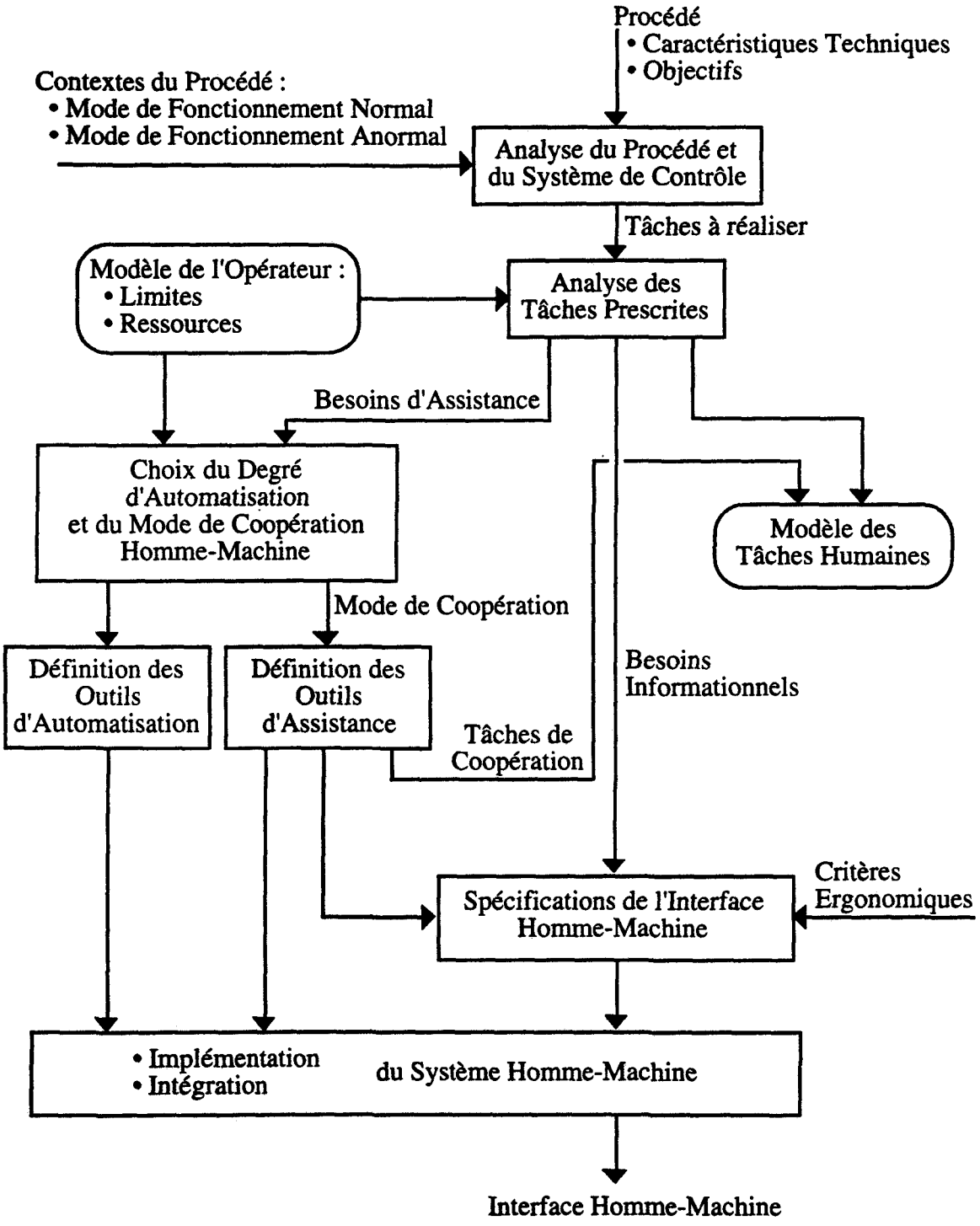


Figure I.3 : Phase descendante de la démarche de conception d'un système homme-machine /DEBERNARD, 93/.

La phase descendante débute par une analyse détaillée du procédé qui permet de mettre au jour les différentes tâches de contrôle et de supervision à réaliser. Il s'agit ensuite de répartir "au mieux" toutes ces tâches entre l'homme et la machine, en fonction de leurs caractéristiques et de leurs limites respectives. Très grossièrement, les tâches fortement répétitives et faciles à automatiser seront naturellement affectées à la machine, tandis que les tâches nécessitant un raisonnement seront plutôt réservées à l'opérateur. Pour ces dernières, il va falloir évaluer les besoins informationnels et également prévoir la présence d'outils d'aide éventuels, avec tous les problèmes de coopération homme-machine qu'ils impliquent. Cette répartition des tâches entre l'opérateur et la machine reflète les choix des concepteurs quant au degré d'automatisation du système. La dernière étape avant la réalisation consiste à spécifier l'interface homme-machine.

Un aspect primordial de cette phase de conception est l'analyse des différentes tâches à effectuer, ou tâches "prescrites", analyse préalable à la répartition "a priori" des tâches entre l'homme et la machine. Cette analyse doit porter non seulement sur les conditions normales de fonctionnement mais aussi sur les modes de fonctionnement anormaux. En effet, c'est l'ensemble des tâches de surveillance, de contrôle et de reprise de défaut qui constitue les tâches prescrites des automatismes et de l'opérateur. Elles devront toutes satisfaire à des critères technologiques, pour les tâches affectées à la machine, et des critères "humains", en termes de ressources et de limites, pour les tâches affectées à l'opérateur.

En effet, avant de confier un travail à l'opérateur, il faut s'assurer que les exigences de ce travail sont compatibles avec les capacités de ce dernier. Pour cela, il existe bien des modèles normatifs de l'opérateur humain ; mais ils ne permettent pas actuellement de modéliser des comportements "intelligents", notamment ceux basés sur la connaissance /DEBERNARD, 93/. De plus, il existe de grandes différences interindividuelles en matière de traitement de l'information ; or un objectif de l'Ergonomie est d'*adapter le travail à l'individu tel qu'il est, dans son particularisme et non comme un sujet moyen* /SPERANDIO, 88/. Autrement dit, la connaissance sur l'opérateur humain et les aspects cognitifs de son travail est trop incomplète pour envisager cette phase de conception "en boucle ouverte". C'est pourquoi il est indispensable d'avoir recours à une phase d'évaluation.

Cette phase d'évaluation, ou encore phase "ascendante", fait l'objet du paragraphe suivant.

II.3 Évaluation d'un système homme-machine : intérêt de l'estimation de la charge de travail et de l'analyse des mouvements oculaires

Le but de la phase d'évaluation est de valider le système homme-machine conçu lors de la phase descendante. Elle porte généralement sur l'atteinte des objectifs assignés au système (souvent aisée à quantifier par des critères de production, de performance, etc.), le respect des consignes de sécurité de l'installation, le jugement de l'opérateur concernant notamment l'interface de dialogue et les systèmes d'aide éventuels, et surtout le "coût du travail" pour l'opérateur.

La figure I.4 fournit une description globale de cette phase d'évaluation (description proposée par DEBERNARD /93/). La première étape consiste à définir un protocole expérimental. Ce dernier, à partir des objectifs de l'évaluation, définit les contextes et les scénarios à mettre en œuvre (fonctionnement normal et anormal, avec et sans système d'aide, etc.). Les différentes mesures à réaliser sont définies par rapport aux critères d'évaluation retenus.

Suite aux expérimentations, réalisées en situation réelle de travail ou en simulation, l'analyse des données - objectives et subjectives - contribue à l'analyse de l'activité de l'opérateur. Cette analyse débouche sur la validation - ou non - du système homme-machine. Elle permet également d'enrichir la connaissance sur l'opérateur, notamment sur ses ressources et limites.

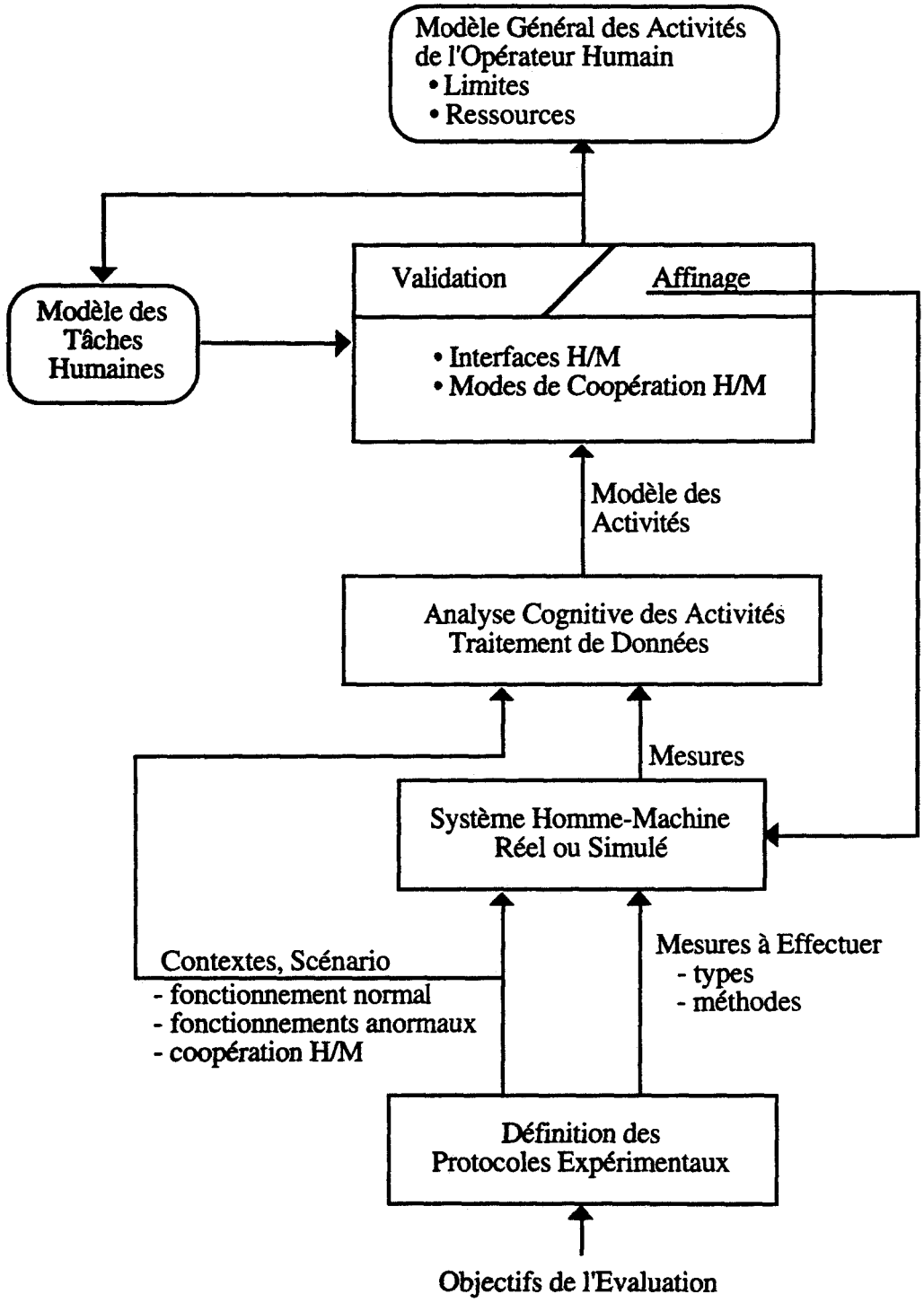


Figure I.4 : Phase ascendante d'évaluation d'un système homme-machine /MILLOT, DEBERNARD, 93/.

L'analyse de l'activité de l'opérateur constitue une étape importante de la phase d'évaluation. Un autre aspect important concerne les "mesures", et plus particulièrement l'estimation du "coût" du travail pour l'opérateur.

II.3.1 Estimation de la charge de travail

Au sujet de ce coût individuel du travail, SPERANDIO /88/ donne les deux définitions complémentaires suivantes :

- La *contrainte* est l'ensemble des exigences du travail relatives à un poste donné, dans des conditions de travail données. Elle ne dépend aucunement des caractéristiques de l'opérateur.
- L'*astreinte* quant à elle est l'ensemble des conséquences de la contrainte sur l'opérateur. Elle dépend directement de l'activité mise en jeu pour répondre à la contrainte, en fonction des circontances et des caractéristiques individuelles.

Ce que l'on appelait "coût du travail pour l'opérateur" correspond donc à l'astreinte, telle qu'elle est définie par SPERANDIO et plus communément désignée dans la littérature par *charge de travail*. Le travail d'un opérateur de supervision étant à prédominance mentale, nous nous intéressons dans cette étude uniquement à la *charge de travail mental.*

Pour se persuader de l'intérêt d'estimer la charge de travail dans une phase d'évaluation, il suffit de s'intéresser à la performance et à l'effort de l'opérateur en fonction de la difficulté de son travail. DORNIC /86/ fait les deux hypothèses suivantes (hypothèses confirmées par des études expérimentales, par exemple pour une tâche de conduite automobile sur simulateur /RIERA, 90/) :

a/ lorsque la difficulté augmente, la performance demeure constante au prix d'une augmentation de l'effort ;
b/ lorsque la difficulté augmente, l'effort est maintenu constant et l'on observe une dégradation de la performance.

La figure I-5 fournit une représentation graphique de ces deux comportements hypothétiques de l'opérateur :

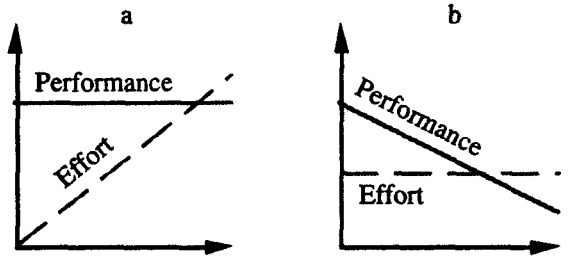


Figure I.5 : Performance et effort de l'opérateur en fonction de la difficulté de sa tâche /DORNIC, 86/.

Autrement dit, tous les opérateurs ne réagissent pas de la même manière face à une augmentation de la difficulté de leur travail. Pour reprendre les deux cas de figure précédents, l'opérateur de type "a" a tendance à se comporter comme un "régulateur de performance", tandis que celui de type "b" s'apparente, lui, à un "régulateur d'effort". Mais, dans les deux cas, les répercussions de l'augmentation de la difficulté sur le fonctionnement du procédé sont rapidement néfastes :

- Dans le premier cas, l'opérateur essaie de compenser cette augmentation de difficulté en "s'investissant d'avantage". Or, en matière de traitement de l'information, l'opérateur est souvent assimilé à un canal unique de transmission, canal à capacité limitée /WANNER, 87/. Cette hypothèse, certes très réductrice, et d'ailleurs souvent contestée, met bien en évidence que l'opérateur, à un instant donné, est caractérisé par une capacité limite. Le franchissement de cette limite risque de conduire l'opérateur à ne plus considérer qu'une partie de l'information disponible et, à court terme, de lui faire commettre des erreurs de jugement.
- Dans le second cas, l'opérateur semble "se protéger". Il peut pour cela se définir de nouvelles normes de performance ; il peut également adopter des modes opératoires moins coûteux en termes de charge de travail, au détriment de la performance. Les conséquences sur le fonctionnement du procédé risquent d'être très rapidement identiques au cas précédent.

Toujours pour justifier l'intérêt d'estimer la charge de travail mental dans une phase d'évaluation, des auteurs se sont intéressés à la relation liant la performance de l'opérateur à sa charge de travail /JOHANNSEN, 79//WIENNER et al., 84//BITTNER, 92/. JOHANNSEN a étudié à cette relation dans le contexte d'un système homme-machine opérationnel, où l'opérateur doit affronter des situations multitâches. Il émet l'hypothèse d'une relation en "U" inversé (figure I.6) :

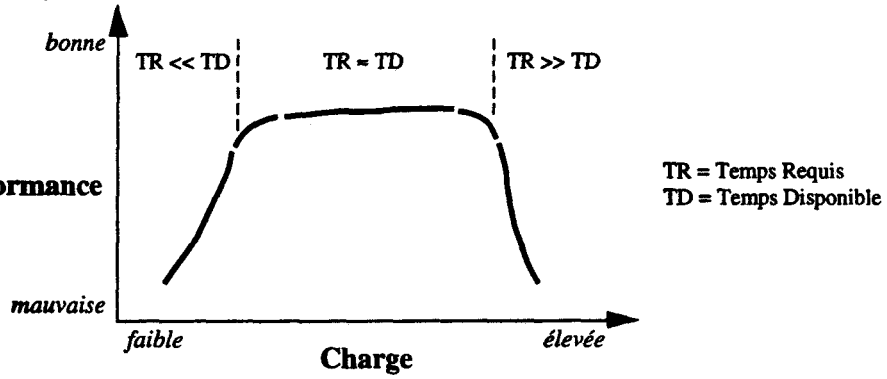


Figure I.6 : Relation hypothétique entre la performance de l'opérateur et sa charge de travail /JOHANNSEN, 79/.

Les trois zones caractéristiques de cette courbe correspondent à trois niveaux d'activité de l'opérateur :

- *Zone 1* : Cette zone correspond essentiellement aux situations où il se passe peu de choses. L'opérateur est en manque d'informations nouvelles, son niveau général d'activité est faible. Dans de telles situations, WANNER /87/ met en garde contre l'écueil de la chute de vigilance.
- *Zone 2* : L'opérateur parvient à maintenir un niveau de performance maximal. Il est dans sa plage de "bon fonctionnement". On parle alors de niveau de charge de travail "optimal" /HOCKEY et al., 89/.
- *Zone 3* : Il s'agit d'une zone d'activité intense. L'opérateur n'arrive plus à traiter toutes les informations disponibles, il est en situation de "stress informationnel" /DORNIC, 86/. Il a atteint la "red line" de MORAY /88/, c'est à dire le niveau de charge à partir duquel la performance décroît dangereusement. Cette chute de performance risque, à court terme, d'aboutir à des erreurs de l'opérateur et met donc en péril la sécurité de l'installation.

La charge de travail mental s'avère une grandeur particulièrement intéressante pour évaluer un système homme-machine, puisqu'une estimation "sensible" est susceptible de prévenir à la fois une saturation de l'opérateur (sur-charge) et un risque d'hypo-vigilance (consécutif à une sous-charge).

II.3.2 Analyse de l'activité

Une démarche complémentaire à l'évaluation de la charge de travail de l'opérateur consiste à analyser son activité. On a vu qu'évaluer les exigences du travail de l'opérateur, lors de la phase de conception, n'est pas suffisant et qu'il faut estimer la charge de travail lors de la phase d'évaluation. Il en est de même de l'activité de l'opérateur. On a parlé, lors de la phase descendante, de "tâche prescrite" ; il convient, lors de la phase ascendante, d'analyser l'activité réelle de l'opérateur, encore appelée tâche "effective".

L'analyse de "l'écart" entre la tâche prescrite - c'est à dire la tâche telle qu'elle a été pensée par le concepteur - et la tâche effective permet l'évaluation ergonomique du système homme-machine, et notamment de l'interface de dialogue /ABED, 91//DEBERNARD, 93/. En effet, un écart modéré peut être significatif, par exemple, d'une carence en information et donc appeler un léger aménagement de l'interface. Un écart important, associé à une charge de travail très élevée, peut conduire à de grosses modifications du système homme-machine, avec par exemple la nécessité d'introduire un outil d'aide à l'opérateur.

De tels travaux débouchent sur un double résultat : l'évaluation du système homme-machine, et également l'obtention d'une description détaillée de l'activité de l'opérateur, qui enrichira la connaissance si précieuse lors de la phase de conception.

L'analyse de la tâche effective est réalisée à partir de l'observation des activités de l'opérateur /LEPLAT, 82/ :

- *Activité physique, notamment gestuelle* : cette activité concerne la transmission des commandes vers le procédé, l'accès "manuel" aux informations contenues dans les diverses vues graphiques, l'utilisation des systèmes d'aide éventuels, ...
- *Activité de communication orale* : dans certains domaines, comme le contrôle de la navigation aérienne, les échanges verbaux font partie intégrante du travail de l'opérateur et en constituent un aspect important.
- *Activité mentale* : contrairement aux deux activités précédentes, l'activité mentale est, par nature, inobservable et ne peut donc être "approchée" qu'à travers certaines manifestations. On peut y ajouter les traces provoquées par l'intervention de l'analyste, le plus souvent sous la forme d'une verbalisation de l'opérateur.
- *Activité visuelle* : le travail de l'opérateur consistant essentiellement à acquérir et traiter de l'information, l'enregistrement de son activité visuelle face aux vues de conduite constitue une trace observable. En connaissant le "matériau visuel" prélevé par l'opérateur, on dispose de renseignements précieux pour tenter de "remonter" à sa démarche mentale /SANTUCCI, 87/.

Les données oculométriques (issues de l'enregistrement des mouvements oculaires) ainsi que les données verbalisées ont ceci de commun qu'elles doivent toujours être traitées avec beaucoup de sens critique /VIVIANI, 90//LEPLAT, 82/. Ainsi les spécialistes de chacun des deux domaines insistent sur le fait que les caractéristiques de l'activité mentale inférées à partir de ces données devront toujours être soumises à vérification.

II.3.3 Synthèse

Le travail de l'opérateur consiste à se faire en permanence l'idée la plus juste possible de l'état du procédé, pour détecter toute anomalie nécessitant une action correctrice. A cette fin, l'opérateur doit prélever de l'information provenant de plusieurs sources, et la traiter. Cette activité se traduit par un "coût" pour l'opérateur, coût appelé *charge de travail mental.*

Le concepteur d'un système homme-machine doit intégrer cette notion de charge de travail durant toute la phase "descendante" conduisant à la réalisation du système. Néanmoins, malgré toute la connaissance que l'on peut avoir sur l'opérateur humain, malgré l'existence de règles ergonomiques pour orienter la conception, le seul moyen de s'assurer que le travail confié à l'opérateur est compatible avec ses capacités est de procéder à une phase d'évaluation.

Cette phase ascendante va permettre tout d'abord de vérifier que les objectifs assignés au système homme-machine sont atteints.
L'intérêt de procéder également à une estimation de la charge de travail de l'opérateur a été mis en évidence. Une telle estimation se justifie par des critères de performance de l'opérateur, et donc indirectement de sécurité de l'installation, mais aussi par des critères de satisfaction de l'opérateur (il faut éviter qu'il soit saturé, mais également qu'il ne s'ennuie).
Nous avons également souligné l'intérêt d'une analyse de la tâche "effective" de l'opérateur. Cette dernière étant à prédominance mentale, nous avons indiqué l'intérêt de l'enregistrement de l'activité oculaire de l'opérateur.

Les deux parties suivantes sont donc consacrées respectivement à la charge de travail mental et aux problèmes liés à son estimation, ainsi qu'à la prise d'information visuelle en supervision de procédé ainsi qu'aux applications de l'oculométrie dans l'étude des systèmes hommes-machines.

III. CHARGE DE TRAVAIL MENTAL : CONCEPT ET MÉTHODES D'ESTIMATION

Lors de la conception d'un système homme-machine, une phase d'évaluation s'avère donc indispensable pour s'assurer d'une bonne intégration de l'opérateur dans le système technologique et vérifier que les tâches qui lui sont confiées sont compatibles avec ses capacités. Non seulement celles-ci doivent être suffisantes "en régime établi", c'est à dire lors des phases de fonctionnement normal du procédé, mais il est souhaitable que l'opérateur dispose de "capacités de réserve" indispensables pour faire face à un imprévu, à un incident, voire un déclenchement d'alarmes en cascade /SHERIDAN & STASSEN, 79/. En effet, la conjonction d'une charge de travail élevée et de l'occurrence d'un incident sur l'installation est souvent à l'origine de conséquences graves pour le système homme-machine.

Le recours à l'estimation de la charge de travail dans l'évaluation d'un système homme-machine se justifie par des critères de performance de l'opérateur, et donc de sécurité, mais également par rapport à des critères de satisfaction de l'opérateur. SZEKELY /75/ s'est intéressé à la relation liant le niveau de satisfaction de l'opérateur et sa charge de travail. Il la décrit comme ayant une allure en "U" inversé, allure similaire à la courbe liant performance et charge de travail. De même que pour la performance, il existe un niveau de charge "optimal" au sens de critères de satisfaction de l'opérateur. Ces derniers sont presque aussi importants que les critères de performance puisqu'il y va, à long terme, de la santé de l'opérateur /DAVEZIES & PROST, 85/.

L'évaluation de la charge de travail devrait donc permettre de satisfaire à la fois les critères de performance et de satisfaction. SZEKELY /75/ fait remarquer qu'aussi curieux que cela puisse paraître, une intervention ergonomique ne consiste pas à minimiser la charge à tout prix mais plutôt à la maintenir dans une plage "acceptable".

Avant de passer en revue les principales méthodes d'estimation de la charge de travail mental, nous allons recenser les principaux facteurs dont elle dépend.

III.1 Principaux facteurs influant la charge de travail

On distingue généralement deux grandes familles de facteurs /LEPLAT, 78//SPERANDIO, 88/ : les facteurs relatifs à la situation de travail, et ceux relatifs à l'individu.

III.1.1 Facteurs relatifs à la situation de travail

• *Les objectifs* : Le comportement de l'opérateur est généralement dirigé par des buts. Les informations qu'il traite, sa "démarche mentale", et les actions qu'il réalise dépendent des objectifs qui lui ont été assignés /HART, 86/. Ceux-ci vont naturellement influencer la nature et surtout l'intensité de l'effort de l'opérateur.

• *La nature de la tâche* : Une "source" majeure de charge provient de la quantité d'information à traiter ainsi que de la complexité des traitements associés. En effet, toutes les opérations de traitement de l'information non-réflexes exigent une certaine somme d'effort. L'information est transmise au cerveau par un acte volontaire de l'opérateur qui décide, à un instant donné, de lire cette information précise /WANNER, 87/. De même, une réflexion trop ardue peut devenir une source de "stress informationnel", et donc de charge de travail mental. Ceci concerne tout particulièrement les tâches impliquant des déplacements constants de l'attention entre des sources d'information externes et internes, c'est à dire sollicitant énormément la mémoire à court terme /DORNIC, 86/.

• *L'organisation du travail* :

- Nécessité d'exécuter plusieurs tâches simultanément : ce type d'activité sollicite énormément la mémoire à court terme et conduit généralement à des charges élevées /DORNIC, 86/.

- Contraintes temporelles : la "pression temporelle" ressentie par l'opérateur contribue grandement à sa charge de travail. Il n'est donc pas étonnant de retrouver dans certaines méthodes d'estimation de la charge des critères temporels explicites /MILLOT, 87//REID & NYGREN, 88//HART & STAVELAND, 88/.

- Rigidité des modes opératoires : il existe des modes opératoires plus ou moins efficaces, selon des critères de performance, et également plus ou moins économiques, selon des critères de charge de travail /DORNIC, 86//SPERANDIO, 88/. Dans certains cas, l'opérateur peut diminuer sa charge de travail en modifiant ses modes opératoires. A l'inverse, les médecins du travail font remarquer que les manifestations de souffrance consécutives à une charge de travail élevée sont plus fréquentes chez les opérateurs dont la liberté d'action est réduite /DAVEZIES et al., 85/.

- ...

• *L'aménagement du poste de travail* : Il va de soi qu'un poste de travail mal aménagé risque d'entraver les activités de l'opérateur et donc diminuer sa capacité de travail. Ceci est vrai notamment pour les dispositifs de présentation de l'information visuelle, qui devront faciliter le travail perceptif de l'opérateur /ACIER, 90/, mais également pour les dispositifs de commande, une mauvaise "contrôlabilité" du système étant un facteur de charge important /HOCKEY et al., 89/.

A tous ces facteurs concernant la tâche elle-même peuvent être ajoutés ceux concernant l'environnement physique de travail : niveau sonore ambiant, éclairage, ambiance thermique, vibrations, ... Ces facteurs sont susceptibles d'entraver le travail perceptif de l'opérateur, de perturber ses opérations mentales, de détourner son attention, etc., et donc d'augmenter sa charge de travail.

III.1.2 Facteurs relatifs à l'individu

• *Apprentissage, qualification, expérience* : Il est évident qu'un opérateur en cours de formation est moins efficace qu'un opérateur chevronné ! Il est moins efficace dans son travail perceptif : il a tendance à tenir compte de toutes les informations disponibles, là où un expert appliquera naturellement un "filtre" issu de son expérience. Il n'a pas encore développé des modes opératoires "efficaces", c'est à dire à la fois peu coûteux en termes de charge et performants. La figure qui suit représente le lien hypothétique entre la performance et la charge de l'opérateur en fonction de son "habileté" /TOLE et al., 82/. Elle est issue d'une étude sur le pilotage d'avion mais a souvent été reprise dans d'autres contextes :

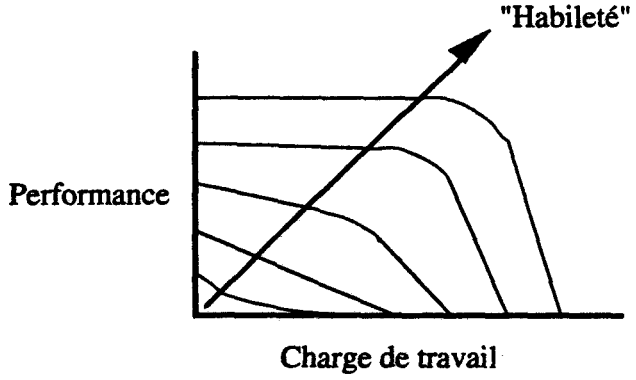


Figure I.7 : Performance de l'opérateur en fonction de sa charge de travail et de son expérience /TOLE et al., 82/.

Généralement, on observe que la performance des opérateurs "experts" est très peu sensible aux variations de charge de travail, et ceci jusqu'à leur saturation.

L'habileté de l'opérateur dépend bien entendu de sa qualification professionnelle et évolue avec son expérience.

• *Aptitudes et traits de personnalité* : Dans de nombreuses situations, on peut observer que l'effort "déployé" n'a pas la même répercussion sur la performance pour tous les opérateurs (SZEKELY /75/ parle de "l'efficacité de la charge"). Autrement dit, si on considère une population d'opérateurs également motivés, face à un même accroissement des exigences du travail, certains atteindront leur limite beaucoup plus vite que d'autres.

Concernant la personnalité, STASSEN /90/ dégage trois profils d'opérateurs, selon l'évolution de leur performance et de leur charge de travail au fur et à mesure du développement de leur représentation interne du procédé : les superviseurs "ambitieux", les "paresseux" et les "sages", selon qu'ils se focalisent sur leur performance, leur charge de travail, ou les deux. On peut encore citer comme facteurs la tolérance au stress, l'anxiété, ou encore l'introversion/extraversion /LEPLAT, 78//DORNIC, 86/.

Pour conclure cette rubrique, nous mentionnerons également comme facteurs de charge l'attitude "instantanée" de l'opérateur face à sa tâche (motivation, satisfaction, etc.), son état de santé ou de fatigue, ... /SPERANDIO, 88/.

La figure I.8 qui suit fournit une synthèse des principaux facteurs influant la charge de travail et la performance d'un opérateur humain :

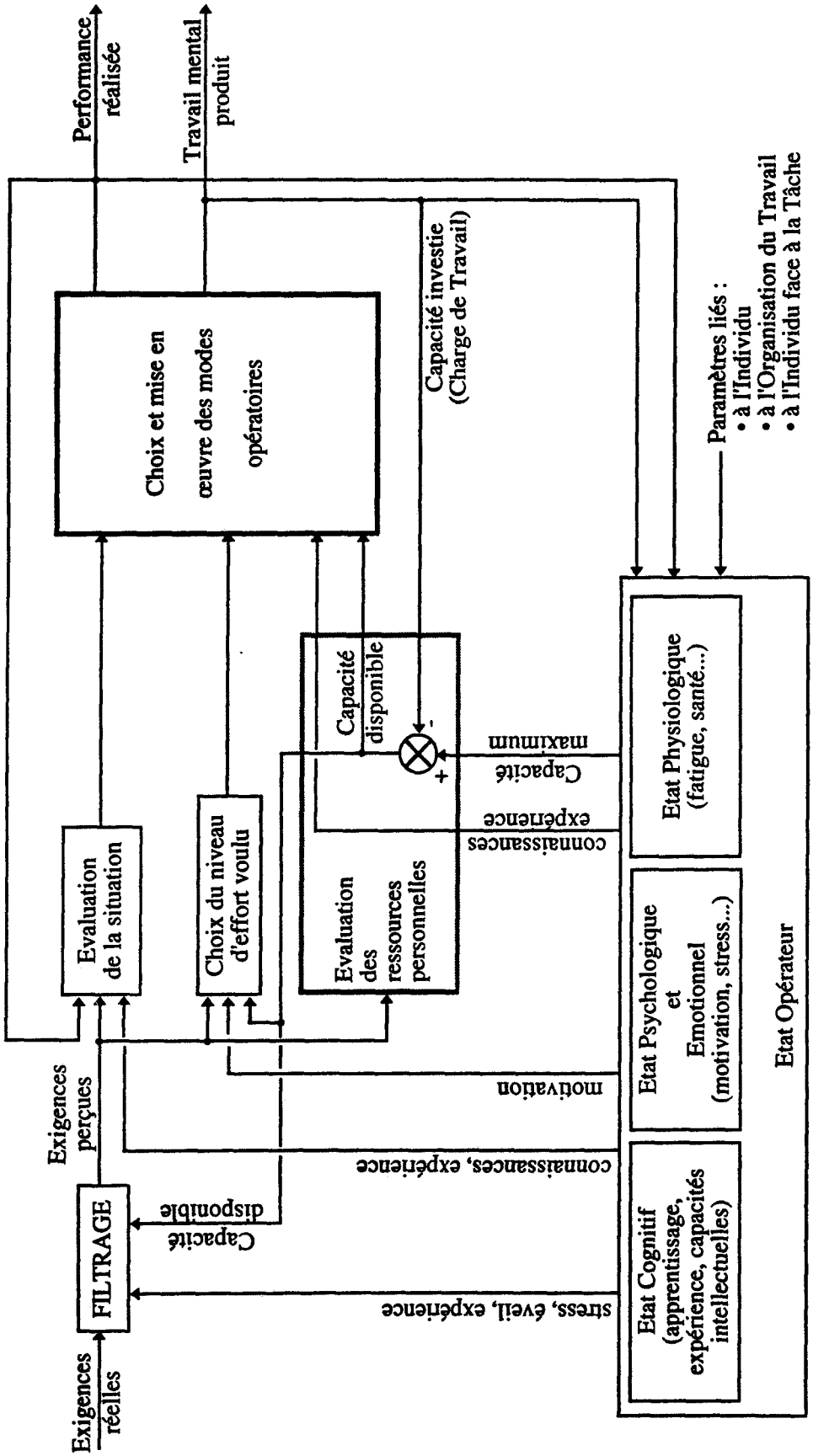


Figure I.8 : Synthèse des principaux facteurs influant sur la performance et sur la charge de travail /DEBERNARD, 93/, adapté de /DORNIC, 86/, /MILLOT, 87/ et /BAINBRIDGE, 88/.

III.2 Intérêt de la charge de travail instantanée

Lorsqu'on désire réaliser une estimation de la charge de travail, se pose le problème du choix de "l'intervalle d'étude". L'estimation porte souvent sur l'ensemble d'un travail. Elle renseigne alors sur la valeur moyenne de la charge, masquant les grosses variations susceptibles de survenir au cours du travail de l'opérateur.

Or les périodes de surcharge, aussi courtes soient-elles, peuvent conduire à un comportement dangereux de l'opérateur. Ce dernier, complètement saturé, va par exemple négliger une partie de son travail, se définir de nouvelles normes de performance, ou va dans les cas extrêmes commettre des erreurs graves pouvant déboucher sur un échec de la tâche (et donc sur la mise en péril de l'installation). Ainsi WIERWILLE /88/ décrit une situation où la charge de travail moyenne de l'opérateur est modérée, et ce malgré la présence de "pics de charge" sources d'erreurs. L'expérimentateur chargé d'étudier le travail de l'opérateur aura bien du mal à déterminer la cause de ces erreurs s'il ne dispose que d'estimations de la charge moyenne. La situation inverse, c'est à dire la présence de longues périodes de sous-charge, est également à éviter : on a vu qu'elle présentait pour l'opérateur un risque d'hypovigilance /WANNER, 87/.

Les deux situations qui viennent d'être décrites ("pics" et "creux" de charge) correspondent aux deux points de cassure de la courbe en "U" inversé liant performance et charge de travail.

L'intérêt de la charge de travail instantanée est également mis en évidence par certains travaux sur la "dynamique" de la performance et de la charge. Les résultats de ces travaux suggèrent que la relation entre performance et exigences de la tâche est, au moins partiellement, dépendante de l'historique des exigences. GOLDBERG et al. /80/ présentent une situation où, après augmentation des exigences, le sujet ne "récupère" pas immédiatement sa performance quand les exigences redescendent à leur niveau initial (il s'agit d'une tâche de reconnaissance de caractères). Autrement dit, la relation liant performance et exigences de la tâche présente un hystérésis. Une augmentation des exigences du travail peut donc avoir des effets qui se prolongent dans le temps, après le retour à une situation normale. Ce qui justifie, une fois de plus, l'intérêt à porter à la charge de travail instantanée.

La charge de travail instantanée est une grandeur intéressante pour l'évaluation des systèmes hommes-machines. Mais il existe d'autres applications possibles :

• On a vu, au sujet de la phase de conception d'un système homme-machine, qu'une approche possible pour diminuer la charge de travail de l'opérateur consiste à introduire un système d'aide (système d'aide à la décision notamment). Or BAINBRIDGE /82/ rapporte des travaux d'EPHRATH & YOUNG (1981) tendant à montrer que de tels systèmes d'aide améliorent la performance globale du système uniquement lors des phases de charge élevée. Aussi des auteurs proposent-ils d'adapter en ligne le système d'aide, selon le niveau de charge de l'opérateur. ROUSE, cité dans /BAINBRIDGE, 82/, souligne que ceci n'est possible que si l'on dispose de méthodes pour estimer la charge de travail "en temps réel".

• Une autre exploitation est la répartition dynamique de tâches entre l'opérateur et le calculateur de supervision. On a vu, dans la partie consacrée à la conception d'un système homme-machine, qu'il faut à un moment décider de l'allocation des différentes tâches qui reviennent soit à l'opérateur, soit à la machine. Cette répartition est généralement figée à la conception. L'idée de base de la répartition dynamique consiste à "composer" avec certaines tâches, celles pouvant être affectées indifféremment à l'homme ou à la machine, pour "lisser" la charge de l'opérateur. Les problèmes de saturation de l'opérateur sont ainsi évités, de même que les risques d'hypovigilance /MILLOT, 87/.

DEBERNARD /93/ décrit deux types de répartition dynamique :

- La répartition explicite : l'opérateur se voit allouer le rôle de répartiteur. Il effectue cette "tâche ajoutée" via une interface de dialogue avec le calculateur de supervision.
- La répartition implicite : le calculateur se charge de la répartition. Il doit pour cela être capable d'évaluer en ligne la charge de travail instantanée de l'opérateur.

Après avoir mis en évidence les intérêts de la charge de travail instantanée, il faut maintenant analyser les principales méthodes susceptibles de l'évaluer.

III.3 Estimation de la charge de travail mental

Pour estimer la charge de travail mental, il existe deux grandes approches : l'approche "mesure" et l'approche "modèle". La première vise à quantifier la charge relative à un système homme-machine existant tandis que la seconde vise à prévoir la charge induite par un système non encore existant, dans des conditions fixées a priori /ROUSE, 79//HART, 86/.

Ces deux approches sont naturellement complémentaires. Par exemple, un modèle est développé pour estimer la charge induite par un nouveau mode de commande (comme le pilotage à deux des Airbus) et utilisé lors de la conception du système. La phase d'évaluation met ensuite en oeuvre des méthodes empiriques de "mesure" de la charge. Cela permet de valider la réalisation, et également de confirmer ou infirmer le bien-fondé du modèle.

De tels modèles sont souvent très spécifiques et restrictifs dans leurs conditions d'utilisation, alors qu'ils nécessitent des développements mathématiques souvent très lourds. De plus, l'installation d'un système de supervision s'effectue souvent sur un procédé déjà existant, disposant déjà d'un système de contrôle. Dans ce cas, la conception du nouveau système homme-machine débute généralement par une évaluation de l'existant. C'est pourquoi seule l'approche "mesure" est considérée dans la suite.

Avant de décrire les principales méthodes d'estimation de la charge de travail mental, nous allons nous intéresser à leurs propriétés, ces dernières pouvant ensuite servir de critères de choix.

III.3.1 Propriétés des méthodes d'estimation de la charge

1/ Sensibilité : La sensibilité caractérise la capacité d'une méthode à discriminer différents niveaux de charge consécutifs aux exigences de la tâche ou à des choix de conception du système homme-machine. L'idéal serait de disposer d'une méthode qui puisse détecter de faibles variations de charge sur une plage la plus étendue possible. Ces deux qualités sont rarement réunies au sein d'une même méthode. Ainsi, certaines méthodes sont sensibles aux charges extrêmes : elles sont donc particulièrement adaptées pour détecter une saturation de l'opérateur survenant à la suite d'un incident sur l'installation ou révélant un défaut majeur de conception. D'autres méthodes sont sensibles à plusieurs niveaux de charge mais dans le registre des charges moyennes : elles sont adaptées pour l'évaluation de choix de conception concernant une interface graphique, l'évaluation de modes opératoires, ...

2/ Sélectivité : Ce critère rend compte de l'immunité de la méthode envers les variables autres que la charge de travail. Par exemple, certaines méthodes évaluent autant l'influence de l'environnement sur le sujet que celle des exigences du travail. D'autres sont sensibles autant à la fatigue qu'à la charge. A ce sujet, SPERANDIO /91/ souligne qu'il faut bien distinguer ces deux grandeurs. Il s'agit là de *deux notions différentes mais néanmoins liées, qui constituent les deux chapitres majeurs résumant globalement le phénomène d'astreinte*. L'auteur explique que *la fatigue est un phénomène dont les effets sont consécutifs à une activité donnée, alors que la charge de travail est une astreinte synchrone à l'activité en question.*

3/ Fiabilité : Il est souhaitable que pour plusieurs évaluations successives d'une même situation (même tâche, même environnement, même sujet) la méthode fournisse des résultats sensiblement égaux.

4/ Capacité de diagnostic : Il s'agit de la capacité de la méthode à discerner les dépenses relatives aux différentes ressources de l'opérateur. Cette propriété fait référence à la théorie des ressources multiples développée notamment par WICKENS /O'DONNEL & EGGEMEIER, 86/. Selon cette théorie, l'opérateur dispose de plusieurs "ressources" sollicitées par des activités de types différents. Il s'agit de ressources relatives à la perception (perceptual processing), aux traitements (central processing), aux actions (motor ressources), auxquelles certains auteurs ajoutent les communications. Ces différentes ressources sont considérées comme non-interchangeables et possèdent chacune leur propre capacité. Elles peuvent donc être saturées séparément.

Ainsi une méthode "apte au diagnostic" va permettre non seulement de détecter une charge élevée mais en plus donnera des indications sur son origine : trop d'information à traiter, délais accordés aux actions manuelles trop courts, ... Autrement dit, il s'agit d'une propriété particulièrement intéressante permettant d'orienter une intervention ergonomique suite à l'évaluation.

5/ Perturbation : Certaines méthodes ont tendance à provoquer une dégradation de la performance de l'opérateur sur sa tâche primaire. Il s'agit notamment des méthodes nécessitant une "participation active" de l'opérateur au cours de son travail.

6/ Difficulté de mise en oeuvre : Certaines méthodes exigent une instrumentation "lourde" ou nécessitent l'accès à de nombreuses variables, par exemple pour évaluer la performance de l'opérateur. De telles contraintes, si elles sont acceptables pour des expérimentations en laboratoire, peuvent être rédhibitoires pour les études "sur le terrain". De plus, certaines techniques requièrent une phase d'apprentissage pour les sujets.

7/ Acceptation de l'opérateur : Si certaines méthodes sont transparentes pour l'opérateur, d'autres réclament une bonne coopération, que ce soit pour un apprentissage préalable ou pour des sollicitations au cours du travail (notamment pour les techniques à base de verbalisation). Ce problème de coopération se pose surtout sur le terrain, lors d'études avec de "vrais" opérateurs.

8/ Possibilité d'évaluer la charge de travail instantanée : Nous avons mis en évidence, en III.2, l'intérêt de disposer de méthodes capables de rendre compte des grosses variations de charge durant l'exécution de la tâche /WIERWILLE, 81//STASSEN, 90/.

Nous allons maintenant brièvement passer en revue les principales méthodes d'évaluation de la charge de travail mental.

III.3.2 Principales méthodes d'estimation de la charge

Une remarque préliminaire s'impose concernant l'approche "mesure" de la charge. SANTUCCI /87/ souligne que la "nébuleuse" entourant la notion de charge de travail interdit toute mesure au sens physique du terme. En effet, il n'y a pas vraiment de consensus sur la définition de la charge de travail mental : coût du traitement de l'information /SZEKELY, 75/ ; fraction de la capacité de travail investie dans la tâche /LEPLAT, 78/ ; produit de la fraction d'attention par l'intensité de l'effort /ROUSE, 79/ ; niveau d'activité mentale, sensori-motrice et physiologique /SPERANDIO, 77/ ; etc. De toutes ces définitions, il semble impossible de dégager une quelconque unité de mesure. De plus, de nombreux auteurs s'accordent pour dire que l'évaluation de la charge de travail ne peut être réduite à un scalaire unique, mais doit plutôt consister en un vecteur /JOHANNSEN et al., 79//DERRICK, 88/. Aussi le terme de "mesure" est-il mal adapté à la notion de charge de travail. Seule une "estimation" semble possible, le plus souvent en vue d'une comparaison entre tâches, entre individus, ...

De nombreuses méthodes sont proposées par des spécialistes provenant d'horizons très divers : Psychologie, Physiologie, Ergonomie, Sciences pour l'ingénieur, etc. La littérature à leur sujet abonde, que ce soit au sujet de leur développement ou de leur mise en oeuvre. Les principales "familles" de méthodes généralement citées sont les suivantes :

- *Méthodes subjectives* : échelle Cooper-Harper Modifiée (CHM) /WIERWILLE & CASALI, 83/, Task Load indeX (TLX) /HART & STAVELAND, 88/, Subjective Workload Assessment Technique (SWAT) /REID & NYGREN, 88//AMALBERTI et al., 86/, Overall Workload scale (OW) /Vidulich & Tsang, 87/ cités dans /HILL et al., 92/, ...

- *Méthodes physiologiques* /PARDON, 77//WIERWILLE, 79//WILSON & O'DONNEL, 88/.

- *Mesures de performance* (sur la tâche primaire).

- *Méthodes de la double tâche* /KALSBEEK, 65//OGDEN et al., 87/.

- *Analyse des variations du comportement opératoire* /SPERANDIO, 91/.

- *Méthodes basées sur un modèle observateur* /MILLOT, 88/.

Plusieurs thèses récentes du laboratoire /BERGER, 92//RIERA, 93/ consacrent des développements importants sur ce sujet qui ne seront donc pas repris ici en détail.

Le tableau de la figure I-9 fournit un récapitulatif des principales méthodes d'estimation et de leurs propriétés.

Propriétés / Méthodes	*sensibilité*	*sélectivité*	*fiabilité*	*capacité de diagnostic*	*perturbation*	*mise en oeuvre*	*acceptation*	*charge instantanée*
méthodes subjectives•	assez bonne	assez bonne	raisonnable	variable	très faible	facile (apprentissage éventuel)	variable	perturbatrices
OW	bonne			aucune		1	la plus facile	
CHM	moyenne			aucune		2		
TLX	bonne			bonne		3	la préférée	
SWAT	moyenne			bonne		2		
méthodes physiologiques	assez bonne	faible	faible	faible	variable (nécessité de "câbler" l'OH)	variable (facile en labo)	variable (souvent OK)	plutôt adaptées
mesures de performance	très faible (essentiellement surcharges)	faible	bonne	faible	aucune	facile en labo	transparente	surcharges uniquement
double tâche	variable (charges moyennes)	pour la plupart	raisonnable	faible	par nature !	facile	variable	plutôt adaptée
variation du comportement opératoire	faible	assez bonne	?	?	aucune	souvent difficile	transparente	grosses variations uniquement
méthode temporelle	bonne	assez bonne	bonne	faible	aucune	difficile hors labo	transparente	très adaptée

Figure I.2 : Synthèse des principales méthodes d'estimation de la charge de travail et de leurs propriétés, d'après /O'DONNEL et al., 86/STASSEN et al., 90//HILL et al., 92/.

On constate qu'il n'existe pas de méthode idéale. Toutes possèdent leurs avantages et leurs inconvénients :

- Les méthodes basées sur des mesures de performance sur la tâche primaire sont peu explicatives et dangereuses à utiliser seules. Elles peuvent néanmoins être utiles pour détecter des charges extrêmes.
- Les méthodes de la double tâche peuvent être intéressantes sur le terrain lorsqu'il est possible d'intégrer "harmonieusement" la tâche ajoutée dans le travail de l'opérateur.
- Les méthodes physiologiques perturbent peu la tâche primaire, mais s'avèrent dans l'ensemble peu sélectives. De plus, elles nécessitent de "câbler" l'opérateur.
- L'analyse des variations des modes opératoires n'est pas souvent facile à réaliser et semble réservée à certains contextes particuliers (ceux justement laissant une certaine liberté d'action à l'opérateur). Par contre, elle fournit des renseignements précieux sur le "fonctionnement" de l'opérateur.
- La méthode temporelle /MILLOT, 88/, à base de modèle observateur, est totalement transparente pour l'opérateur et fournit un indice de charge instantanée. Son champ d'application est par contre très limité.
- Les méthodes subjectives s'avèrent être les plus "utilisables". Elles nécessitent peu de matériel, sont peu perturbatrices et faciles à utiliser, et sont relativement sensibles /HILL et al., 92//WIERWILLE et al., 85/. Mais elles fournissent un indice de charge de travail globale, évalué le plus souvent après l'exécution de la tâche.

Comme il n'existe pas de méthode "parfaite", un avis généralement exprimé est que l'estimation de la charge de travail doit reposer sur l'utilisation de plusieurs indices. SANTUCCI /87/ propose le "trépied" suivant :

1) *L'analyse de la tâche effectuée* : elle consiste en une description la plus exhaustive possible du travail réalisé par l'opérateur. Elle renseigne notamment sur les différentes stratégies de l'opérateur, un changement de stratégie pouvant "signer" une grosse variation de charge /SPERANDIO, 72, 77, 91/.

2) *Les indices subjectifs* : ils rendent compte avec fidélité du "vécu conscient" de l'opérateur, essence même de la charge de travail mental d'après SHERIDAN (cité dans /YEH et al., 85/). Les méthodes subjectives sont à utiliser avec beaucoup de précautions. Elles s'apparentent en effet à des techniques de verbalisation dont on sait qu'elles sont très facilement biaisées.

3) Les indices physiologiques : leur choix s'effectue en fonction de la nature de la tâche et de son contexte d'exécution.

Parmi les propriétés des méthodes d'estimation de la charge, nous avons fait une place de choix à la possibilité d'évaluer la charge instantanée. Or on s'aperçoit que les méthodes "classiques" s'avèrent globalement peu adaptées.

Concernant les évaluations subjectives, des travaux expérimentaux ont montré qu'elles pouvaient être biaisées par la présence d'un pic de charge. Il s'agit de l'effet "Von Restorff" qui veut que plus un pic de charge survient près de l'instant d'évaluation, plus il influe sur le résultat de cette dernière /THORNTON, 85/. WIERWILLE /81, 88/ propose d'effectuer une évaluation en ligne, c'est à dire périodiquement. Le problème est que les méthodes subjectives deviennent alors perturbatrices, d'autant plus que l'instant d'évaluation peut coïncider avec une phase critique du travail de l'opérateur.

Certaines méthodes physiologiques se prêtent particulièrement bien à une évaluation de la charge instantanée. C'est le cas du diamètre pupillaire dont les variations, même si elles sont faibles, sont fortement liées à l'effort cognitif instantané /BEATTY, 81/. Mais ces méthodes ont un inconvénient majeur, elles sont peu sélectives.

Autrement dit, le problème de l'évaluation de la charge instantanée reste posé.

III.3.3 Synthèse

Cette deuxième partie a permis de mettre en évidence l'intérêt de la grandeur "charge de travail mental" dans l'évaluation d'un système homme-machine, et plus particulièrement l'intérêt de détecter les fortes variations de charge au cours du travail de l'opérateur. Or les méthodes "classiques" d'estimation de la charge mentale s'avèrent globalement inaptes à évaluer la charge instantanée. Notamment, les méthodes subjectives qui donnent satisfaction pour l'estimation de la charge globale deviennent perturbatrices lors d'une utilisation périodique, pour une estimation "en ligne".

Ce constat d'incapacité des méthodes usuelles à évaluer la charge instantanée donne de l'intérêt à la méthode temporelle proposée par MILLOT /88/. Cette dernière, malgré son champ d'application assez restreint, demeure l'une des rares méthodes complètement transparentes pour l'opérateur et fournissant un indice "valide" de charge de travail instantanée. La principale limitation de la méthode temporelle provient de l'hypothèse du canal unique, qui impose de connaître à chaque instant la tâche en cours d'exécution. Or ceci est très difficile, voire impossible, lorsque l'opérateur effectue des tâches de supervision, avec quasiment aucune action manuelle. Dans ce cas, le seul moyen non perturbant de se renseigner sur l'activité de l'opérateur consiste à enregistrer ses mouvements oculaires. De plus, la prise d'information visuelle étant fortement liée aux processus mentaux de l'opérateur, l'oculométrie sera d'un grand secours pour analyser son activité. Combinés avec les actions manuelles de l'opérateur, aussi rares soient-elles, les mouvements oculaires devraient être riches d'information concernant les modes opératoires.

La perception visuelle est un processus complexe. Aussi, avant d'envisager l'utilisation de l'enregistrement des mouvements oculaires de l'opérateur pour mieux connaître son activité, il convient de s'intéresser aux mécanismes "de base" de la prise d'information visuelle. Ceux-ci font l'objet de la troisième partie de ce premier chapitre.

IV. LA PERCEPTION VISUELLE EN SUPERVISION DE PROCÉDÉ

L'importance du canal visuel dans le travail de l'opérateur humain a déjà été soulignée à plusieurs reprises, que ce soit dans un contexte de supervision de procédé industriel, de pilotage d'aéronef, de conduite automobile, ... Une intervention ergonomique sur le système homme-machine nécessite donc quelques connaissances sur les mécanismes tant physiologiques que mentaux intervenant dans la perception visuelle. Ces connaissances sont notamment indispensables pour la conception des dispositifs de présentation des informations à l'opérateur. Elles le sont également dans le cadre d'une évaluation "dynamique" du système homme-machine, en simulation ou sur site réel. En effet, la mobilité du regard de l'opérateur est évidemment liée à la distribution de son attention à l'intérieur de l'espace de travail. L'enregistrement des mouvements oculaires constitue donc un outil précieux pour l'évaluation ergonomique d'un système homme-machine : si on connaît ce que l'opérateur a successivement regardé, on connaît mieux les différentes étapes de sa pensée /LEVY-SCHOEN, 83/. De plus, certaines caractéristiques du comportement oculaire de l'opérateur sont révélatrices de la difficulté qu'il éprouve durant son travail, ainsi que des qualités ergonomiques de l'interface homme-machine.

Cette troisième partie du premier chapitre comprend elle-même trois parties. Dans la première, on s'attache à décrire brièvement le "capteur œil", au repos et au travail (i.e. en mouvement). Dans la seconde, on focalise sur le comportement oculaire dans le contexte de la supervision de procédé. Enfin, dans la troisième partie, on évoque quelques exemples d'utilisation de l'enregistrement des mouvements oculaires pour étudier les systèmes hommes-machines (plus précisément, pour étudier le comportement de l'opérateur au travail et pour évaluer les interfaces hommes-machines).

IV.1 Perception visuelle : description du capteur "œil"

IV.1.1 Le champ visuel

• *Le champ visuel statique* : Il s'agit du champ capté par l'œil immobile et correspond aux limites extrêmes de la perception d'une cible isolée /HELLA, 83/. Les valeurs "normales" généralement admises sont /LE GRAND, 72/, cité dans /SIMON, 89/ :

- champ horizontal : de 60 à 70 degrés côté nasal, de 80 à 90 degrés côté temporal ;

- champ vertical : environ 50 degrés vers le haut et 80 degrés vers le bas, sachant que l'œil au repos "pointe" environ 15 degrés sous l'horizon.

Ces valeurs sont données à titre indicatif. En effet, le champ visuel n'a pas de limites absolues, son étendue étant sensible à de nombreux facteurs intrinsèques et extérieurs à l'individu /HELLA, 83/.

Ces limites "grossièrement" établies sont moins importantes que la topographie des sensibilités visuelles à l'intérieur de ce champ. Intuitivement, on sait que ces dernières sont très élevées dans la région centrale, c'est à dire dans la direction du regard, et chutent rapidement au fur et à mesure que l'on se rapproche de la périphérie /DUBOIS POULSEN, 77/. La raison est physiologique et provient de la répartition non uniforme des deux types de cellules réceptrices tapissant la rétine : les cônes et les bâtonnets. Le tableau qui suit fournit un bref récapitulatif des propriétés de ces deux types de "capteur".

	Vision centrale	*Vision périphérique*
Propriétés	**cônes**	**bâtonnets**
localisation	essentiellement dans la fovéa (de l'ordre de 2 ou 3° de plage angulaire)	en périphérie
vision	chromatique	achromatique
acuité	très fine	faible
seuil de réponse	élevé	bas

Figure I.10 : Principales propriétés des cônes et des bâtonnets (i.e. des visions centrale et périphérique).

On voit que c'est dans la région de la fovéa que la vision est la plus précise. C'est en effet à cet endroit de la rétine que se forme l'image du point de fixation, c'est à dire le "point" que l'on fixe du regard. La rétine périphérique se caractérise elle par une grande sensibilité aux variations (variations d'intensité lumineuse mais aussi mouvements des objets). Elle va donc permettre de détecter l'apparition d'un nouveau stimulus et également, par son étendue, de se faire une idée globale du contenu du champ visuel.

La figure ci-dessous représente l'acuité visuelle - résolution de l'œil - en fonction de la distance angulaire par rapport à la fovéa (i.e. l'angle par rapport à la direction du regard).

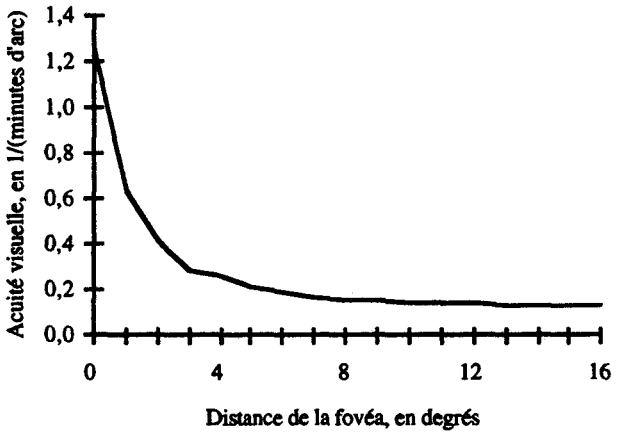


Figure I.11 : Acuité visuelle en fonction de la distance angulaire par rapport à la fovéa et pour une distance d'observation de 70 cm (d'après KRAISS & SHUBERT (1977), cités dans /ACIER, 90/)

• *Les opérations perceptives* : A l'intérieur du champ visuel, les opérations perceptives se hiérarchisent en trois niveaux de difficulté croissante /HELLA, 83/ :

- La détection : il s'agit de l'opération la plus élémentaire, semblant ne réclamer aucun effort, et qui correspond à la visibilité d'un signal. Cette opération met en jeu essentiellement la vision périphérique.
- La discrimination : elle implique la détection de plusieurs signaux, leur "inspection" en vision centrale et leur mémorisation immédiate pour une comparaison ultérieure.
- L'interprétation d'un signal : il s'agit de restituer intégralement le message qu'il délivre, ou d'y répondre. Les apprentissages antérieurs jouent un rôle capital puisqu'ils permettent notamment d'établir des liens entre un système de codification et un système de réponse.

Cette description met en évidence la parfaite complémentarité des visions centrale et périphérique. Très schématiquement, la vision périphérique permet de saisir globalement le contenu de l'espace visuel et "guide" la vision fovéale vers des endroits particuliers, là où il y a de l'information à prélever.

• *Le champ d'exploration* : La description du champ visuel qui vient d'être donnée est beaucoup trop restrictive. En effet, l'étendue du champ est "augmentée" par les déplacements des yeux et de la tête. Des travaux sur la coordination œil-tête montrent qu'une rotation de l'œil de plus de 30° - par rapport à sa position "de repos" - s'accompagne quasi systématiquement d'un mouvement de la tête (/MASSE, 76/ et /ROBINSON, 79/, cités dans /SIMON, 89/).

Concernant la perception "dynamique", HELLA /83/ introduit le terme de champ d'exploration qu'elle définit comme l'espace dans lequel l'oeil se déplace à la recherche d'information. Cette définition du champ d'exploration nous conduit naturellement à nous intéresser à la nature des mouvements oculaires.

IV.1.2 Les mouvements oculaires

Nous nous intéressons dans cette étude uniquement aux mouvements "macroscopiques" utilisés pour la recherche d'informations visuelles. Il s'agit des mouvements combinés des deux yeux, correspondant aux déplacements du regard. De plus, dans notre contexte d'étude, le champ d'exploration se limite le plus souvent à un plan : écran graphique, panneau synoptique, planche de bord, etc. Dans ces conditions, la convergence des deux yeux se maintient, sauf insuffisance propre à l'individu ou état de fatigue avancée.

Il existe deux types de mouvement du regard : les mouvements saccadiques et les mouvements continus /LEVY-SCHOEN, 69/ (le troisième type éventuel, les nystagmus, correspond à une combinaison des deux précédents).

• *Les saccades* : Il s'agit de mouvements rapides (jusqu'à 600°/s) permettant de déplacer volontairement le regard d'un point de fixation à un autre.

La saccade est le mouvement privilégié du processus d'exploration visuelle : l'œil effectue une succession de fixations (stations du regard) entrecoupées de saccades. Lors de l'exploration spontanée d'une image fixe (paysage par exemple), les saccades n'occupent que 15% du temps d'exploration, à la fréquence de 2 à 4 par seconde /JEANNEROD et al., 68/.

La saccade est également la réponse type à l'apparition d'un nouveau stimulus dans le champ visuel périphérique. Elle permet d'amener l'image de l'objet qui a attiré l'attention dans la région fovéale, là où l'acuité est maximale (réflexe de fixation /COEFFE, 85/).

Il faut noter que si la saccade est un mouvement volontaire, ses caractéristiques échappent totalement au contrôle de l'individu. Elle s'apparente à un mouvement balistique, dont seules importent les positions de départ et d'arrivée /LEVY-SCHOEN, 72, 82/ (ordre de grandeur : 60 ms pour une saccade de 20 degrés).

• *Les mouvements continus* : Une caractéristique essentielle des mouvements continus est qu'ils ne peuvent pas être obtenus par la seule volonté de l'individu. La présence d'un stimulus matériel "cible" est indispensable, d'où leur nom également de mouvements "de poursuite".

Il s'agit de mouvements lents, la vitesse maximale admissible de la cible étant de l'ordre de 25 à 30 degrés par seconde). Au delà, des saccades de correction viennent compenser l'erreur de traînage de l'oeil sur la cible.

Les mouvements de poursuite sont observés essentiellement lorsque l'individu a pour consigne de poursuivre une cible (tâche de pistage visuel ou manuel).

Dans une tâche d'exploration d'une planche de bord, d'un synoptique, d'une vue de conduite sur écran graphique, etc., le mouvement privilégié est donc la saccade. C'est pourquoi, dans ce qui suit, on focalise sur ce type de mouvement.

Des auteurs se sont intéressés au rôle exact des mouvements et des fixations oculaires dans la prise d'informations visuelles. Des études expérimentales ont révélé une augmentation importante du seuil perceptif au cours des saccades. On retrouve ce phénomène dans la littérature sous le nom de *suppression saccadique* (ZUBER & STARK, cités dans /JEANNEROD et al., 68/). LEVY-SCHOEN /72/ souligne que ce phénomène "d'occlusion visuelle" liée à la saccade est d'origine nerveuse, et non un effet physiologique lié au mouvement lui-même.

Ce phénomène de suppression saccadique fait que l'image perceptive se forme à partir d'une succession de fixations au cours desquelles l'information est recueillie et coordonnée. C'est pourquoi les travaux sur la perception visuelle en général focalisent sur les fixations oculaires, et plus précisément sur les facteurs influant leurs caractéristiques spatiales et temporelles ainsi que leur enchaînement.

IV.1.3 La vision centrale

Mise en garde : La zone dans laquelle les informations visuelles sont recueillies ne se résume pas au seul point de fixation /LEVY-SCHOEN, 83/. MACKWORTH /76/ utilise l'expression *champ utile de vision* pour désigner la zone autour du point de fixation dans laquelle de l'information est susceptible d'être traitée. Il faut en effet toujours garder en mémoire que la vison centrale - ou fovéale - correspond à une plage angulaire de l'ordre de 2 ou 3 degrés. De plus la vision périphérique, malgré son acuité moindre, n'en joue pas moins un rôle essentiel. Par exemple, pour percevoir une forme géométrique complexe, il se peut que le regard se pose à un endroit sans contenu, au centre de la forme, pour permettre une vision d'ensemble. Par conséquent, le point sur lequel se centre la vision fovéale n'est pas

nécessairement celui sur lequel se concentre l'attention. Ainsi ce qui est "vu" est bien plus que la succession des points de fixation /LEVY-SCHOEN, 76, 83/.

Concernant l'organisation temporelle des fixations, LEVY-SCHOEN /83/ souligne qu'il est aberrant de penser que la succession des points de fixation se superpose étroitement à l'organisation des opérations mentales. En effet, il existe toujours une part de "bruit" qui tend à noyer les régularités du comportement visuel.

Rôle perceptif des fixations : La durée des fixations est très variable. On observe typiquement des durées de l'ordre de 200 ms à 2 s. Des travaux expérimentaux ont été entrepris pour tenter de comprendre "ce qui se passe" au cours de la fixation.

Ainsi LOFTUS /81/ "simule" les fixations par un procédé tachistoscopique, ce qui lui permet de "maîtriser" expérimentalement - mais aussi artificiellement ! - leur nombre et leur durée. Il étudie ainsi la relation entre les caractéristiques des fixations et la reconnaissance d'images complexes. Ces dernières sont projetées pendant des durées allant de 50 à 400 ms. Un test de reconnaissance (oui/non) est ensuite réalisé. Les principaux résultats de ces travaux sont les suivants :

- Les performances obtenues pour une durée de 50 ms sont supérieures au hasard. Il semble donc qu'une reconnaissance peut apparaître à partir de cette valeur, même si 100 ms paraît un seuil plus "raisonnable".
- Le rôle d'une fixation est de réaliser le "codage" de certaines caractéristiques de l'image. Ce processus de codage ne peut pas être réparti sur plusieurs fixations.
- Plus le nombre de caractéristiques encodées est important, meilleure sera la performance en reconnaissance.

Les travaux de LOFTUS ne concernent que la reconnaissance d'images complexes. Ils expliquent néanmoins pourquoi, dans certaines situations, plusieurs fixations courtes sont plus efficaces, en termes de reconnaissance, qu'un nombre plus restreint de fixations longues.

Il existe des caractéristiques plus ou moins difficiles à encoder, ce qui se répercute sur la durée des fixations. Nous allons maintenant nous intéresser aux principaux facteurs influant justement sur la durée des fixations.

Principaux facteurs influant sur la durée des fixations : NEBOIT /80/ recense cinq principaux facteurs :

• *Nature de l'information prélevée* : La durée des fixations varie énormément selon qu'on "jette un coup d'œil" à une information binaire, qu'on identifie un symbole, qu'on estime la valeur d'une variable, ou qu'on estime la valeur plus la tendance d'une variable (/HARRIS, 86/, dans un contexte aéronautique, rapporte des valeurs comprises entre 100 ms et plus de 0,5 s).

• *Type de tâche* : La nature de la tâche, déterminée notamment par la consigne donnée aux individus, influe également sur la durée des fixations. Un exemple classique provient des travaux de MOLNAR /81/ qui a mis en évidence, dans le cadre de l'observation d'une œuvre d'art, des comportements exploratoires très différents - et des durées de fixation très variables - selon la consigne préalable donnée aux individus.

• *Difficulté d'identification* : Le contraste d'un objet graphique, par exemple, est un paramètre important pour son identification et donc pour la durée des fixations. C'est pourquoi le contraste, entre autres, fait l'objet de beaucoup d'attention lors de la conception des dispositifs de présentation de l'information, comme par exemple les tableaux de bord des automobiles /KIMURA et al., 90/.

• *Processus de traitement* : L'utilisation que l'on fait du "matériau visuel" prélevé en vision centrale influe également sur la durée des fixations. Par exemple, dans un contexte aéronautique, DICK /80/ a mis en évidence l'influence du déclenchement d'une action consécutive à la fixation d'un instrument sur la durée de cette fixation.

• *Familiarité du sujet* : Le comportement visuel évolue avec l'apprentissage et l'expérience, notamment au niveau des durées des fixations. Les exemples sont nombreux : conduite automobile /NEBOIT, 83//UNENA et al., 88/, pilotage d'aéronef /TOLE et al., 83/, examen de radiographie pulmonaire par des médecins /PAPIN et al., 83/, exploration visuelle de données numériques présentées sur écran cathodique /SPERANDIO et al., 83/, travail de saisie sur terminal informatique /GRAF et al., 87/, ... Les résultats expérimentaux paraissent parfois contradictoires, il faut donc éviter de les séparer de leur contexte. Généralement, la durée des fixations tend à décroître avec la familiarité, ce qui serait significatif d'une optimisation de la prise d'information /NEBOIT, 83/. Dans certains cas elle augmente : les "centrations" longues du regard facilitent la détection en vision périphérique et permettent ainsi de guider le regard vers les zones semblant les plus "informatives" /PAPIN et al., 83/.

En conclusion, on remarque que la durée des fixations n'est ni constante, ni aléatoire. En effet, l'exploration visuelle résulte de l'interaction de nombreux facteurs : propriétés physiques des stimulus, exigences de la tâche, activités cognitives, facteurs exogènes /NEBOIT, 80/. On comprend donc pourquoi le comportement oculaire - et notamment les caractéristiques des fixations - constitue un observable de choix pour analyser l'activité de l'opérateur.

IV.1.4 Le système perceptif périphérique

On a vu que la vision périphérique joue un rôle capital puisque c'est elle qui *guide la recherche d'informations locales* /LEVY-SCHOEN, 76/. En l'absence de renseignements issus de la vision périphérique, la prise d'information doit alors s'effectuer sur la base de la représentation mentale de l'opérateur, et donc parfois sur la base d'hypothèses erronées /HELLA, 83/.

De même que pour la durée des fixations, de nombreux facteurs influent sur l'étendue du champ périphérique. HELLA /83/ en recense trois groupes :

• *Facteurs liés aux stimulus* : Lorsque l'individu ne connaît pas a priori la localisation des signaux marginaux, la sélection des lieux de fixation va dépendre fortement des propriétés physiques des objets présents dans le champ visuel. On a évoqué précédemment le contraste, on peut citer également la taille de l'objet, sa forme, sa fréquence de clignotement éventuel, etc. /ACIER, 90/. La sémantique des objets joue également un rôle très important. Des travaux ont montré qu'un observateur fixe plus tôt, plus longtemps, et plus souvent les objets ayant une faible probabilité d'apparition dans la scène observée /LOFTUS & MACKWORTH, 78/. Autrement dit, un objet "informatif" sera détecté plus rapidement qu'un objet qui l'est moins, ce qui montre le rôle des activités cognitives sur la détection en périphérie.

• *Facteurs liés à la tâche* : La taille du champ visuel évolue en fonction des exigences perceptives et de la charge cognitive de la tâche "centrale". En effet, plus le contenu cognitif de la tâche est important, plus il nécessite une concentration de l'attention sur le travail et donc l'utilisation quasi-exclusive des propriétés de la vision centrale /HELLA, 83/. Des travaux expérimentaux ont montré que lorsque la charge "fovéale" augmente, les signaux périphériques s'apparentent à un "bruit visuel", et l'on observe une chute de la performance en détection périphérique. Les auteurs parlent alors de "rétrécissement du champ visuel fonctionnel" /VOSS, 81/ ou de "vision tunnel" /WILLIAMS, 85/. HELLA /83/ fait remarquer qu'on observe le même phénomène quelle que soit la nature de la tâche centrale (tâches très peu cognitives également), ce qui semble confirmer l'hypothèse d'un traitement du champ de vision de nature plutôt séquentielle, s'opérant de la fovéa vers la périphérie.

• *Facteurs liés au sujet* : Certaines pathologies sont bien entendu à l'origine d'un rétrécissement du champ périphérique. La fatigue, l'absorption d'alcool ou de drogues jouent également.

L'apprentissage, l'expérience ou la motivation sont également des facteurs importants. HELLA /83/ souligne que ces derniers peuvent avoir des effets inverses : une très forte motivation entraîne plutôt un comportement très sélectif, tandis qu'un entraînement assidu a plutôt comme conséquence une expansion du champ de vision.

Cette première partie a permis de décrire quelques caractéristiques essentielles du système visuel. Les rôles respectifs et complémentaires des visions fovéale et périphérique ont été décrits. Les travaux expérimentaux cités précédemment concernent le plus souvent la lecture d'images fixes. Nous allons maintenant nous intéresser au comportement visuel dans le contexte de la supervision de procédé.

IV.2 La prise d'information visuelle en supervision de procédé

Cette partie est consacrée à la prise d'information visuelle en supervision de procédé, à ses caractéristiques et aux facteurs l'influant. Nous emprunterons des résultats expérimentaux issus de domaines assez proches (du point de vue de la prise d'information), comme le pilotage d'aéronef aux instruments. Il existe en effet des points communs entre les deux domaines. Tout d'abord, le champ visuel de l'opérateur est relativement limité puisqu'il se résume essentiellement au dispositif de présentation de l'information : écran graphique d'une console de supervision ou planche de bord. Ensuite, contrairement à la partie précédente, le contenu des images est dynamique (variables d'état qui évoluent). Enfin, dans les deux cas la charge cognitive de l'opérateur est très variable : souvent faible lors des phases de surveillance pure (fonctionnement normal du procédé, vol sous contrôle du pilote automatique), elle peut devenir très élevée lors d'une défaillance de l'installation ou de l'appareil. D'autant plus qu'en pareil cas, lorsque le système de présentation des informations a mal été conçu, il peut s'ensuivre un "stress informationnel" difficile à surmonter pour l'opérateur.

Dans un premier temps, les facteurs influant la prise d'information visuelle sont analysés.

IV.2.1 Facteurs influant le comportement visuel

Rappelons que les mouvements privilégiés de l'exploration visuelle sont les saccades (§ IV.1.2). Autrement dit, l'opérateur qui scrute son écran de conduite, tout comme le pilote qui observe sa planche de bord, exécute une succession de saccades entrecoupées de fixations. Le phénomène de la suppression saccadique fait que l'information est prélevée pendant ces pauses du regard. Aussi ACIER /90/ s'est intéressé aux principaux facteurs influant la durée et le lieu des fixations.

• *Durée des fixations* : ACIER considère les cinq groupes de facteurs recensés par NEBOIT /80/ et déjà décrits au paragraphe IV.1.3 :

- *Type de tâche, processus de traitement et nature de l'information prélevée* : L'opérateur adapte son comportement cognitif en fonction de la phase de fonctionnement du procédé. Il modifie également sa "lecture" des informations en fonction de ce comportement (/ROUSE, 83//RASMUSSEN, 83/, § II.1). Le type de lecture d'une information (coup d'œil, lecture d'une valeur sur un vernier, estimation d'une tendance, ...) influe également sur la durée des fixations (/HARRIS et al., 86/, § IV.1.3). Il s'agit donc là de trois paramètres importants du comportement visuel de l'opérateur.

- *Difficulté d'identification* : La difficulté d'identification est relative aux qualités de la présentation de l'information. Elle peut être modifiée, suite à un aménagement ergonomique, mais peut être considérée constante au cours du travail de l'opérateur. ACIER /90/ précise qu'il en serait autrement dans un contexte aéronautique où les variations brusques de luminosité, les vibrations, ou encore les accélérations peuvent entraver la prise d'information.

- *Familiarité su sujet* : Dans l'absolu il s'agit d'un paramètre très important, mais également très difficile à prendre en compte. Aussi, dans la suite, considère-t-on que l'opérateur est un expert qui s'investit totalement dans son travail.

• *Lieu des fixations* : Le choix du lieu de fixation s'effectue essentiellement sur la base de la vision périphérique. ACIER reprend donc les trois groupes de facteurs retenus par HELLA /83/ et déjà décrits au paragraphe IV.1.4 :

- *Facteur sujet* : Comme précédemment, notre opérateur est considéré comme un expert.

- *Exigences de la tâche* : Elles jouent un rôle très important sur le comportement visuel. Par exemple, lorsque les exigences de la tâche centrale sont trop importantes, un rétrécissement du champ visuel fonctionnel peut survenir. Une conséquence peut être un "appauvrissement" de l'exploration visuelle, c'est à dire une focalisation de l'opérateur sur une portion restreinte de son espace visuel.

- *Caractéristiques des objets graphiques* : Elles sont prépondérantes pour la détection en vision périphérique et doivent donc être retenues parmi les facteurs influants.

A partir de cette analyse, ACIER /90/ propose une synthèse sous la forme d'un schéma général du comportement oculaire de l'opérateur de supervision sur écran graphique, figure I-12.

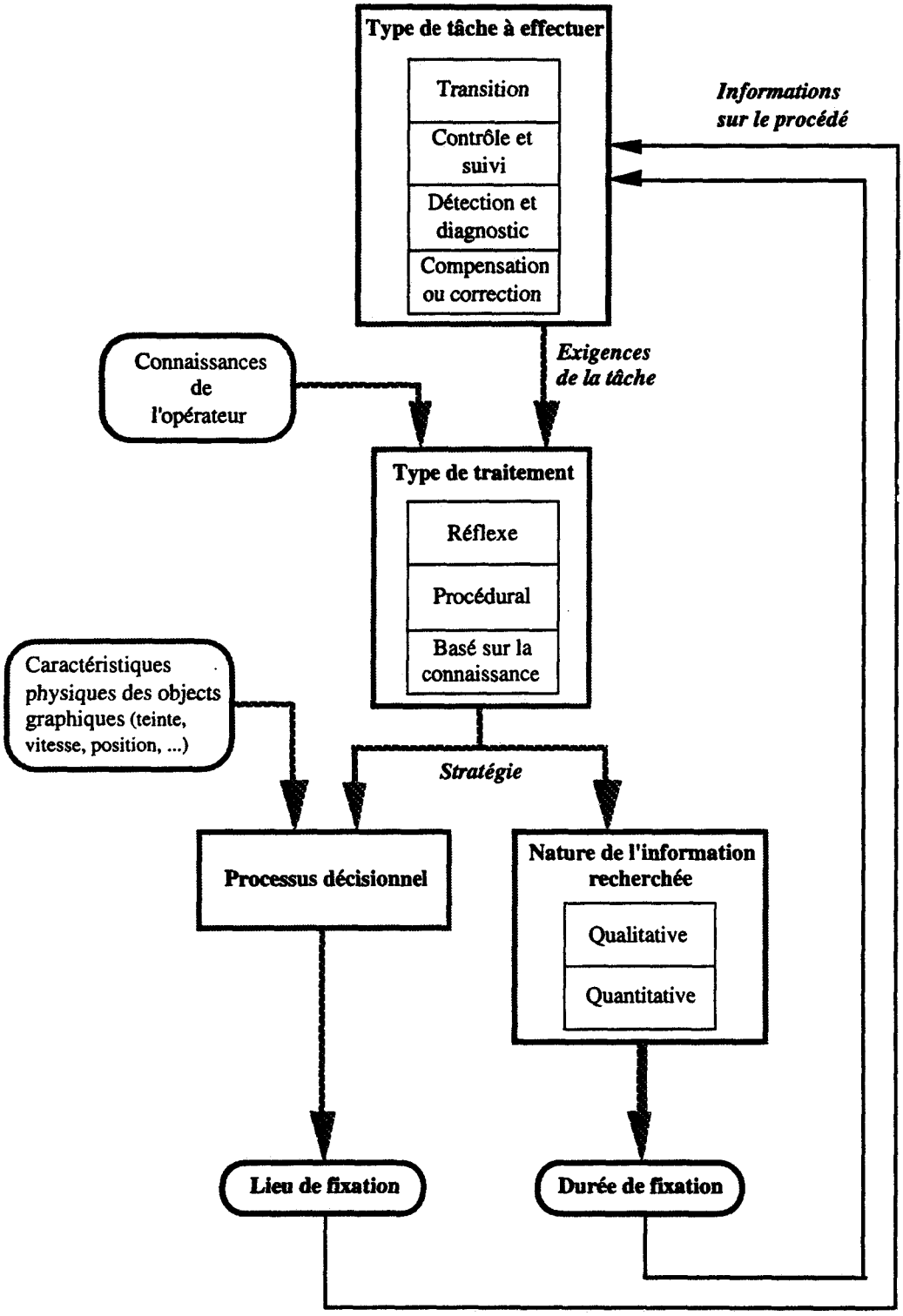


Figure I.12 : Schéma général du comportement oculaire d'un opérateur de supervision sur écran graphique /ACIER, 90/.

IV.2.2 Modèle du comportement oculaire

Le schéma général proposé précédemment s'apparente à un modèle "de connaissance". Il permet de faire la synthèse des principaux facteurs influant le comportement visuel de l'opérateur, mais il ne peut pas faire l'objet d'une simulation.

Des auteurs proposent des modèles quantitatifs de la prise d'information visuelle en supervision. Ces modèles décrivent généralement une situation où l'opérateur échantillonne plusieurs sources d'information bien distinctes (le cas "idéal" est une planche de bord "classique" d'aéronef, comportant des instruments électromécaniques). Ils sont plus ou moins évolués : certains décrivent uniquement les phases de surveillance pure, d'autres tiennent compte des actions de l'opérateur et leurs répercussions sur les variables. Les plus sophistiqués considèrent les aspects subjectifs de la lecture d'une variable, la "sémantique" des valeurs affichées, etc. /MORAY, 86/.

ACIER /90/ classe les principaux modèles dans quatre grandes familles :

- Les modèles "déductifs" : ils se basent sur le "bon sens" et un raisonnement intuitif. Une structure hypothétique est proposée, puis éprouvée par des expérimentations.
- Les modèles basés sur la théorie de l'information : le système visuel est considéré comme un échantillonneur qui doit, à partir de ses prises d'information successives, reconstruire des signaux (il doit donc répondre au critère de Shannon).
- Les modèles probabilistes : l'idée de base est la suivante : à défaut de disposer de règles déterministes, on tente d'extraire des règles statistiques du comportement oculaire (probabilité de transition entre les objets graphiques).
- Les modèles fonctionnels : ces modèles font appel à des outils usités en Automatique, particulièrement les théories du contrôle optimal et des files d'attente.

Bon nombre d'auteurs s'accordent pour dire que les modèles à base de files d'attente sont particulièrement adaptés pour décrire le comportement oculaire d'un opérateur de supervision /HER et al., 89//LEERMAKERS, 91/.

Dans une telle approche, on considère le canal visuel de l'opérateur comme un serveur, les clients étant constitués des différentes "zones d'information" contenues dans l'écran, la planche de bord, etc. La figure I-13 fournit une description d'une telle structure :

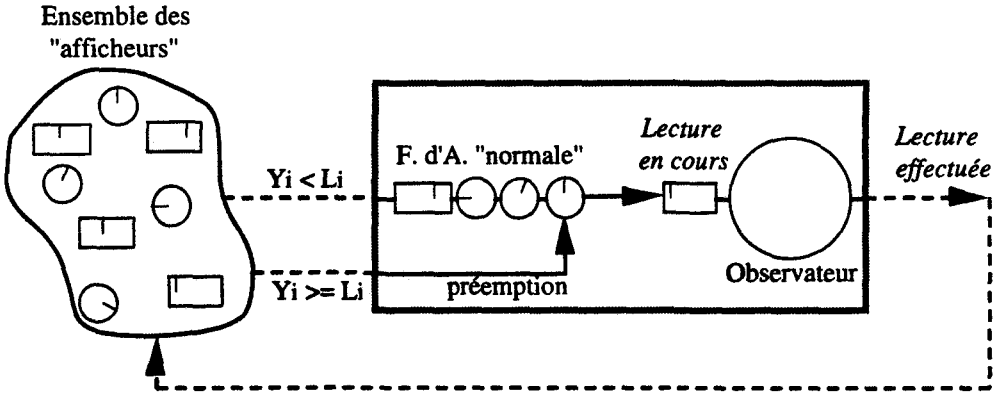


Figure I.13 : Schéma de principe d'un modèle du comportement oculaire à base de file d'attente.

Les travaux sur ce type de modèle ont été initiés par CARBONELL /66/, dans un contexte de pilotage d'avion. Le modèle initial proposé par l'auteur est basé sur une série d'hypothèses dont l'idée directrice est la suivante : avant de prendre la décision de consulter un instrument particulier, l'opérateur essaie de minimiser le risque de ne pas consulter les autres. Ce risque provient de la probabilité de "manquer" une variable en défaut, ce qui peut conduire à des conséquences catastrophiques (surtout dans un contexte aéronautique). Pour cela, un coût est associé à chaque instrument en fonction de son rôle et de son importance dans le système. On obtient donc un côut total, c'est à dire correspondant à la consultation d'aucun instrument :

$$C(t) = \sum_{i=1}^{N} \frac{C_i.P_i(t)}{1 - P_i(t)}$$

où N est le nombre total d'instruments, Ci le coût associé à un dépassement de seuil pour l'instrument i (coût variable suivant la phase du vol) et Pi(t) la probabilité pour que la variable de l'instrument i (Yi) dépasse un seuil (Li).

Le coût total relatif à la consultation d'un instrument j à l'instant t est donc $C'_j(t) = C(t) - C_j.P_j(t)$. La stratégie supposée de l'opérateur consiste donc, avant toute consultation à l'instant t, de sélectionner l'instrument j qui minimise le coût $C'_j(t)$ i.e. qui maximise le terme $C_j.P_j(t)$. La probabilité $P_j(t)$ dépend de l'estimateur interne de l'opérateur concernant la dynamique de la variable j.

Le modèle de CARBONELL a été validé /CARBONELL et al., 68/ et a bénéficié de nombreuses améliorations et de nombreux développements /ACIER, 90//LEERMAKERS, 91/.

Cette approche utilisant les files d'attente a fait également l'objet de travaux concernant la charge de travail de l'opérateur (on peut faire un parallèle entre la consultation d'un instrument et l'exécution d'une tâche). Elle a notamment été utilisée pour étudier le problème de la répartition de tâches entre l'opérateur et la machine /ROUSE, 77//TULGA & SHERIDAN, 80//HER et al., 89/.

Concernant l'estimation de la charge de travail mental, il existe une approche "modèle" et une approche "mesure" (voir § III.3). Il en est de même du comportement oculaire de l'opérateur. Aussi, après cette description sommaire des travaux de CARBONELL, nous allons évoquer quelques travaux "de terrain", c'est à dire ayant recours à l'enregistrement des mouvements oculaires de l'opérateur.

IV.3 Quelques exemples d'utilisation de l'oculométrie pour l'étude des systèmes hommes-machines

De nombreux auteurs s'accordent pour dire que l'enregistrement des mouvements oculaires de l'opérateur en situation de travail constitue un "observable" précieux pour toutes les tâches impliquant un traitement massif d'informations visuelles. En effet, l'activité oculaire, et plus particulièrement la succession des "points de fixation", est le reflet d'un travail perceptif de l'opérateur et donc d'une certaine part de son travail mental /SANTUCCI, 87/. Cette partie décrit très brièvement quelques applications de l'oculométrie concernant l'étude des systèmes hommes-machines.

IV.3.1 Travaux centrés sur l'opérateur

Les modèles cognitifs existants sont souvent trop génériques ou trop spécifiques pour être utilisables par le concepteur d'un système homme-machine quelconque. Une analyse de l'activité de l'opérateur, dans le cadre d'un système homme-machine mettant en œuvre un procédé similaire à celui du système à concevoir, permet de proposer un modèle réellement "utilisable" /BERGER, 92/. BERGER a ainsi étudié le comportement cognitif de l'opérateur de supervision de la chaufferie d'un sous-marin nucléaire (opérateur "Kr"). Les résultats expérimentaux mettent en évidence de grosses différences entre cet opérateur et celui chargé de la conduite d'un procédé à commande centralisée, "prototypé" par le modèle qualitatif de RASMUSSEN. En effet, l'opérateur Kr semble traiter les indicateurs de son pupitre au moyen "d'images", i.e. il identifie l'état du procédé à partir d'une "reconnaissance de formes". Ce type de résultat est naturellement très intéressant pour les concepteurs des futurs systèmes hommes-machines.

ABED /90/ a étudié le travail des contrôleurs de la navigation aérienne. Dans une phase "descendante" de conception, il s'attache à décrire la tâche "prescrite" des contrôleurs, en utilisant des outils de spécification (méthode SADT et réseaux de Petri). Dans une phase "ascendante" d'évaluation, l'activité réelle des contrôleurs (ou la tâche "effective") est déduite à partir d'informations objectives (activités manuelle et oculaire, communications orales) et subjectives (verbalisation des opérateurs en "auto-confrontation", c'est à dire en différé avec la participation active des contrôleurs et en s'appuyant sur des enregistrements vidéo de leur activité). En effet, les stratégies visuelles d'un expert sont généralement très automatisées (c'est le cas notamment en Aéronautique /TOLE, 83/) et, surtout, en grande partie inconscientes. Inférer les activités mentales d'un opérateur à partir de la trace observable que constitue son activité oculaire est donc extrêmement périlleux /VIVIANI, 90/. La participation active de l'expert est donc indispensable : on lui demande de commenter, de justifier son comportement, pour tenter de "remonter" avec lui aux opérations mentales qui ont guidé sa prise d'information /GALLOUIN, 88/. De tels travaux débouchent sur un double résultat. Tout d'abord, l'analyse de "l'écart" entre la tâche prescrite et la tâche effective permet une évaluation de l'interface de dialogue, notamment au niveau des besoins informationnels des contrôleurs. Ensuite le modèle "a priori", une fois enrichi, fournit une description quasi-exhaustive des activités tant physiques que mentales des contrôleurs.

Une autre application de "l'extraction de connaissance" d'un opérateur est l'apprentissage des "élèves" opérateurs. A ce sujet, LEVY SCHOEN /83/ fait remarquer qu'inculquer directement à un opérateur des "circuits visuels" parait voué à l'échec dans la plupart des cas. Autrement dit, il est plus judicieux de faire en sorte que l'opérateur développe une "représentation mentale" correcte, plutôt que de lui imposer "brutalement" des trajets oculaires. PAPIN /89/ a réalisé des expérimentations dans le domaine du diagnostic radiologique. Il montre qu'il est possible d'apporter aux élèves des éléments sur le "bon savoir-faire", éléments issus d'une analyse objective de l'activité de radiologues confirmés.

Quelle que soit la tâche considérée, il semble exister un comportement visuel optimal. D'autre part, il apparaît que ce comportement s'acquiert de façon informelle, au cours de l'apprentissage /PAPIN, 82/. Il semble donc particulièrement intéressant de suivre le comportement oculaire des opérateurs en cours de formation pour tenter de le faire converger vers celui des experts. Certaines caractéristiques de l'activité oculaire peuvent également être prises en compte parmi les critères de fin d'apprentissage. Les exemples de travaux sont nombreux et concernent des domaines très divers : pilotage d'aéronefs /PAPIN, 82//SPADY, et al., 83//HARRIS et al., 86/, conduite automobile /NEBOIT, 80/, travail sur terminal informatique /NEBOIT, 83//SPERANDIO et al., 83//GRAF et al., 87/, ...

IV.3.2 Travaux centrés sur l'évaluation ergonomique des supports d'information

De nombreux travaux sont consacrés à l'évaluation des planches de bord d'aéronefs. Les premiers ont été entrepris à la fin des années 40, au sein de l'US Air Force, par FITTS, JONES et MILTON (cités dans /MORAY, 86/). Ces travaux ont notamment conduit à la proposition d'une disposition "optimisée" des instruments sur la planche de bord, disposition communément appelée "en T" et encore utilisée de nos jours pour les planches de bord "classiques". Des travaux plus récents sont consacrés à la comparaison entre des instruments traditionnels, de type électromécanique, et de nouveaux systèmes de présentation plus synthétiques, sur écrans cathodiques /HARRIS, 82//ITOH, 90/. Concernant ces derniers dispositifs, une phase préalable d'analyse de l'activité du pilote a généralement été nécessaire pour déterminer les informations utiles en fonction des différentes phases du vol /NAUREILS, 79/.

Des travaux similaires ont été entrepris dans le domaine de l'automobile, pour les tableaux de bord. Des travaux plus récents visent à étudier la répercussion d'une tâche "ajoutée", telle que celle engendrée par l'utilisation d'un radiotéléphone ou encore d'un système d'aide à la navigation, sur la tâche primaire du conducteur qui demeure le guidage du véhicule. Ainsi, HELLA /87/ a cherché à évaluer le temps nécessaire à la lecture d'une information sur un afficheur disposé à plusieurs endroits dans l'habitacle, et ceci en fonction

des conditions de circulation. RIERA /93/ s'est lui intéressé à la composition d'un numéro sur un clavier de type téléphone. Dans les deux cas, les auteurs mentionnent des différences interindividuelles élevées, liées semble-t-il, à la perception individuelle du risque encouru.

Concernant l'évaluation des postes de travail, ACIER /90/ a étudié la prise d'information d'un opérateur de supervision (le procédé simulé lors des expérimentations s'apparente à un réacteur nucléaire à refroidissement au sodium). Il étudie notamment l'influence du mode de présentation des variables sur la "lecture" de la vue de conduite. Il a observé, par exemple, qu'une vue "barre-graphe" semble provoquer une lecture suivant la "syntaxe" des objets, i.e. leur disposition à l'écran, contrairement à la vue "cadran" où la lecture s'effectue suivant leur "sémantique", i.e. la signification des variables vis à vis du fonctionnement du procédé.

Ces quelques travaux montrent l'intérêt certain de l'oculométrie dans l'étude des systèmes hommes-machines. Cette technique permet notamment d'objectiver certaines grandeurs par ailleurs inaccessibles, concernant l'utilisation des informations présentées à l'opérateur.

IV. CONCLUSION

Ce premier chapitre est consacré à deux aspects essentiels du travail d'un opérateur de supervision : la prise d'information visuelle, ainsi que le "côut" associé au traitement de cette information i.e. la charge de travail mental.

La première partie du chapitre a décrit la place et le rôle de l'opérateur de supervision dans l'architecture typique d'un procédé automatisé complexe. Puis la réflexion sur la conception d'un tel système homme-machine a débouché sur la conclusion qu'une phase d'évaluation est indispensable afin de s'assurer que l'opérateur a été intégré correctement dans le système technologique. Dans l'optique d'une telle évaluation, l'intérêt d'estimer la charge de travail de l'opérateur et d'enregistrer ses mouvements oculaires a été mis en évidence.

La seconde partie débute par une description des principaux facteurs influant la charge de travail mental, pour ensuite souligner l'intérêt d'estimer non seulement la charge globale, mais aussi la charge instantanée. L'analyse critique des principales méthodes d'estimation de la charge débouche sur le constat qu'aucune n'est idéale, et surtout qu'aucune n'est réellemnt apte à évaluer la charge de travail instantanée. La seule exception concerne la méthode temporelle qui, parmi ses contraintes de mise en oeuvre, impose de connaître à chaque instant la tâche en cours de traitement. L'activité de l'opérateur étant essentiellement cognitive et de moins en moins manuelle, sa seule trace directement observable provient de l'enregistrement de l'activité oculaire. Laquelle constitue le thème de la troisième partie.

La troisième partie débute par une description du capteur "œil" au repos et en action. Les principaux "mécanismes" de la perception visuelle son rappelés, en mettant l'accent sur les spécificités rencontrées lors de la supervision d'un procédé. La dernière partie évoque quelques travaux utilisant l'enregistrement des mouvements oculaires pour étudier l'interaction homme-machine. Certains focalisent sur le travail de l'opérateur, d'autres sur l'évaluation des dispositifs de présentation de l'information.

En conclusion, la charge de travail instantanée est un paramètre jugé important pour l'évaluation des systèmes hommes-machines, mais difficile à définir et encore plus à estimer. L'analyse du comportement oculaire de l'opérateur semble pouvoir contribuer à une telle estimation. Le second chapitre contient donc une revue des principaux travaux consacrés à l'étude du comportement visuel de l'opérateur en fonction de la difficulté de sa tâche ou de sa charge de travail.

CHAPITRE II : INFLUENCE DE LA CHARGE DE TRAVAIL SUR LA PERCEPTION VISUELLE ET SUR L'ACTIVITÉ OCULAIRE

I. INTRODUCTION

II. INDICES PHYSIOLOGIQUES

III. INDICES LIÉS AUX CARACTÉRISTIQUES DES SACCADES OCULAIRES

IV. INDICES LIÉS AUX CARACTÉRISTIQUES DES FIXATIONS OCULAIRES

V. INDICES LIÉS AUX STRATÉGIES VISUELLES

VI. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

I. INTRODUCTION

Les mouvements oculaires de l'opérateur sont liés à la répartition de son attention dans l'espace visuel de travail. Leur enregistrement et leur analyse permet donc de sa faire une idée du travail perceptif de l'opérateur, et donc d'une certaine part de son travail mental /SANTUCCI, 87/.

De nombreux auteurs soulignent une stabilité relative du comportement visuel en "régime permanent". En effet, la prise d'information visuelle dépend fortement des modes opératoires adoptés par l'opérateur. Aussi, lorsque ces derniers sont clairement identifiés et stables, il semble normal de retrouver également certaines régularités dans le comportement visuel.

Néanmoins, SPERANDIO /72,77,88/ décrit des situations où l'opérateur "régule" ces modes opératoires en fonction de sa charge de travail. L'analyse de la prise d'information doit pouvoir mettre au jour cette "régulation", et donc indirectement renseigner sur l'état de charge de l'opérateur. De plus, indépendamment des modes opératoires, il existe des modifications "physiologiques" du système visuel consécutives à une augmentation de la charge mentale. On peut citer comme exemples le rétrécissement du champ visuel ("vision tunnel", déjà mentionnée dans le premier chapitre, au paragraphe IV.1.4 /HELLA, 83/) ou l'augmentation du diamètre pupillaire /BEATTY, 81/.

Autrement dit, il existe manifestement, au niveau du système visuel et de son fonctionnement, des symptômes d'un niveau de charge de travail élevé (comme il existe des symptômes d'hypo-vigilance). C'est pourquoi l'enregistrement et l'analyse des mouvements oculaires sont considérés par certains auteurs comme une technique riche d'avenir, permettant d'étudier l'opérateur au travail, et également susceptible de permettre une estimation de son état de charge /SANTUCCI, 87/. Une telle technique semble particulièrement adaptée au contexte de la supervision de procédé, où l'opérateur occupe la plupart de son temps à observer la situation courante, en échantillonnant plusieurs sources d'informations, et effectue peu d'actions manuelles, souvent par intermittence /MORAY et al., 89/.

Les travaux consacrés à l'estimation de la charge mentale à partir de l'analyse des mouvements oculaires sont difficiles à classer dans l'une des grandes familles de méthodes objectives mentionnées dans le premier chapitre. En effet, certains travaux concernent les aspects physiologiques des mouvements oculaires (caractéristiques cinématiques des saccades oculaires, par exemple), d'autres décrivent des techniques qui s'apparentent à une méthode de la double tâche (mesure du "visual free time" /WIERWILLE, 79/, tâche ajoutée de détection en vision périphérique /VOSS, 81/, etc.), certains enfin concernent la "méthode" de la variation des modes opératoires mentionnée précédemment. C'est pourquoi, comme STASSEN /90/, nous classons dans une "famille" distincte l'analyse des mouvements oculaires comme technique potentielle d'estimation de la charge de travail.

Aussi ce second chapitre comprend-t-il cinq parties, les quatre premières étant consacrées chacune à une famille d'indices :

1) les indices physiologiques ;
2) les indices liés aux caractéristiques des saccades oculaires ;
3) les indices liés au rôle perceptif des fixations oculaires ;
4) les indices liés à l'organisation de la prise d'information, c'est à dire aux "stratégies visuelles".

La cinquième partie constitue une synthèse critique des différents travaux vis à vis de notre contexte d'étude, i.e. la supervision de procédé.

II. INDICES PHYSIOLOGIQUES

Remarque préliminaire : Nous avons inclus, dans ce chapitre consacré aux mouvements oculaires, certains indices physiologiques issus du système visuel. La raison en est la suivante : comme le souligne HART /86/, l'instrumentation mise en oeuvre pour enregistrer les mouvements oculaires permet parfois de recueillir très simplement de tels indices. Par exemple, les capteurs basés sur la technique du vecteur cornéen fournissent généralement le diamètre pupillaire, les techniques électro-oculographiques permettent, elles, de détecter facilement les battements de paupières, etc.

Une brève description est maintenant donnée concernant les quelques indices qui nous ont paru particulièrement intéressants, car relativement "réalistes" de mise en oeuvre. Il s'agit des indices suivants :

- le diamètre pupillaire ;
- les clignements palpébraux ;
- la taille du champ visuel fonctionnel.

II.1 Diamètre pupillaire

La pupille est le diaphragme qui perce l'iris en son centre. Son rôle est de maintenir une ambiance lumineuse idoine à la surface de la rétine, tout en la protégeant des surintensités lumineuses (réflexe pupillaire).

La surface de la pupille est donc conditionnée avant tout par l'ambiance lumineuse. Cependant les émotions de l'individu, son état d'attention, ou l'intensité de son activité mentale sont autant de facteurs qui influent également. En fait, la mesure du diamètre pupillaire fournit une indication sur les fluctuations momentanées de l'excitation du système nerveux central /BEATTY, 81/.

Ainsi, on observe généralement une mydriase (dilatation de la pupille) au fur et à mesure que la charge de travail augmente. Si la difficulté de la tâche devient trop importante (surcharge de l'individu), une constriction brusque peut se produire /SANTUCCI, 87/.

BEATTY /77, 81/ fournit quelques exemples de contextes expérimentaux favorables au diamètre pupillaire en tant qu'indicateur de charge mentale :

- Opération perceptive : détection d'un signal de très faible amplitude (proche du seuil de perception), qu'il soit visuel ou auditif.
- Prise de décision : par exemple, classement de plusieurs stimulus auditifs par rapport à un son de référence.
- Sollicitation de la mémoire à court terme : mémorisation immédiate d'un numéro de téléphone, par exemple.
- Résolution de problème, opérations arithmétiques complexes.

Dans tous les cas, on observe une dilatation de la pupille qui débute avec la présentation des stimulus, et qui dure le temps de l'élaboration de la solution. Cette dilatation est naturellement soumise à un seuil, et peut être maintenue jusqu'à ce que la solution soit trouvée et la réponse annoncée verbalement. BEATTY précise que la dilatation est d'autant plus grande que le "problème à résoudre" est complexe. Il précise également que la saturation du diamètre pupillaire coïncide, pour les tâches faisant appel à la mémoire, avec la capacité de la mémoire à court terme (i.e. de l'ordre de sept "items"). Enfin, l'auteur souligne que l'effet observé est de faible amplitude (de l'ordre de 0,5 mm pour la mémorisation de 7 digits !), mais significatif et "fiable".

Suite à ces quelques résultats expérimentaux, BEATTY suggère quelques exemples d'application concernant l'évaluation ergonomique des systèmes hommes-machines, et plus particulièrement l'évaluation des interfaces de dialogue. Concernant le "canal auditif", il

envisage l'utilisation du diamètre pupillaire pour évaluer l'effort de reconnaissance d'une synthèse vocale (estimation de l'effort de compréhension en fonction du niveau d'intelligibilité des messages). Concernant la "modalité visuelle", il propose d'utiliser le diamètre pupillaire comme indicateur de la lisibilité des informations affichées sur une planche de bord, un synoptique, ...

KREBS et al. /77/ ont réalisé des expérimentations sur simulateur d'avion commercial. La tâche consistait en une approche et un atterrissage aux instruments, la difficulté étant fixée par le niveau de turbulence ainsi que les caractéristiques de stabilité de l'appareil. Les auteurs obtiennent une bonne corrélation entre le diamètre pupillaire et les évaluations subjectives de charge, réalisées au moyen d'échelles de Cooper-Harper. Les auteurs précisent, suite à une analyse détaillée des données, qu'il ne s'agit pas là du "vrai" diamètre pupillaire, mais du diamètre "pondéré" par les mouvements oculaires du pilote explorant sa planche de bord (En effet, pour des raisons d'instrumentation, le diamètre pupillaire varie en fonction de la direction du regard du pilote). Les auteurs rapportent des différences significatives essentiellement au cours d'un même scénario, c'est à dire en fonction de la phase du vol, et très peu entre les scénarios de difficultés globales différentes. Ils soulignent eux aussi que le phénomène observé est de très faible amplitude (2 à 4 %), mais systématique dans son sens d'évolution.

Le diamètre pupillaire constitue une technique très délicate à mettre en oeuvre. Dans le domaine aéronautique, les grandes variations de luminosité ainsi que les accélérations éventuelles (surtout dans les avions de combat) la rendent inexploitable /SANTUCCI, 87/. La fatigue, en rendant les paupières "lourdes", entrave également la mesure du diamètre pupillaire. Enfin, inconvénient majeur, la relation liant le diamètre pupillaire à la charge de travail n'est pas monotone, ce qui rend tout diagnostic très délicat /WIERWILLE et al., 85/. Néanmoins, HART /86/ souligne qu'il s'agit d'un indice intéressant de par sa sensibilité "naturelle" aux variations momentanées de charge de travail, d'autant plus qu'il est facile à recueillir "en ligne". L'obligation de maîtriser l'ambiance lumineuse cantonne néanmoins cette technique à des expérimentations de laboratoire.

II.2 Clignements palpébraux

Les clignements de paupières peuvent être recueillis au moyen d'électrodes périorbitaires (techniques EOG), les mêmes électrodes pouvant servir au recueil des mouvements oculaires.

Des travaux ont été consacrés à la fréquence des battements de paupière, à leur durée, ainsi qu'à leur "timing" /HART, 86/. Ainsi, dans leurs expérimentations sur simulateur de vol, KREBS et al. /77/ indiquent que la fréquence des "clignements d'yeux" du pilote a tendance à diminuer lorsque la difficulté du vol augmente. Ils précisent que les différences observées sont très faibles. Ceci est probablement dû à la grande variabilité de la fréquence des battements de paupière /O'DONNEL et al., 86/. Cette dernière est néanmoins un bon indicateur d'une attention soutenue, lorsque l'information est d'origine visuelle /WIERWILLE, 79/.

Les durée de fermeture des paupières ainsi que les "blink patterns" semblent eux rendre compte fidèlement de "l'effet du temps" sur l'individu effectuant sa tâche, et donc refléter indirectement le niveau de charge /O'DONNEL et al., 86/. Si l'on s'en tient aux définitions complémentaires de la "fatigue" et de la "charge de travail" données par SPERANDIO /91/ (premier chapitre, § III.3.1), il s'agit donc là plutôt d'indicateurs de l'état de fatigue, consécutif - et non synchrone - à l'exécution du travail.

II.3 Variation de la taille du champ visuel fonctionnel

La charge, tant cognitive que perceptive, de la tâche fovéale (i.e. qui sollicite la vision centrale) est susceptible de faire varier la taille du champ visuel "fonctionnel" instantané

/HELLA, 83/. Rappelons que le champ "fonctionnel" /SANDERS, 70/ - ou "utile" /MACKWORTH, 76/ - est défini comme la zone de l'espace visuel appréhendée à chaque fixation.

HELLA met en garde contre un tel phénomène : "... si une bonne vision centrale est souvent suffisante pour un grand nombre de tâches, il ne faut pas oublier que la mobilisation de cette partie de la rétine est susceptible de se faire au détriment de tout ou partie de l'espace qui se projette sur la rétine moyenne et périphérique, soit les 9/10ème du champ de vision".

De nombreux travaux expérimentaux ont été consacrés à ce rétrécissement du champ visuel fonctionnel, phénomène souvent désigné dans la littérature par "vision tubulaire" ou "effet tunnel". Nous allons décrire brièvement ceux de WILLIAMS /85/ :

La tâche "fovéale" consiste en une tâche de reconnaissance de caractère (lettre majuscule). La difficulté dépend du nombre de choix possibles : 6 pour le niveau de difficulté élevé, 2 pour le niveau faible. La tâche "périphérique" consiste à détecter la présence ainsi que l'orientation d'un petit trait, affiché à droite ou à gauche de la lettre cible. Les deux symboles sont projetés au moyen d'un tachistoscope. Au repos, les sujets fixent un petit point noir affiché au centre de l'écran de visualisation, là où est projeté le caractère cible.

La taille du champ visuel fonctionnel est "définie" par un taux de détection périphérique de 50%. La figure II.1, ci-dessous, montre les résultats obtenus par WILLIAMS. Elle montre qu'entre les deux niveaux de difficulté, i.e. de charge, le champ visuel (au sens du critère des 50% de détection) chute de 9 à 5 degrés. L'auteur interprète ce résultat en termes "d'effet tunnel", consécutif à l'augmentation de la "charge fovéale".

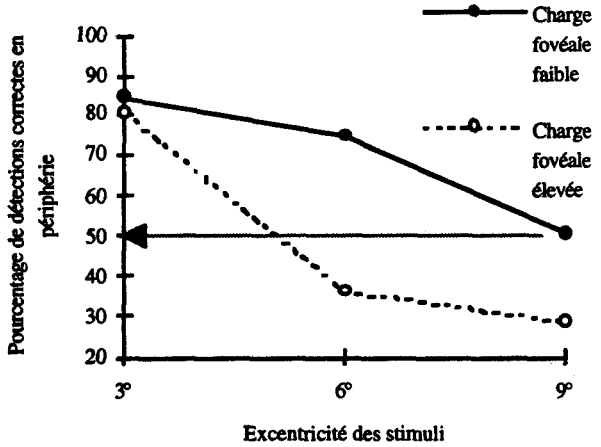


Figure II.1 : Pourcentage de détection périphérique en fonction de l'excentricité des stimuli (déviation angulaire par rapport au point central de l'écran) et de la difficulté de la tâche centrale.

Des travaux ont été consacrés à l'utilisation potentielle de cet effet tunnel comme indicateur de charge de travail mental. VOSS /81/ procède de la manière suivante :

Le sujet effectue normalement sa tâche primaire, ou tâche "centrale". Il porte des montures de lunettes sur lesquelles sont fixées deux diodes électro-luminescentes, côtés temporaux. La tâche "périphérique" consiste en la détection de stimuli lumineux, apparaissant aléatoirement, sur l'une des deux diodes. Les stimuli durent 300 ms, leur angle de présentation étant de l'ordre de 45 degrés. Une phase "d'étalonnage" consiste à ajuster l'intensité des deux diodes afin d'obtenir "à charge nulle", i.e. au repos, un taux de détection légèrement inférieur à 100%.

VOSS propose d'évaluer par cette "technique" le rétrécissement du champ visuel fonctionnel de l'opérateur au travail, et donc indirectement sa charge mentale.

L'auteur se pose néanmoins le problème de la détermination de l'angle de présentation des stimuli lumineux (fixé a priori a 45 degrés). Il souligne que si une seule valeur est utilisée, il est alors impossible de déterminer si une chute de performance en détection est consécutive à un effet tunnel, ou symptomatique d'une chute générale des performances du système visuel.

VOSS en conclut qu'il paraît plus réaliste d'utiliser son dispositif expérimental pour mettre en oeuvre une méthode de la double tâche, la tâche ajoutée étant la détection des stimuli lumineux. Cette technique s'apparente plus à une mesure du "visual free time", lié aux capacités de réserve de l'individu /WIERWILLE, 79/, qu'à une estimation proprement dite de la charge de travail via le rétrécissement du champ visuel fonctionnel. L'auteur cite comme avantages une faible perturbation ainsi qu'une bonne discrimination des différents niveaux d'exigence, dans des situations variées : tâches primaires de détection, de conduite automobile sur simulateur ou en trafic réel, ...

II.4 Autres indices

Parmi les indices physiologiques souvent cités, on trouve également la fréquence critique de fusion (FCF).

L'allumage-extinction périodique d'une lampe, par exemple, provoque une sensation de papillotement. Lorsque la fréquence d'allumage-extinction atteint un certain seuil, la source lumineuse est perçue comme continue : la FCF est atteinte (les papillotements apparaissent aux environs de 15 éclairs/seconde, pour devenir imperceptibles à partir de 40 éclairs/seconde, ordre de grandeur de la FCF).

Des travaux expérimentaux ont montré une corrélation entre la charge de travail et les variations de la FCF /SANTUCCI, 87/. FRANCOIS /85/ fournit une synthèse de travaux consacrés à cet indice. Il rapporte des résultats très variables, fonction du type de tâche et de la méthodologie employée. Il en conclut que la FCF semble mesurer à la fois "l'excitation nerveuse engendrée par la tâche" (notion proche de celle de charge de travail) et la baisse d'excitation consécutive à la fatigue.

Il s'agit donc d'un indice délicat à mettre en oeuvre. De plus, il paraît difficile de l'intégrer de manière transparente au travail de l'opérateur.

Parmi les indices de charge issus du système visuel, on trouve encore la mesure du recul du ponctum proximum d'accommodation ou de convergence, la mesure des oscillations des mouvements de convergence, l'enregistrement des potentiels visuels évoqués, etc. Ces indices ne sont pas détaillés ici, car peu "réalistes" dans notre contexte.

III. INDICES LIÉS AUX CARACTÉRISTIQUES DES SACCADES OCULAIRES

Dans le premier chapitre, le paragraphe IV.1.2 est consacré aux saccades oculaires, mouvements privilégiés de l'exploration visuelle. Des auteurs ont étudié les caractéristiques de ces saccades, en vue d'en extraire des indices de charge mentale. Ces indices concernent les caractéristiques purement cinématiques du mouvement, abstraction faite du contenu du champ visuel. Ils ont donc l'avantage de nécessiter une instrumentation "simplifiée", puisque les mouvements du regard par rapport à la tête suffisent (on s'affranchit de la mesure des mouvements de tête par rapport au champ).

Les indices les plus fréquemment étudiés sont :

- la latence du système saccadique (saccades provoquées) ;
- la vitesse des saccades ;
- leur amplitude ;
- leur fréquence.

Quelques résultats expérimentaux sont maintenant donnés concernant ces différents indices. Mais avant, quelques précisions s'imposent concernant la mesure des mouvements oculaires ainsi que la terminologie employée.

III.1 Acquisition et codage des données oculométriques

Dans le premier chapitre (§ IV.1.2), l'exploration oculaire est décrite sous la forme d'une succession de saccades et de fixations. Autrement dit, la saccade peut être définie comme le "bond" du regard séparant deux fixations consécutives.

La figure II.2 décrit les différentes étapes du recueil de l'activité oculaire :

1) La courbe n° 1 présente un exemple de trajet oculaire. On peut y noter la présence de quatre "pauses du regard", ou fixations.

2) Un capteur oculométrique fournit généralement deux signaux échantillonnés (60 Hz dans notre cas), correspondant aux déviations angulaires du regard en X et en Y. La courbe n° 2 fournit le signal Y correspondant à notre exemple. On constate qu'une fixation oculaire ne correspond pas à une immobilité parfaite de l'œil. En effet, ce dernier est animé de micro-mouvements "physiologiques", auxquels s'ajoutent les bruits de mesure inhérents au capteur.

3) A partir de tels signaux X-Y, il est possible d'identifier les fixations par des critères spatio-temporels /ACIER, 90/ :
- critère spatial : il permet de délimiter le "nuage de points" correspondant à chaque fixation ;
- critère temporel : on considère généralement qu'une fixation correspond à une station du regard d'au moins 100 ms.
La courbe n° 3 présente les quatre fixations extraites dans notre exemple. Chacune est caractérisée par ses coordonnées (barycentre du nuage de points) et sa durée.

4) La dernière étape consiste à mettre en correspondance les fixations obtenues avec le contenu du champ visuel. Dans notre exemple, on observe (courbe n° 1) quatre fixations, deux dans chacune des deux "zones d'intérêt" présentes dans le champ visuel. Une zone d'intérêt peut être un instrument sur une planche de bord, un cadran sur une vue de conduite, une partie de synoptique, etc. On introduit alors une entité complémentaire à la fixation, la "consultation", définie comme un ensemble de fixations consécutives dans la même zone. On obtient ainsi (courbe n° 4) deux consultations, une par zone d'intérêt, constituées chacune de deux fixations.

En résumé, il existe trois "entités oculométriques" :

- Les ***échantillons*** : ils sont liés aux caractéristiques technologiques du capteur (principe de mesure, résolution spatiale, fréquence d'échantillonnage, ...).

- Les ***fixations*** : il s'agit d'entités "physiologiques", obtenues après filtrage des signaux X-Y produits par le capteur. Ce filtrage, basé sur des données physiologiques, est totalement indépendant du contenu du champ visuel.

- Les ***consultations*** : elles sont définies par rapport au contenu du champ visuel. Elles nécessitent un découpage de ce dernier en zones d'intérêt (découpage réalisé soit a priori, i.e. avant l'acquisition des mouvements oculaires, ou a posteriori, i.e. après un premier examen des données recueillies).

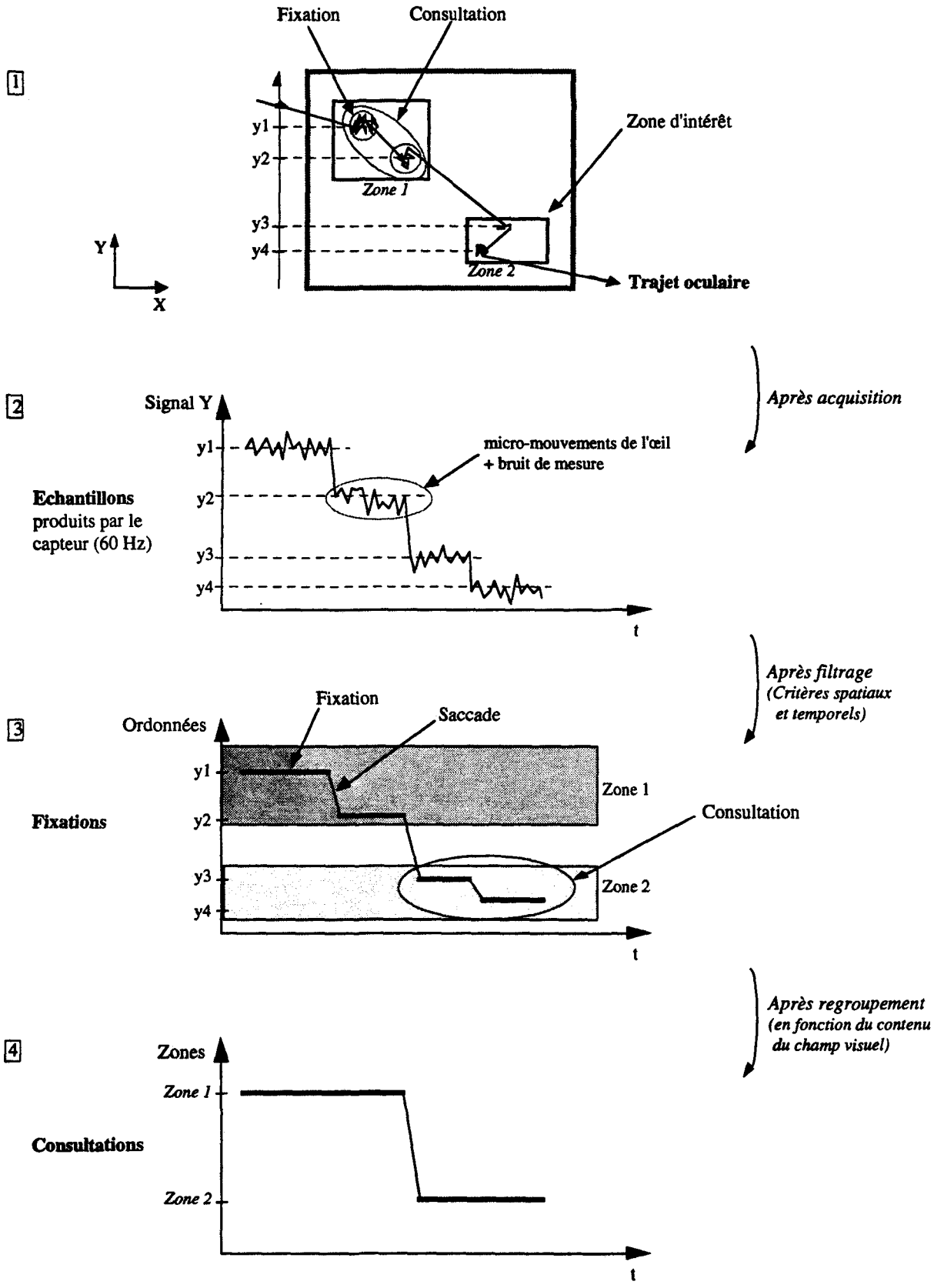


Figure II.2 : Acquisition et codage des données oculométriques.

III.2 Latence du système saccadique

MAY et al. /86/ ont réalisé des expérimentations en vue de mettre au jour un indice, issu des mouvements oculaires, qui fournisse une relation monotone avec la charge de travail, l'état d'alerte et d'attention, ...

Pour cela, les auteurs soumettent 5 sujets à une tâche de comptage de sons ("tone counting task" de Kennedy, 72). Ces derniers, de trois fréquences différentes, durent 500 ms. Ils sont émis à intervalles pseudo-aléatoires, la fréquence moyenne de production d'un son étant de 2 Hz. La difficulté de la tâche est fixée par la complexité du comptage :

- faible : appui sur une touche tous les 4 sons de fréquence faible ;
- moyenne : appui sur une touche tous les 4 sons de fréquence moyenne ;
- élevée : combinaison des 2 tâches précédentes.

La performance est calculée en comptabilisant les nombres de réponses correctes, d'omissions, et de réponses fausses. La phase d'apprentissage prend fin lorsque les sujets atteignent une performance de 70% de bonnes réponses.

Les expérimentations proprement dites se déroulent en deux temps :

- Les sujets débutent en effectuant les trois tâches, dans l'ordre de difficulté croissante. Ils effectuent alors une seconde fois la tâche de difficulté faible.
- Les sujets effectuent de nouveau les quatre tâches mentionnées précédemment, mais cette fois en effectuant une tâche ajoutée de fixations alternatives : les sujets sont assis, tête immobilisée, devant deux dels (diodes électroluminescentes). Ces deux diodes se situent sur une même horizontale, espacées de l'équivalent de 20 degrés par rapport à l'œil du sujet (la mesure des mouvements se fait sur l'œil gauche). Les deux dels s'allument alternativement, de manière apériodique, à la fréquence moyenne de 0,2 Hz.

La figure II.3 présente les résultats obtenus pour l'ensemble des sujets. Elle met en évidence une diminution de la latence saccadique lorsque la charge de travail, inhérente à la tâche de comptage, augmente (diminution significative entre faible_1 & élevée et moyenne & élevée). Les auteurs soulignent toutefois la présence d'un "biais", lié probablement à un apprentissage en cours d'expérimentation. C'est ce que semblent indiquer le temps de latence obtenu pour la deuxième tâche de niveau faible ("faible_2" sur la courbe), très inférieur à celui obtenu pour la première ("faible_1"), ainsi que les performances de comptage obtenues.

Pour pouvoir enregistrer de telles saccades "déclenchées", il faut interrompre la tâche en cours. Cette technique est donc très perturbatrice et s'avère peu réaliste en dehors d'une expérimentation de laboratoire /SANTUCCI, 87/.

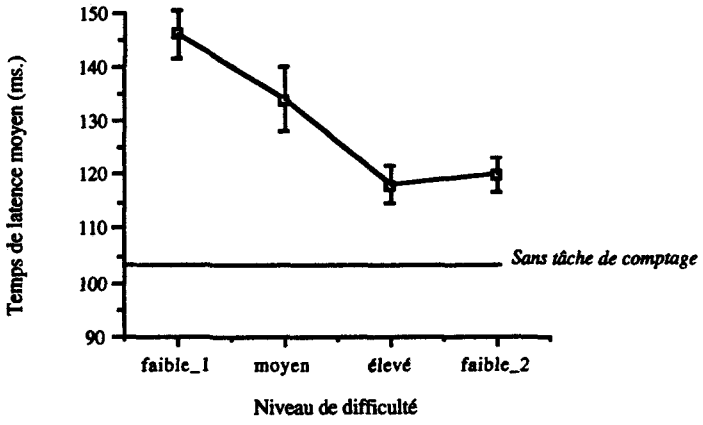


Figure II.3 : Latence saccadique (moyenne obtenue pour les 5 sujets) en fonction de la difficulté de la tâche de comptage de tonalités /MAY et al., 86/.

III.3 Vitesse des saccades

L'hypothèse sous-jacente à l'utilisation de cet indice est la même que précédemment, pour le temps de latence : la charge de travail d'un individu étant fortement liée à son état d'éveil, une augmentation sensible de la charge doit "accroître" la dynamique des saccades oculaires. Une telle augmentation transparaît légèrement au niveau du temps de latence (paragraphe précédent), il "doit" en être de même pour la vitesse des saccades.

Il faut préciser qu'il s'agit ici du "pic" de vitesse de la saccade, et non de la vitesse moyenne. En effet, les saccades présentent les principales caractéristiques suivantes :

- un temps de réaction très variable, de l'ordre de 100 à 300 ms (voir paragraphe précédent) ;
- une phase d'accélération très rapide, jusqu'à 4000 °/s^2 ;
- un palier de vitesse, fonction croissante de l'amplitude du mouvement à effectuer, et pouvant s'élever à 600 °/s (vitesse angulaire de l'axe du regard) ;
- une phase de décélération rapide.

Il s'agit donc de mesurer le palier de vitesse, ce qu'ont fait MAY et al. /86/ dans leurs expérimentations déjà décrites au paragraphe précédent. La tâche de fixation alternative des deux dels permet de "fixer" l'amplitude des saccades.

Les résultats obtenus montrent que, globalement, la vitesse tend à augmenter lorsque la charge de travail augmente (charge induite par la tâche de comptage de tonalités). Mais les auteurs précisent qu'il ne s'agit pas là d'un indice fiable, car beaucoup trop variable. De plus, ils mentionnent des difficultés liées à l'instrumentation pour recueillir un tel indice.

III.4 Amplitude des saccades

Les mêmes auteurs, MAY et al. /86/, ont réalisé une seconde série d'expérimentations sans la "tâche ajoutée" de fixation alternative, et en augmentant les contrastes entre les trois niveaux de difficulté. Ils ont donc étudié l'amplitude des saccades spontanées ("free viewing" pendant 5 minutes), les sujets étant soumis à une tâche purement mentale (toujours de comptage de sons). Les résultats montrent que lorsque la difficulté augmente, l'amplitude moyenne des saccadés diminue.

KREBS et al. /77/ ont réalisé des expérimentations dans un contexte plus "réaliste", sur simulateur de vol (expérimentations déjà décrites en II.1). Pour rappel, la tâche consiste en une approche "manuelle" et un atterrissage aux instruments. Il existe cinq niveaux de difficulté globale, fonction des turbulences et de la stabilité de l'appareil. Chaque "vol" est lui-même décomposé en cinq "segments", de difficultés différentes (exemples : vol en palier, "touch-down", ...).

Les auteurs envisagent deux comportements hypothétiques face à une augmentation de la charge de travail :

1) le pilote a tendance à focaliser son attention sur un groupe restreint d'instruments, voire sur un seul (par exemple, l'ADI : "Attitude Direction Indicator", instrument central de la planche de bord et intégrant plusieurs fonctions) ;
2) le pilote cherche "désespérément" de l'information, en parcourant sa planche de bord de part en part).

La première hypothèse devrait être caractérisée par des saccades plutôt courtes, et la seconde par des saccades plutôt longues.

Les résultats expérimentaux montrent une baisse légère, mais significative, de la longueur des saccades lorsque la difficulté augmente (il existe une relation monotone entre la longueur moyenne des saccades et les 5 niveaux de difficulté). Les auteurs font remarquer que ce phénomène est plus marqué à l'intérieur d'un même vol, en fonction de la phase en cours, qu'entre les vols de difficultés globales différentes. KREBS en conclut que la probabilité pour que le pilote focalise son attention sur un même instrument augmente quand la tâche de pilotage devient difficile. Autrement dit, les résultats expérimentaux tendent à confirmer la première hypothèse.

KETSCHER et al. /90/ ont également étudié la longueur des saccades, dans un contexte différent. Ils ont utilisé pour leurs expérimentations un logiciel de simulation d'incendies de forêts. Le "superviseur" visualise sur sa station de travail l'évolution de la situation. Il dispose sur le terrain de huit "unités de combats". Sa mission consiste à minimiser les pertes en superficie de forêt, en optimisant l'utilisation des forces sur le terrain.

Le but des auteurs est d'étudier la prise de décision du superviseur en fonction de sa charge de travail. Pour cela, ils réalisent des évaluation subjectives de charge en ligne : périodiquement, le superviseur est "invité" à exprimer son sentiment de charge (nombre de 1 à 7), en cliquant à la souris dans un menu déroulant intégré dans l'interface graphique du logiciel de simulation.

Là encore, les auteurs rapportent une baisse de la longueur moyenne des saccades lorsque la charge de travail augmente (charge provenant ici d'estimations subjectives, et non du niveau de difficulté comme précédemment). KETSCHER et al. fournissent une explication de ce résultat : lorsque la charge du superviseur augmente, il dispose de moins de temps pour effectuer diverses vérifications, en consultant les menus déroulant disposés à la périphérie de l'écran.

Comme précédemment, pour les expérimentations sur simulateur de vol, l'explication de la diminution de l'amplitude des saccades lorsque la charge mentale augmente est fournie en termes de "tactique oculaire" : l'opérateur focalise son attention sur les informations essentielles. Il a tendance à délaisser les informations d'importance moindre, généralement disposées à la périphérie de l'écran, de la planche de bord, etc. En quelque sorte, ce résultat "justifie" a posteriori l'aménagement ergonomique de l'espace visuel de l'opérateur.

L'amplitude des saccades paraît donc être un indice intéressant, moins en tant que caractéristique "isolée" des mouvements oculaires que lorsqu'il est corrélé avec le contenu du champ visuel de l'opérateur.

III.5 Fréquences des saccades

KETSCHER et al. /90/, déjà cités précédemment, ont étudié la fréquence moyenne des fixations oculaires (fréquence moyenne sur 1 minute, l'expérimentation durant 15 minutes) indépendamment de leur localisation. Cela revient à étudier la fréquence des saccades.

Les auteurs rapportent un accroissement sensible de la fréquence moyenne des saccades lorsque la charge de travail subjective augmente (valeurs extrêmes : 65 et 120 saccades par minute). Ils précisent que cette augmentation est particulièrement marquée lors des périodes nécessitant une prise de décision rapide et lourde de conséquences pour l'issue de la mission (la fréquence passe alors de 95 à 120 saccades/minute). A la fin du scénario, on observe une chute de la fréquence simultanément à une baisse de la charge subjective.

WIERWILLE et al. /85/ ont également utilisé cet indice ("eye transition frequency") dans leur série d'expérimentations sur simulateur de vol. Le but de ces travaux était d'éprouver la sensibilité et "l'intrusion" des principales méthodes d'estimation de la charge mentale. Ils ont utilisé la fréquence des saccades oculaires dans leurs expérimentations axées sur les aspects "psychomoteurs" (tâche d'atterrissage aux instruments, nécessitant beaucoup d'actions manuelles). L'indice est classé par WIERWILLE et al. comme non sensible à la difficulté de la tâche. Ce résultat doit néanmoins être considéré avec précaution : il est difficile de savoir s'il s'agit là de la fréquence des saccades proprement dites, ou plutôt de la fréquence de passage d'un instrument à un autre.

Notons au passage que SAITO /92/ , n'a trouvé aucune influence de la fatigue sur la fréquence des saccades oculaires.

IV. INDICES LIÉS AUX CARACTÉRISTIQUES DES FIXATIONS OCULAIRES

Le rôle perceptif de la fixation a été souligné dans le premier chapitre, au paragraphe IV.1.3 : c'est pendant les fixations que l'information est extraite.

Concernant les facteurs dont dépendent la durée et le lieu des fixations, ACIER /90/ en recense trois principaux groupes :

- les facteurs liés au type de tâche et à ses exigences ;
- les facteurs relatifs aux qualités de la présentation des informations ;
- les facteurs propres à l'opérateur, notamment sa familiarité avec la tâche.

Ces trois groupes de facteurs concernent trois aspects essentiels de la charge de travail mental. Il paraît donc prometteur de tenter d'établir une relation entre les caractéristiques spatio-temporelles des fixations et la charge mentale.

IV.1 Durée des fixations

Remarque préliminaire : Les auteurs soulignent généralement la très grande variabilité de la durée des fixations, même pour un seul et unique sujet (cette variabilité provient de la multitude de facteurs entrant en ligne de compte). Il convient donc de ne jamais dissocier les résultats expérimentaux de leur contexte, sous peine d'aboutir à des interprétations erronées. Par exemple, des fixations longues peuvent être symptomatiques de difficultés pour prélever une information (tâche de pilotage aux instruments sur simulateur /HARRIS, 82/), mais peuvent également provenir de "centrations longues du regard" pour faciliter la détection en vision périphérique (tâche de diagnostic radiologique à partir de clichés pulmonaires /PAPIN, 83/).

IV.1.1 Influence de l'expérience

De nombreux travaux ont mis en évidence une relative stabilité du comportement visuel des opérateurs "experts". Ces derniers s'avèrent beaucoup moins sensibles aux variations de difficulté de leur tâche, et donc aux variations de charge de travail. Ce constat provient notamment de travaux sur simulateur de vol /TOLE et al., 83/ et également de travaux sur la conduite automobile /UNEMA et al., 88/.

Cette "stabilité" du comportement des experts se retrouve évidemment au niveau de la durée des fixations. UNEMA et al. /88/ ont réalisé des expérimentations dans une école de conducteurs de bus. Les sujets - 15 élèves et 5 instructeurs - étaient répartis en 3 groupes, en fonction de leur expérience : experts, novices 1 et novices 2.

La durée des fixations a été étudiée sur un parcours citadin, en fonction de la difficulté de la tâche : conduite en ligne droite, intersection à gauche, et intersection à droite (cette dernière situation étant la plus difficile - avec un bus ! - de l'avis des instructeurs). La figure II.4 ci-dessous illustre les résultats obtenus :

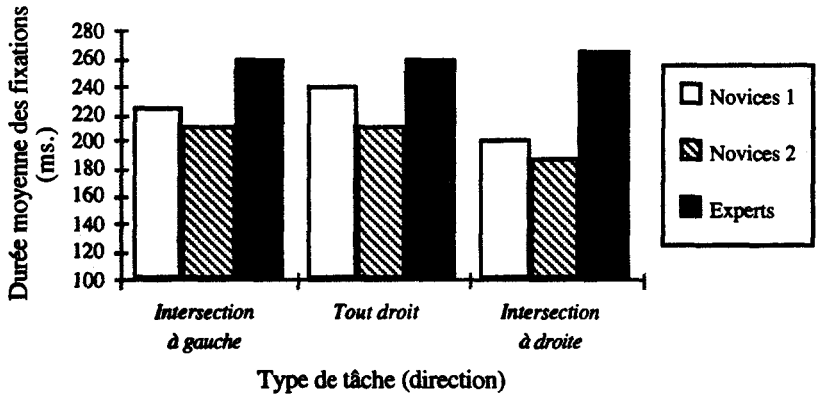


Figure II.4 : Durée moyenne de fixation, en fonction du type de tâche et du niveau d'expérience /UNEMA et al., 88/.

On peut constater que la durée moyenne des fixations des "experts" i.e. les instructeurs est quasiment constante en fonction de la difficulté de la tâche. A l'inverse, plus les sujets sont inexpérimentés, plus il existe de différences entre les trois situations.

Concernant les sujets "novices", il apparaît que leur durée moyenne de fixation est d'autant plus faible que la tâche est difficile. Pour expliquer ce résultat, les auteurs se basent sur un modèle du traitement de l'information proposé par GOPHER et SANDERS, modèle recensant les principaux facteurs "cognitifs et énergétiques". Il leur permet d'expliquer que la

durée des fixations dépend fortement de l'état d'éveil ("arousal state") des individus. Les novices découvrant sans cesse de nouvelles situations, leur éveil est maximal, d'où les durées de fixation plutôt courtes. Les auteurs précisent que les différences observées sont significatives.

IV.1.2 Influence de la difficulté

Ce même modèle permet à UNEMA et al. d'expliquer un autre résultat : lorsque la difficulté de la tâche augmente, ou lorsque la situation devient complexe, on observe chez la plupart des conducteurs plus de fixations courtes, et donc des durées moyennes de fixation plus faibles. Les auteurs expliquent qu'un sujet expérimenté, tout comme un sujet "normal" sous contraintes modérées, explore le champ visuel de manière relativement automatique, "guidé par les concepts" ("concept driven scanning"). Lorsque la difficulté augmente, le réflexe de fixation déclenche des saccades à destination de tout stimulus paraissant nouveau ou "informatif" ("event driven saccades"). L'exploration est alors guidée par les "événements", ce qui se traduit par plus de saccades courtes.

La figure II.5 qui suit présente les résultats obtenus par UNEMA et al. /88/, dans une seconde série d'expérimentations. Celles-ci portent sur une douzaine de conducteurs automobiles, soumis à un parcours mi-urbain, mi-autoroutier (conduite réelle). Sur la figure sont tracées les distributions des durées de fixation obtenues pour les deux niveaux de difficulté extrêmes : on peut vérifier que le nombre de fixations très courtes (inférieures ou égales à 216 ms) obtenu lors de la prise d'un rond-point en ville est supérieur à celui obtenu en ligne droite, sur autoroute. Inversement, les fixations longues (de l'ordre de 300 à 600 ms) sont plus fréquentes sur "belle route". Les auteurs précisent que les différences entre les deux distributions sont faibles, mais significatives (sauf pour les instructeurs qui, nous l'avons vu précédemment, présentent des durées de fixation relativement constantes).

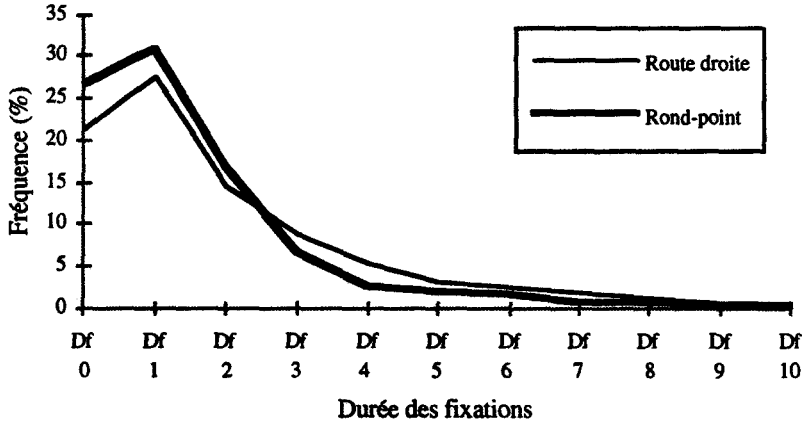


Figure II.5 : Distribution des durées de fixation en fonction du type de tâche (DF désigne la classe de durée : DF1 regroupe les fixations comprises entre 117 et 216 ms, DF2 celles comprises entre 217 et 316 ms, etc.) /UNEMA et al., 88/.

Remarque : la variabilité élevée des durées de fixations a été soulignée au début du paragraphe. Lorsqu'on étudie leur durée moyenne, comme dans le cas de la figure II.4, il convient donc de s'intéresser également à la distribution des durées. Il est en effet possible d'obtenir des distributions multi-modales, pour lesquelles la durée moyenne n'a pas grande signification.

UNEMA et al. ont également étudié la durée des fixations en fonction de l'amplitude de la saccade précédente : ils ont trouvé une corrélation négative. Ce résultat corrobore l'hypothèse selon laquelle un haut niveau d'éveil, caractérisé donc par des fixations de courtes durées, a

tendance à diminuer le seuil de déclenchement des saccades. Autrement dit, l'hypothèse de l'exploration "guidée par les événements", associée à des fixations courtes, semble se confirmer.

IV.1.3 Influence de la nature de l'information prélevée

Les expérimentations d'UNEMA et al. concernent essentiellement l'influence de l'expérience des conducteurs sur leur charge de travail et leurs mouvements oculaires. Le fait que la plupart des sujets soient en cours d'apprentissage explique peut-être les résultats obtenus quant à la durée des fixations. En effet, les auteurs rendent compte généralement d'une augmentation des durées de fixation avec la charge de travail.

C'est le cas de KREBS et al. /77/, déjà cités en II.1, dans leurs expérimentations sur simulateur de vol. Les auteurs précisent que cette augmentation de la durée des fixations survient essentiellement à "l'intérieur" d'un même vol, selon la phase en cours. Par contre, il n'existe pas de tendance systématique en fonction des cinq niveaux de difficulté globale.

KREBS explique que les différences sont les plus marquées entre le vol en palier et l'atterrissage proprement dit. Il propose une explication en termes de nature des informations prélevées : en palier, le pilote consulte le plus souvent ses instruments pour lire des valeurs : vitesse, altitude, etc. ; pendant la descente, ce sont non seulement les valeurs qui intéressent le pilote, mais également leurs tendances. L'augmentation de la durée des fixations peut ainsi s'expliquer par la présence d'une "constante de temps de dérivation".

Cette explication est en accord avec des résultats obtenus par HARRIS et al. /86/, dans un contexte identique. Les auteurs classent les consultations des instruments en deux grandes catégories, relatives à l'activité du pilote (citées par ordre de durée croissante) :

- les consultations de surveillance ("monitoring dwells") : elles incluent les "coups d'œil" (par exemple, le pilote "jette un coup d'œil" à sa jauge de carburant pour vérifier que l'aiguille est "loin du rouge") et les lectures d'un instrument (lecture de l'altimètre, en vue d'obtenir une valeur numérique) ;
- les consultations de contrôle ("control input dwells"), durant lesquelles des commandes sont appliquées.

IV.2 Nombre et fréquence des fixations

HARRIS et al. /86/ fournissent un résultat expérimental complémentaire au précédent, concernant la durée des fixations. Ils expliquent qu'en effet, comme KREBS et al. /77/ l'ont mentionné, la difficulté influe peu sur la durée des fixations. Par contre, elle influe sur la durée des consultations, et plus particulièrement sur le nombre de fixations par consultation, surtout concernant les consultations de "contrôle". Les auteurs fournissent les ordres de grandeurs suivants, tableau II.6 :

	Nombre de fixations par consultation	
Type de consultation	Avec turbulences	Sans turbulences
Surveillance (monitoring)	2	2
Contrôle (controlling)	4	7

Tableau II.6 : Nombre de fixations par consultation du "Flight Director", avec et sans turbulences /HARRIS et al., 86/.

Selon HARRIS et al., les turbulences n'affectent que les consultations de contrôle. Ils proposent l'explication suivante : les turbulences se traduisent, entre autres, par une augmentation de la dynamique des variables. Elles font que le pilote, après une action, préfère

aller consulter un autre instrument pour diminuer ses incertitudes, plutôt que d'effectuer quelques fixations "de contrôle" pour s'assurer de l'effet de la commande.

KREBS et al. /77/ ont étudié les transitions entre les différents instruments de la planche de bord (transitions regroupées au sein d'une matrice), y compris celles se produisant à l'intérieur des instruments, i.e. les petites saccades observées lors de la "lecture" d'un instrument (contenues dans les termes diagonaux de la matrice de transition). Les figures II.7.a et II.7.b résument les résultats obtenus.

On y voit que le niveau de difficulté du vol influe légèrement sur le nombre de saccades à l'intérieur des instruments. L'augmentation observée, de l'ordre de 5% entre les deux difficultés extrêmes, est légèrement plus marquée sur l'instrument central, i.e. l'ADI. Une plus grande augmentation est obtenue en fonction du segment de vol, tous niveaux de difficulté confondus : de l'ordre de 10%. Autrement dit, lorsque la difficulté augmente, la probabilité pour que le pilote focalise son attention sur un instrument particulier augmente également (notamment sur l'instrument central, "l'Attitude Direction Indicator").

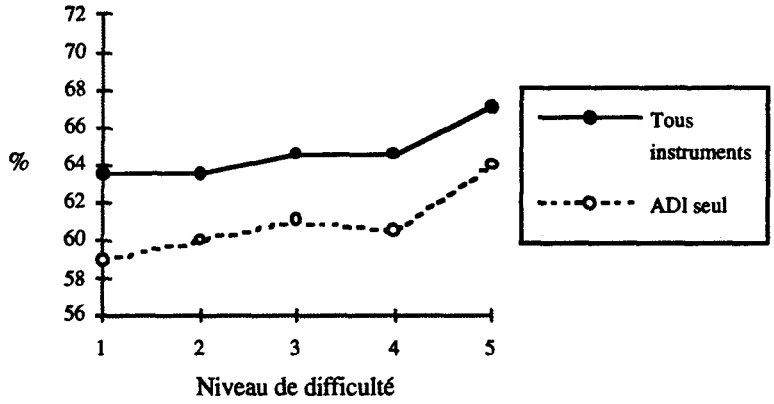


Figure II.7a : Pourcentage de saccades à l'intérieur des instruments en fonction du niveau de difficulté (toutes phases du vol confondues).

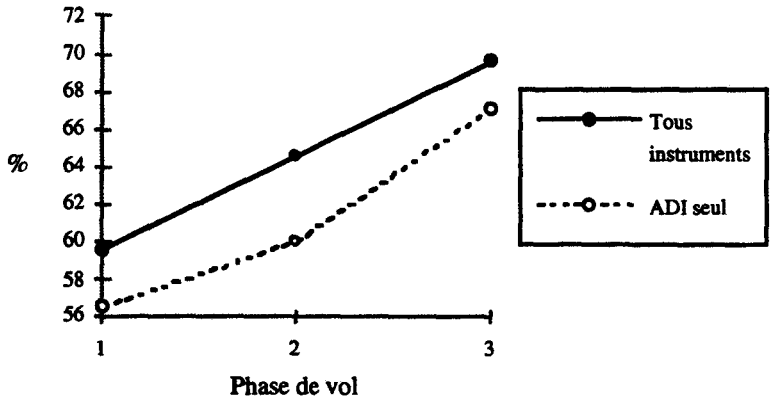


Figure II.7b : Pourcentage de saccades à l'intérieur des instruments en fonction de la phase de vol (tous niveaux de difficulté confondus).

IV.3 Taux de consultation

MORAY et al. /89/ obtiennent des résultats complémentaires dans un contexte très différent, celui du "paradigme expérimental" de Crossman : les sujets gèrent une petite installation hydraulique, composée de quatre réservoirs d'eau. Chaque réservoir possède sa propre arrivée d'eau, réglée par une vanne, et un système de chauffage également réglable. Les

quatre cuves sont interconnectées via six vannes. La tâche des opérateurs consiste à "réguler" l'installation, en respectant des consignes propres à chaque cuve (consignes de température, de niveau, et de débit) et modifiées à chaque essai. Il s'agit de compenser des perturbations et également de faire face à des "incidents" : obstruction partielle d'une vanne, ou dégradation d'un système de chauffage.

Les auteurs ont étudié en détail la gestion des défauts par les opérateurs. Aucun changement significatif des durées de consultation lors de la prise en compte d'un défaut n'a été mis en évidence. Par contre, MORAY décrit une focalisation de l'attention de l'opérateur sur la partie "fautive" de l'installation. Cette focalisation apparaît en étudiant les durées totales de consultation - ou taux de consultation - de chaque sous-système, par tranches de temps avant et après l'incident. La figure II.8 présente les résultats obtenus (moyenne sur les 12 opérateurs) :

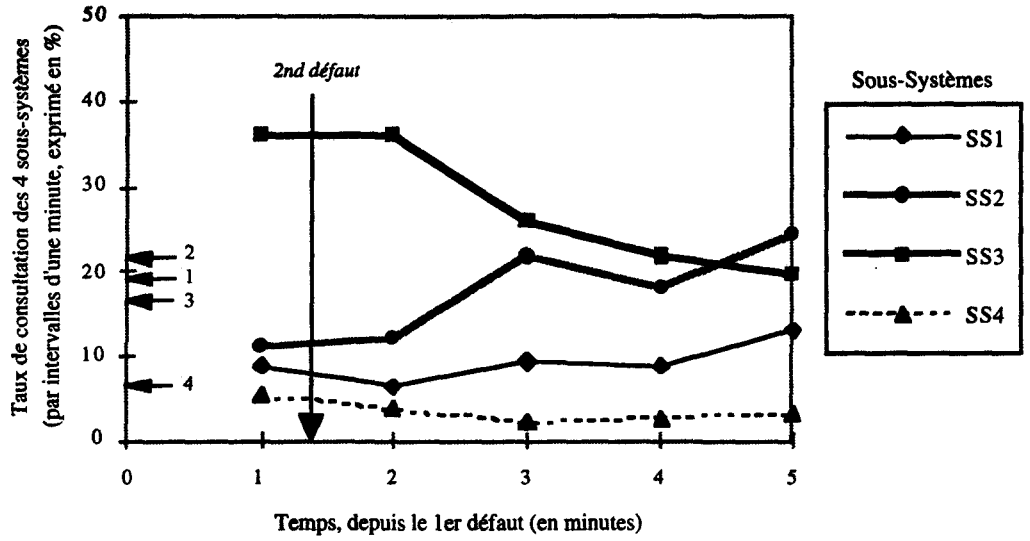


Figure II.8 : Répartition de l'attention des opérateurs sur les quatre sous-systèmes i.e. sur les quatre réservoirs d'eau /MORAY et al., 89/.
Les flèches à gauche du graphique indiquent la répartition de l'attention des opérateurs durant la minute précédant le premier incident. L'instant "0" coïncide avec un premier incident sur le sous-système 3. A l'instant t=1mn15s, un deuxième incident se produit sur le sous-système 2.

Dans les 30 secondes suivant le premier incident, l'attention allouée à SS2 et SS1 chute d'environ 50%, tandis qu'elle augmente de plus de 100% sur le système fautif i.e. SS3. Autrement dit, le défaut est détecté relativement rapidement, compte tenu du "cycle simulateur" de 5 secondes. Résultat important : ce "déplacement" de l'attention sur le sous-système fautif se traduit par des consultations plus fréquentes et non plus longues.

Lors du deuxième incident, sur SS2, le déplacement d'attention s'opère beaucoup plus lentement. Les auteurs font remarquer qu'il faut attendre 45 secondes après le second incident, et donc deux minutes après le premier, pour voir l'attention commencer à se déplacer du SS3 vers le SS2. Ce n'est que 5 minutes après le premier incident que l'attention accordée à SS2 dépasse sa valeur initiale, avant les deux incidents.

MORAY propose une explication à ces résultats, en termes de "verrouillage cognitif" (cognitive lockup), ou de vision "tunnel" déjà décrite en II.3 avec WILLIAMS /85/ et VOSS /81/. Ce résultat expérimental, et d'autres encore, font dire aux auteurs que les opérateurs semblent préférer travailler sur un seul défaut à la fois, et que ce phénomène de focalisation entrave la détection d'un autre défaut.

Ce résultat, relatif à la distribution de l'attention de l'opérateur, est à rapprocher de ceux obtenus par KREBS et al. /77/, qui observent trois effets simultanés suite à une augmentation de la difficulté : une légère augmentation des durées de fixation, une tendance de l'amplitude des saccades à diminuer, et surtout une activité oculaire - en nombre de saccades - accrue à l'intérieur de l'instrument central de la planche de bord (l'ADI).

Ces résultats expérimentaux sont parfois "tenus pour acquis" par certains auteurs, qui les utilisent à des fins d'évaluations ergonomiques. Ainsi GRAF et al. /87/ ont réalisé des expérimentations en vue d'évaluer un nouveau système informatique de billetterie devant équiper les Chemins de Fer Suisses. Ils ont eu recours à l'observation directe des opérateurs au travail sur leur terminal, à des questionnaires, ainsi qu'à l'oculométrie.

Dix tâches principales ont été répertoriées. GRAF et al. en ont réalisé un classement selon leur difficulté, basé sur les deux hypothèses suivantes : une tâche difficile est caractérisée par des durées de fixation longues et des amplitudes de saccade plutôt courtes (la comparaison des résultats obtenus avec des opérateurs débutants et des opérateurs opérationnels est cohérente avec ces deux hypothèses). Le classement réalisé, combiné avec les réponses des opérateurs aux questionnaires, leur permet de centrer la formation sur les tâches les plus difficiles ainsi que d'envisager des aménagements ergonomiques de ces dernières.

V. INDICES LIÉS AUX STRATÉGIES VISUELLES

Dans le cadre de l'analyse du travail de l'opérateur, SPERANDIO /88/ entend par *"stratégie ... non seulement un certain type de modes opératoires (c'est-à-dire une certaine procédure), mais aussi un certain choix d'objectif immédiat".*

Lorsque le niveau d'exigence de sa tâche augmente, l'opérateur peut modifier sa stratégie opératoire : *"il change de modes opératoires, il change certains des critères qui régissent son activité tant sur le plan qualitatif que sur le plan quantitatif"* /SPERANDIO, 88/.

On peut donc, dans certains cas, interpréter les changements de modes opératoires en termes de "régulation" de la charge de travail par l'opérateur. La figure 9.a illustre ce phénomène : à l'approche de sa capacité limite, l'opérateur change de stratégie pour maintenir sa charge globale à un niveau acceptable. Autrement dit, il adopte des modes opératoires moins coûteux en charge de travail, au détriment de certains critères.

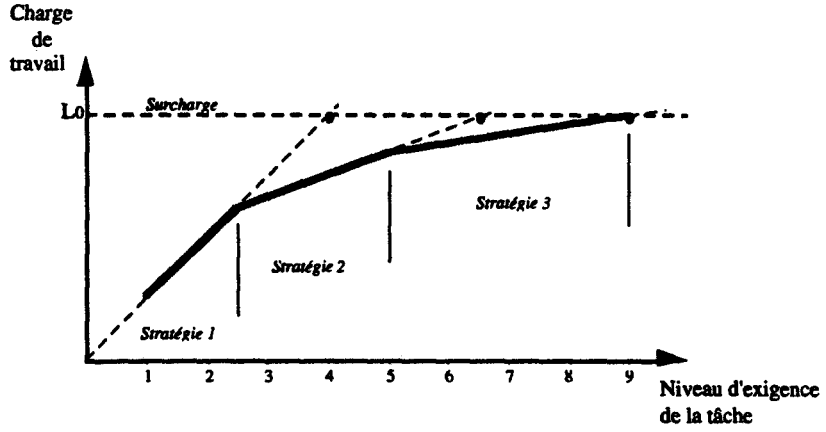


Figure II.9a : Régulation de la charge de travail par la mise en oeuvre de stratégies successives plus économiques /SPERANDIO, 77/.
Lo : capacité limite de l'opérateur (seuil de surcharge).

SPERANDIO /72, 77, 88/ a commencé ses travaux dans le domaine du contrôle de la navigation aérienne. Il décrit l'évolution des modes opératoires ainsi que des objectifs qualitatifs que s'assignent, en parallèle, les contrôleurs. Ces objectifs, qu'il faut distinguer des "objectifs permanents formellement assignés au système", se modifient selon une hiérarchie propre à l'opérateur, compte tenu de son évaluation de la situation courante.

L'objectif primordial est, naturellement, la sécurité (absence de collisions). L'objectif suivant dans la hiérarchie est le rendement, c'est à dire la rapidité d'écoulement (décollages et atterrissages). Viennent ensuite des objectifs moins importants, tels que le choix des trajectoires les plus courtes (économie de temps et de carburant), des descentes douces et des itinéraires qui évitent les zones orageuses (confort des passagers), le souci de minimiser la charge de travail de l'équipage (engendrée par des modifications fréquentes et rapprochées du cap et de l'altitude), etc.

Lorsque sa charge de travail augmente, la mise en oeuvre de stratégies "économiques" conduit le contrôleur à tenir compte de moins en moins des objectifs secondaires, pour assurer les objectifs principaux.

SPERANDIO /91/ décrit un double processus régulatoire, présenté en figure 9.b, entre la performance réalisée et l'exigence de la tâche d'une part, et entre la capacité de travail et la charge qui résulte du comportement opératoire d'autre part.

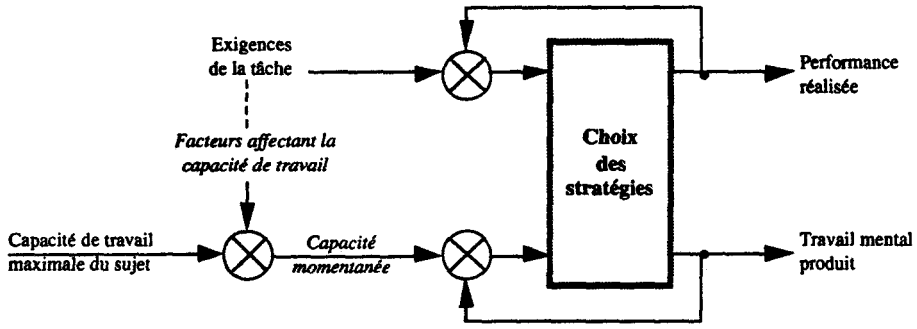


Figure II.9b : Double processus de régulation opératoire /BAINBRIDGE, 88//SPERANDIO, 91/.

SPERANDIO a analysé l'exploration visuelle des diverses sources d'information par les contrôleurs. Les caractéristiques de cette exploration sont fortement liées aux modes opératoires, et sont donc soumises notamment aux effets de la charge de travail (elles dépendent également beaucoup du degré de qualification des opérateurs). Autrement dit, l'analyse de la prise d'information, dans la mesure où elle permet de détecter certains changements de stratégies opératoires, peut permettre de "remonter" à l'état de charge de l'opérateur.

Certains parlent de "stratégies visuelles". ACIER /90/ fait remarquer que le terme "stratégie", par définition (*art de combiner des opérations pour atteindre un objectif* /HACHETTE, 89/), correspond plutôt aux opérations mentales qui dirigent le choix des points de fixation successifs. Il lui préfère le terme de "tactique oculaire" (une tactique étant définie comme *l'ensemble des moyens que l'on emploie pour atteindre un objectif ; conduite que l'on adopte pour obtenir quelque chose*).

L'objet de cette troisième partie est l'étude des tactiques oculaires, c'est à dire de l'organisation de la prise d'information, en vue d'estimer - via les modes opératoires - la charge mentale de l'opérateur.

V.1 Étude des trajets oculaires

V.1.1 Matrices de transition

Lorsqu'on s'intéresse à l'organisation de la prise d'information visuelle de l'opérateur, un moyen synthétique pour rendre compte globalement de l'activité oculaire consiste à dresser une matrice de transition. Cela suppose un découpage préalable de l'espace visuel en "zones d'intérêt" : les différents instruments, voyants, etc., dans le cas d'une planche de bord ; les différents "objets graphiques" affichés à l'écran, pour les consoles de supervision. Le terme général de la matrice, n_{ij}, est égal au nombre de passages de la zone i à la zone j.

L'allure d'une matrice de transition peut varier suivant les données oculométriques de départ : les échantillons fournis par le capteur ou les fixations oculaires.

• *Matrice construite à partir des échantillons fournis par le capteur :*

Les capteurs oculométriques fournissent généralement la direction du regard sous la forme d'un couple X-Y, à la fréquence de 50 ou 60 Hz. HARRIS et al. /86/, dans leurs expérimentations sur simulateur de vol, utilisent directement ces échantillons pour remplir les matrices de transition. Les termes diagonaux contiennent alors le temps total de consultation des différentes zones d'intérêt, en nombre d'échantillons, et représentent les plus grands effectifs. Les termes non diagonaux contiennent le nombre de passages entre deux zones différentes.

De cette matrice, les auteurs déduisent quelques indices couramment utilisés :

- Temps moyen de consultation d'une zone : si n_{ij} est le terme général de la matrice (i : instrument de départ ; j : instrument d'arrivée), N le nombre d'instruments, et 30 Hz la fréquence d'échantillonnage du capteur, on obtient pour la durée moyenne de consultation de l'instrument j (average Dwell Time) :

$$(DT)_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} n_{ij}}{\sum_{i=1, i\neq j}^{N} n_{ij}} \cdot \frac{1}{30}$$

- Taux de consultation des différentes zones : la proportion de temps passé sur une zone (Dwell Percentage) peut être calculé en divisant la somme de chaque colonne par l'effectif total de la matrice :

$$(DP)_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} n_{ij}}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} n_{ij}}$$

- Taux de transition d'une zone à une autre : il est calculé en divisant le terme correspondant de la matrice par la somme des termes non-diagonaux :

$$f_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1, j\neq i}^{N} n_{ij}}$$

Il est possible de synthétiser tous ces résultats sur un graphe de liaison, dont un exemple est donné avec la figure II.10 ci-dessous :

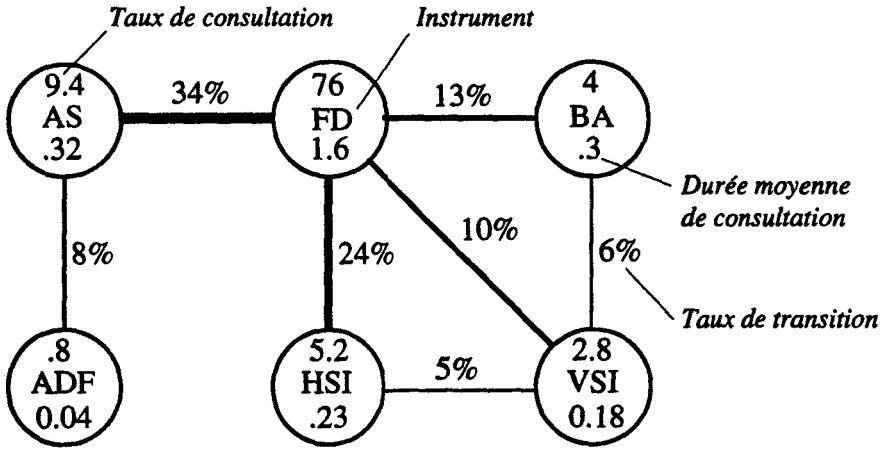


Figure II.10 : Exemple de graphe de transition : tâche d'atterrissage aux instruments, sans turbulences /HARRIS et al., 86/. L'épaisseur des traits est proportionnelle au taux de liaison entre les deux zones. Les taux inférieurs à 2% ne sont pas représentés.
Instruments : AS = Airspeed Indicator ; FD = Flight Director ; BA = Barometric Altimeter ; ADF = Automatic Direction Finder ; HSI = Horizontal Situation Indicator ; VSI = Vertical Speed Indicator.

En première approche, une analyse purement qualitative des tels graphes peut être réalisée, en vue de mettre à jour des différences éventuelles entre les pilotes, ou déceler une adaptation des comportements en fonction des conditions météorologiques.

• *Matrice dressée à partir des fixations oculaires :*

Les matrices de transition sont plus généralement construites à partir des fixations oculaires. Ceci nécessite une phase préalable de filtrage et d'agrégation des échantillons fournis par le capteur en "points de fixation" (ACIER /90/ fournit un exemple d'algorithme réalisant l'extraction des fixations à partir des échantillons "capteur").

Les termes diagonaux de la matrice contiennent alors le nombre de saccades observées à l'intérieur d'une même zone. Lorsque KREBS /77/ décrit une focalisation du pilote sur certains instruments, quand la difficulté du vol augmente, il se fonde sur l'augmentation des effectifs diagonaux. Cette dernière fait l'objet des figures II.7.a et II.7.b (§ IV.2).

• *Matrice dressée à partir des consultations :*

HARRIS et al., dans leurs expérimentations sur simulateur de vol, montrent que le nombre de fixations par consultation dépend de la nature de la consultation (il existe des consultations de "monitoring" et de "controlling"), ainsi que des conditions de vol (pour le second type de consultation). Ce nombre de fixations par consultation est "contenu" dans les termes diagonaux de la matrice de transition.

Ces derniers représentent un effectif important de la matrice, souvent de l'ordre de 50% de l'effectif total. Il est alors préférable de les étudier séparément, en s'intéressant par exemple à la distribution du nombre de fixations par consultation. On peut alors "annuler" la diagonale de la matrice, ce qui revient à ne considérer que les consultations /ITOH et al., 90/. Cette façon de procéder a l'avantage de supprimer certains "biais", lorsqu'il s'agit de dégager les liens "significatifs" entre les différentes zones.

V.1.2 Séquences de consultation

Les matrices de transition permettent de se faire une idée globale des interactions entre les différentes zones. Néanmoins, elles ne rendent pas compte explicitement de l'enchaînement des consultations.

TOLE et al. /83/, dans leurs expérimentations sur simulateur de vol, étudient les séquences de consultation. Ils précisent que, dans leur cas, les séquences de quatre consultations (i.e. quatre instruments) constituent le meilleur compromis entre la longueur des séquences et leur nombre d'occurrences.

Pour chaque pilote, les auteurs sélectionnent les dix séquences les plus fréquentes, qu'ils considèrent comme caractéristiques du sujet. Ces dix séquences représentent environ 50% de l'activité oculaire chez les pilotes expérimentés, nettement moins chez les pilotes novices. Ce qui fait dire aux auteurs que l'exploration visuelle des pilotes novices est probablement plus "aléatoire" que celle des experts.

En effet, quelle que soit la tâche considérée, il semble exister un comportement visuel "optimal". Ce dernier s'acquiert de façon informelle, au cours de l'apprentissage /PAPIN, 82/. L'étude des séquences de consultation permet de mettre en évidence l'évolution des stratégies visuelles d'exploration sous l'effet de l'apprentissage et de l'expérience professionnelle. Cette évolution se manifeste essentiellement par la systématisation progressive de la saisie visuelle, ainsi que par une augmentation de la sélectivité et de la vitesse de l'exploration /NEBOIT, 83/.

V.2 Organisation de la prise d'informations visuelles

On vient d'évoquer deux possibilités pour caractériser le comportement oculaire. Le problème se pose maintenant d'évaluer l'influence de la charge de travail sur ce comportement.

V.2.1 Quantification du "désordre" oculaire

• Quantification du désordre à partir des matrices de transition :

De nombreux travaux ont eu recours aux matrices de transition pour étudier l'influence de la charge de travail sur l'exploration visuelle. Une matrice est calculée pour plusieurs niveaux de charge, un graphe pouvant ensuite être tracé. Une comparaison qualitative des graphes obtenus est parfois possible, lorsque les différences sont manifestes. Dans la pratique, c'est rarement le cas. De plus, il est intéressant de quantifier les différences éventuelles, ne serait-ce que pour tester leur significativité.

La comparaison de deux matrices s'avère délicate. Certains auteurs proposent d'utiliser la notion "d'entropie" au sens thermodynamique du terme, c'est à dire comme indice du "désordre oculaire" reflété dans la matrice de transition. Un tel indice a l'avantage de permettre la comparaison de matrices d'effectifs totaux différents, voire même de dimensions différentes.

La manière la plus simple de calculer l'entropie est d'emprunter la formule bien connue en théorie de l'information /HARRIS et al., 86/ :

$$H = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1, j\neq i}^{N} H_{ij} = - \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1, j\neq i}^{N} p_{ij} \log_2 p_{ij}$$

avec
- H : entropie moyenne observée ;
- N : dimension de la matrice, i.e. nombre de zones d'intérêt ;
- H_{ij} : entropie pour les transitions de la zone i vers la zone j ;
- P_{ij} : probabilité de passage de la zone i vers la zone j, approximée par la fréquence des transitions.

Le scalaire obtenu a pour unité des bits/transition. Plus sa valeur est élevée, plus le comportement oculaire est désordonné, ou aléatoire. A l'opposé, plus sa valeur est faible, plus le comportement présente de régularités, plus il existe de liens entre les différentes zones.

L'entropie, telle qu'elle vient d'être définie, est un indice permettant de quantifier le désordre purement spatial de l'exploration visuelle. Or, nous avons vu que la durée des consultations est très variable. HARRIS et al. /86/ proposent de prendre en compte les durées moyennes de consultation dans le calcul d'entropie. On parle alors de "taux d'entropie", calculé comme suit :

$$\dot{H} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \frac{H_{ij}}{(DT)_{ij}}$$

avec H_{ij} : entropie pour les transitions de la zone i vers la zone j, calculée comme précédemment ;
$(DT)_{ij}$: durée moyenne de consultation de la zone j, pour les transitions provenant de la zone i. $(DT)_{ij}$ est calculée à partir d'une "matrice de consultation". Cette dernière, constituée en complément de la matrice de transition, contient - à la place du nombre de transitions - les durées totales de consultation des différentes zones, compte tenu de la consultation précédente.

Le taux d'entropie est un indice qui rend compte du désordre tant spatial que temporel de la scrutation oculaire. L'unité devient des bits/seconde.

HARRIS et al. /86/ ont testé cet indice dans leurs expérimentations sur simulateur de vol. Le pilote effectue sa tâche de pilotage, tandis qu'il est artificiellement "chargé" par une tâche ajoutée. Cette dernière est purement mentale, pour ne pas interférer avec la scrutation de la planche de bord : à intervalles réguliers, le pilote doit répondre par "plus" ou "moins" à une série de trois nombres, selon un algorithme pré-défini. La difficulté de la tâche est fixée par l'intervalle entre deux présentations de triplets.

Les auteurs rapportent une diminution systématique du taux d'entropie lorsque la difficulté de la tâche ajoutée augmente. Cette baisse du taux d'entropie peut être approximée par une exponentielle décroissante. Les auteurs interprètent ce résultat par une "structuration" du comportement oculaire des pilotes lorsque leur charge augmente. Une explication est souvent donnée, selon laquelle lorsque la charge du pilote est faible, ce dernier dispose de temps libre pour vérifier diverses informations. Ces divers "coups d'œil" semblent contribuer en grande partie au "désordre oculaire" généralement constaté pour les faibles niveaux de charge de travail /TOLE et al., 83/.

Les auteurs ont également utilisé le taux d'entropie pour évaluer la répercussion de deux modes de présentation d'une même information sur la charge de travail du pilote.

• Quantification du désordre à partir des séquences de consultation :

La figure II.11 résume les résultats obtenus par TOLE et al. /83/, dans un contexte identique à celui d'HARRIS et al. /86/. La recherche des 10 séquences (longueur 4) les plus fréquentes a été effectuée pour chaque pilote, au niveau de charge le plus faible, c'est à dire sans la tâche ajoutée.

Le niveau d'expérience des pilotes est très variable : les pilotes 1 et 2 sont des "experts" (le sujet 1 est pilote d'essai à la NASA), tandis que les 4 autres sont des pilotes "novices". Les résultats expérimentaux mettent en évidence une influence capitale du niveau d'expérience :

- Concernant les pilotes experts : les 10 séquences retenues comprennent entre 40 et 50% de leur activité oculaire. Ce pourcentage varie assez peu avec la difficulté de la tâche. Ceci confirme un résultat bien connu, à savoir que le comportement des opérateurs experts est relativement peu sensible aux variations de charge de travail.

- Concernant les pilotes novices : les 10 séquences retenues englobent un pourcentage beaucoup plus faible de leur activité oculaire globale. De plus, ce pourcentage chute sensiblement lorsque la charge augmente. Les auteurs interprètent ce résultat par une organisation moindre de l'exploration oculaire, quelque soit le niveau de charge. *Remarque* : TOLE souligne l'existence possible d'un biais, lié à la méthode utilisée : la recherche des 10 séquences "caractéristiques" se fait pour le niveau de charge faible. Or, il se peut qu'entre les deux niveaux de charge extrêmes, les pilotes changent leur "jeu" de séquences, c'est à dire modifient leurs chemins oculaires "privilégiés".

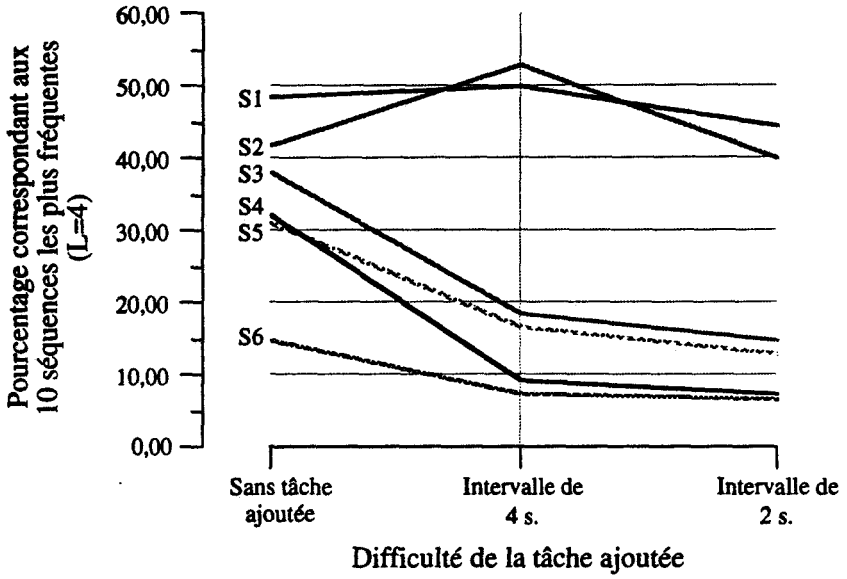


Figure II.11 : Pourcentage d'occurrence des 10 séquences les plus fréquentes (séquences de 4 consultations), pour 6 pilotes, en fonction de la difficulté de la tâche mentale ajoutée.

De même que pour les transitions, cette analyse qualitative peut être complétée par des calculs d'entropie ou de taux d'entropie. TOLE et al. ont adapté les formules citées précédemment aux séquences de consultation, quelles que soient leurs longueurs.

De même que pour les transitions, le taux d'entropie s'avère un indice sensible aux variations de difficulté de la tâche ajoutée /TOLE et al., 83/.

V.2.2 Détection de périodicités

Dans leurs expérimentations, TOLE et al. /83/ utilisent donc une tâche mentale ajoutée, dont la fréquence de présentation au pilote détermine la difficulté (pas de tâche ajoutée, 0.1 Hz, 0.2 Hz, et 0.5 Hz). Cette fréquence est constante sur l'ensemble d'un scénario.

Les auteurs se sont posés la question de savoir si le comportement oculaire du pilote est altéré de manière périodique ou non. Par exemple, ils émettent l'hypothèse d'une modification des fréquences de consultation des instruments en fonction de la fréquence de présentation de la tâche ajoutée.

Pour mettre en évidence une perturbation périodique éventuelle du comportement oculaire, TOLE et al. réalisent un calcul d'autocorrélation. Les données de départ sont les échantillons fournis par le capteur à la fréquence de 30 Hz. Pour chaque instrument j, un "signal" $f_j(i)$ est construit comme suit :

$$f_j(i) = x_j(i) - X_j \quad \text{avec}$$

$x_j(i) =$ 1 si l'instrument j est consulté à l'échantillon i,
0 dans le cas contraire ;
$X_j =$ moyenne des $\{x_j(i)\}$.

La fonction d'autocorrélation $f_j(i)$ est calculée avec la formule suivante :

$$R_j(k) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(f_j(i) \cdot f_j(i+k) \right)$$

avec n étant le nombre total d'échantillons (ou la durée totale de l'enregistrement divisée par la période d'échantillonnage, 1/30ème de seconde).

Une fonction d'autocorrélation est calculée pour chaque pilote, pour les 4 niveaux de difficulté, et pour les 7 principaux instruments de la planche de bord. Une transformée de Fourier lui est appliquée afin d'obtenir les spectres de densité de puissance. L'analyse des spectres permet de déceler les fréquences de consultation dominantes, et donc de mettre en évidence les périodicités de consultation.

Cette technique fournit des résultats intéressants pour les pilotes experts. Par exemple, l'analyse des résultats obtenus avec le pilote n°1 révèle trois fréquences dominantes (0.0928 Hz, 0.1709 Hz, et 0.3175 Hz), correspondant respectivement aux niveaux de difficulté faible, moyen et élevé. Ces trois fréquences correspondent à des périodes de 10.78, 5.84 et 3.15 s., périodes très proches de celle de la tâche ajoutée pour les trois niveaux de difficulté correspondant. En l'absence de tâche ajoutée, aucune fréquence dominante ne se dégage.

TOLE et al. interprètent ce résultat ainsi :

- En l'absence de tâche ajoutée, la charge de travail du pilote est très faible. L'exploration visuelle est alors relativement "aléatoire".

- Lorsque la tâche ajoutée est appliquée, de manière périodique, l'exploration du pilote devient elle aussi périodique. Il semblerait que, pour être "efficace", le pilote réalise un multiplexage entre la tâche ajoutée et la tâche primaire de pilotage. La fréquence dominante se dégageant du comportement du pilote coïncide alors avec la fréquence de la tâche ajoutée.

Les auteurs insistent sur le fait que ce résultat est observé chez les pilotes experts uniquement. Les pilotes novices présentent très peu de périodicités, et ce quelque soit le niveau de charge de travail. TOLE et al. en concluent que les pilotes experts ont probablement, entre autres, des aptitudes pour gérer plusieurs tâches simultanées.

VI. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

La figure II.12 fournit un tableau récapitulatif des principaux travaux expérimentaux qui viennent d'être décrits. La plupart de ces travaux ne concernent pas une estimation de la charge de travail proprement dite. Ils concernent plus souvent l'influence de la difficulté de la tâche sur l'exploration visuelle. Il s'agit là de travaux indispensables à l'élaboration d'un véritable "indice" de charge mentale.

Nous avons adopté sensiblement la même présentation que celle du premier chapitre, pour la synthèse des principales méthodes "classiques" d'estimation de la charge, en retenant les mêmes propriétés. La plupart des cases du tableau demeurent vides, étant donné le nombre restreint de travaux consacrés à ces indices.

Propriétés / Indices	*sensibilité*	*sélectivité*	*perturbation*	*mise en œuvre*	*charge instantanée*
Physiologie					
Diamètre pupillaire	** (phénomène de faible amplitude)	O	** (techniques vidéo)	* (problème du diamètre "vrai")	**
Clignements palpébraux	*	O	** (techniques EOG)	* (sensibilité au bruit)	* (nécessité de moyenner)
Champ visuel fonctionnel	?	?	O (tache ajoutée)	O	"
Saccades					
Latence	**	?	O (tache ajoutée)	**	*
Vitesse	*	?	"	* (vitesse à extraire)	"
Amplitude	V (souvent **)	**	**	**	"
Fréquence	V	?	"	"	"
Fixations					
Durée	V	O	**	**	*
Nombre par consultation	V	**	"	"	"
Taux de consultation	V	?	"	"	"
Stratégies visuelles					
	* (grosses variations uniquement)	*	**	*	*

Légende :		
	**	plutôt bien
	*	plutôt faible
	O	mauvais
	V	variable

Figure II.12 : Synthèse des principaux travaux concernant l'influence de la charge de travail sur les caractéristiques de l'exploration visuelle.

On constate que, de même que pour les méthodes "classiques", il n'existe pas d'indice issu des mouvements oculaires parfaitement adapté à une estimation de la charge :

- Concernant les caractéristiques qualifiées de "physiologiques", le diamètre pupillaire est souvent cité parmi les indices "prometteurs", notamment pour sa sensibilité à la charge instantanée. Sa mise en oeuvre est toutefois délicate et peu réaliste en situation réelle de travail.

- Parmi les caractéristiques des saccades oculaires, l'amplitude semble un indice intéressant, surtout lorsqu'elle est combinée avec le contenu du champ visuel. Elle permet notamment de mettre en évidence une focalisation de l'attention de l'opérateur.

- La durée des fixations est l'indice le plus souvent utilisé, même si elle s'avère très variable et soumise à de nombreux facteurs. Les taux de consultation permettent d'étudier la répartition de l'attention de l'opérateur.

- Comme pour les méthodes traditionnelles d'estimation de la charge, il paraît judicieux d'utiliser conjointement plusieurs indices, en commençant par s'intéresser à l'organisation globale de la prise d'informations visuelles. On a vu avec SPERANDIO que les stratégies visuelles, "reflétées" en partie par l'analyse des mouvements oculaires, peuvent se modifier en fonction du niveau de charge de travail.

O'DONNEL et al. /86/ tentent de cerner les situations favorables à l'utilisation d'indices de charge issus de l'analyse de l'activité oculaire :

1) il faut naturellement que les sources d'information importantes pour le travail soient réparties sur plusieurs endroits ;

2) il est souhaitable que l'importance des informations soit variable au cours de la tâche ;

3) enfin, comme le souligne également SPERANDIO, il faut que l'opérateur ait suffisamment de latitude pour adapter ses stratégies opératoires aux exigences du travail. C'est le cas de la supervision de procédé, tâche relativement complexe et qui laisse beaucoup de degrés de liberté à l'opérateur.

Dans ces conditions, l'analyse des variations des modes opératoires, détectées via l'analyse du comportement oculaire, semble être une technique prometteuse pour estimer l'état de charge de l'opérateur.

On peut néanmoins en citer d'ores et déjà quelques limitations. Tout d'abord, un accroissement des exigences de la tâche n'a pas des effets toujours réguliers sur l'activité de l'opérateur /SPERANDIO, 88/. De plus, l'opérateur peut modifier sa stratégie opératoire pour des raisons autres qu'une augmentation de charge. O'DONNEL pense qu'il s'agit d'une technique pouvant être suffisamment sensible (du moins aux grosses variations de charge), mais limitée pour tout diagnostic (d'où l'intérêt d'utiliser simultanément plusieurs indices). De plus, elle est lourde à mettre en œuvre, ce qui en fait une technique a priori peu adaptée pour une évaluation en ligne de la charge momentanée.

Le chapitre suivant décrit une expérimentation ayant pour but de mettre à jour une "batterie" d'indices issus de l'activité oculaire, indices capables de contribuer à une estimation de la charge mentale momentanée.

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE DE LA CHARGE DE TRAVAIL INSTANTANÉE SUR LA PRISE D'INFORMATION VISUELLE

I. INTRODUCTION

II. CHOIX D'UN CONTEXTE EXPÉRIMENTAL

III. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

IV. DONNEES RECUEILLIES

V. EXPERIMENTATIONS PRÉLIMINAIRES

VI. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

VII. CONCLUSION

I. INTRODUCTION

Dans le premier chapitre, l'intérêt de disposer de méthodes capables d'évaluer la charge de travail instantanée est mis en évidence. Une revue des méthodes d'estimation les plus usitées aboutit au constat que, pratiquement, aucune n'est réellement adaptée pour une telle évaluation. La méthode temporelle proposée par MILLOT /87/ est l'une des rares à fournir un indice valide de charge instantanée, sa principale limitation provenant de son champ d'application restreint.

Dans le second chapitre, les travaux consacrés à l'influence de la difficulté de la tâche sur le comportement oculaire aboutissent à des résultats variables, fonction du contexte de l'étude et de la méthodologie employée. La plupart concernent des tâches de pilotage aux instruments, très peu s'intéressent à la supervision de procédé.

Ce troisième chapitre est consacré à l'élaboration d'un protocole expérimental en vue d'étudier l'influence de la charge instantanée sur la prise d'information visuelle d'un opérateur de supervision. Le contexte expérimental est choisi de telle sorte que la méthode temporelle puisse être mise en oeuvre.

Un avis généralement exprimé dans la littérature est qu'une estimation de la charge mentale ne peut reposer sur l'utilisation d'un seul indice. Les expérimentations viseront donc à analyser en détail l'activité de l'opérateur, pour ensuite dégager plusieurs indices de charge. Le but ultime de ces travaux est de pouvoir réaliser en ligne le passage d'un "syndrome de charge" à une estimation valide.

La première partie de ce troisième chapitre est consacrée au choix du contexte expérimental, compte tenu des contraintes liées à l'utilisation de la méthode temporelle d'estimation de la charge de travail. La seconde décrit le dispositif expérimental, notamment les tâches soumises aux sujets ainsi que l'instrumentation mise en œuvre pour enregistrer l'activité oculaire. La troisième partie recense les différentes données, objectives et subjectives, recueillies au cours des expérimentations. La quatrième tire les enseignements d'expérimentations préliminaires visant à éprouver la plate-forme expérimentale ainsi qu'à ajuster les scénarios de test. Le déroulement des expérimentations proprement dites fait l'objet de la cinquième partie.

II. CHOIX D'UN CONTEXTE EXPÉRIMENTAL

II.1 Principe des expérimentations

Les expérimentations sont basées sur un parallèle entre certaines caractéristiques - à définir - du comportement oculaire de l'opérateur et l'indice de charge calculé au moyen de la méthode temporelle. Nous retiendrons pour cela un contexte dans lequel elle a été testée et validée.

Dans un premier temps, la méthode temporelle va être brièvement décrite, en vue d'en cerner le champ d'application. Le choix du travail donné aux sujets pourra alors être effectué, pour terminer par l'élaboration des scénarios de test.

II.2 La méthode temporelle d'évaluation de la charge de travail

II.2.1 Principe

MILLOT /87, 88/ a orienté sa recherche vers l'élaboration d'une méthode objective, transparente pour l'utilisateur, et fournissant un indice de charge de travail "en ligne". Cette méthode repose sur l'observation des flux d'informations échangés entre l'opérateur et la machine :

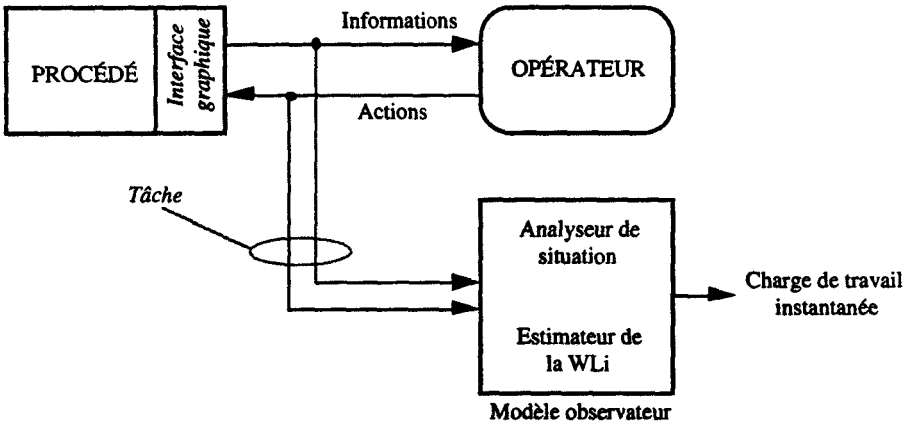


Figure III.1 : Évaluation de la charge de travail à l'aide d'un modèle observateur /BERGER, 92/.

Plusieurs thèses récentes du laboratoire consacrent des développements importants sur la méthode temporelle, que ce soit au niveau de son élaboration , de sa validation expérimentale, ou de ses applications /BERGER, 92//RIERA, 93//DEBERNARD, 93/. Ce qui suit constitue une description très sommaire, visant uniquement à cerner le domaine d'application de la méthode, et à contribuer au choix du contexte expérimental.

Selon MILLOT /88/, la charge de travail correspond au niveau d'activité humaine nécessaire pour faire face aux exigences de la tâche. L'idée de base de la méthode temporelle consiste à définir ces exigences comme le produit de deux termes, le premier traduisant les exigences fonctionnelles de la tâche (difficulté intrinsèque), le second rendant compte des exigences temporelles :

$$exig(t) = \frac{1}{TD(t)} . G(t)$$

avec TD(t) : temps dont dispose l'opérateur à l'instant t pour accomplir la tâche. Si TD est le Temps Disponible initial pour exécuter la tâche, défini a priori, à partir de l'analyse des caractéristiques dynamiques de la tâche ; TD(t) = TD - t.

G(t) : Gravité de la situation, terme rendant compte des exigences fonctionnelles et pondérant les exigences temporelles ; $G(t) \in [0,1]$.

Lorsque l'opérateur "traite" une tâche, il est supposé y investir une "puissance de travail" au moins égale à exig(t). Cette puissance, appliquée pendant un très court instant dt, induit une charge de travail dWl(t) assimilée à l'énergie mobilisée pendant dt :

$$dWl(t) = exig(t) \,.\, dt$$

La charge de travail totale est assimilée à l'énergie totale dépensée pendant la durée requise TR pour accomplir la tâche. Elle est obtenue en intégrant la charge de travail depuis l'instant de début de la tâche jusqu'à l'instant de fin :

$$WL = \int_{td}^{td+TR} exig(t).dt$$

II.2.2 Extension à des contextes multitâches indifférenciés

Le formalisme initial de la méthode temporelle /MILLOT, 87/ a été étendu afin de pouvoir prendre en compte simultanément deux types de tâches /BERGER, RIERA et al., 89//BERGER, 92/ :

• Des tâches "discrètes", qui possèdent une échéance temporelle a priori. Exemple : une alarme survient à l'instant td ; on dispose d'une durée maximale TD pour l'acquitter.

• Des tâches "continues", qui ne possèdent pas ce temps disponible a priori. Elles peuvent être commencées et interrompues à tout moment. Exemples : tâche de poursuite de cible, de régulation manuelle, etc.

Le formalisme proposé par BERGER /92/ permet d'évaluer la charge dans des contextes multitâches indifférenciés, c'est à dire incluant ces deux types de tâches. Les exigences de la situation multitâche tiennent compte à la fois des exigences de la tâche i en cours, de la "pression temporelle" induite par les autres tâches en attente, et de la gravité totale de la situation :

$$exig_i(t) = \frac{1}{TD_i(t)} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{n} TD_j(t)}{\max_j \left(TD_j(t)\right)} \cdot \sum_{j=1}^{n} \frac{G_j(t)}{n}$$

avec n : nombre total de tâches à traiter ;
i : tâche en cours d'exécution à l'instant t.

La charge totale relative à la tâche i est calculée en intégrant les exigences sur la durée d'exécution :

$$WL_i = \int_{td_i}^{td_i+TR_i} exig_i(t).dt$$

Enfin, la méthode temporelle étant basée sur l'hypothèse du canal unique, l'opérateur est supposé exécuter les n tâches séquentiellement. La charge totale est alors calculée en sommant les charges inhérentes à chaque tâche :

$$WL = \sum_{i=1}^{n} WL_i$$

La validation de la méthode temporelle a fait l'objet d'expérimentations en laboratoire dans plusieurs contextes, notamment :

- contexte monotâche continue : tâche de conduite automobile sur simulateur /RIERA, 93/ ;
- contexte multitâche indifférencié : tâche de contrôle d'un procédé fictif /BERGER, 92/.

Dans les deux cas, la méthode temporelle s'est révélée sensible aux exigences de la tâche. Les résultats se sont également avérés cohérents avec ceux obtenus par des méthodes d'estimation subjective (échelle Cooper-Harper modifiée /WIERWILLE & CASALI, 83/, Subjective Workload Assessment Technique /REID & NYGREN, 88/ et NASA Task Load indeX /HART & STAVELAND, 88/).

C'est le dernier contexte expérimental qui a été retenu pour notre étude.

II.3 Travail des sujets

II.3.1 Description des trois types de tâche

La méthode temporelle repose sur l'observation des flux d'informations échangés entre la machine et l'opérateur. Ces flux correspondent aux "événements" provenant de la tâche (i.e. informations transmises à l'opérateur) et aux actions de l'opérateur (i.e. réponses aux événements). Ces événements et actions peuvent être continus ou discrets. BERGER /92/, dans ses expérimentations de validation de la méthode, retient trois types de tâche en fonction de la nature des flux :

- tâche de tracking : action et événement continus ;
- tâche de régulation : action discrète et événement continu ;
- tâche de réponse à un événement : action et événement discrets.

Ce sont ces trois types de tâche qui sont retenus pour nos expérimentations.

Tâche de tracking :

Il s'agit d'une tâche de tracking en compensation, avec commande en vitesse. Un diagramme fonctionnel de la tâche ainsi que son aspect graphique sont présentés en figure III.2. La consigne donnée aux sujets est de minimiser l'écart entre la cible et la mire, sans jamais sortir du domaine d'exécution. La difficulté de la tâche est fixée par la dynamique de la cible.

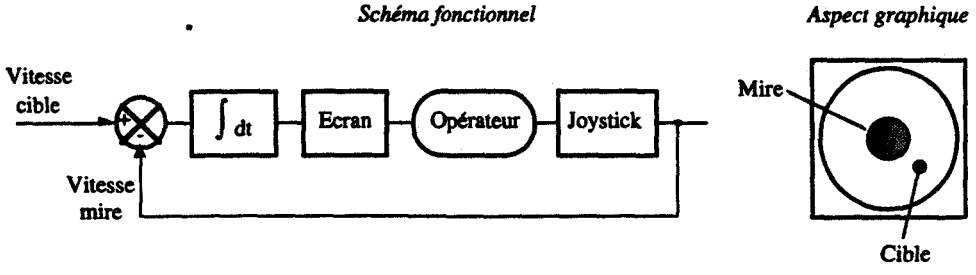


Figure III.2 : Tâche de tracking.

Tâche de régulation :

L'opérateur se voit confier le rôle du régulateur. Il doit maintenir une variable perturbée à l'intérieur de la plage centrale du vernier. Un diagramme fonctionnel de la tâche ainsi que son aspect graphique sont présentés en figure III.3. La difficulté de la tâche est fixée par la dynamique de la perturbation ainsi que par les caractéristiques du système régulé (système du premier ordre).

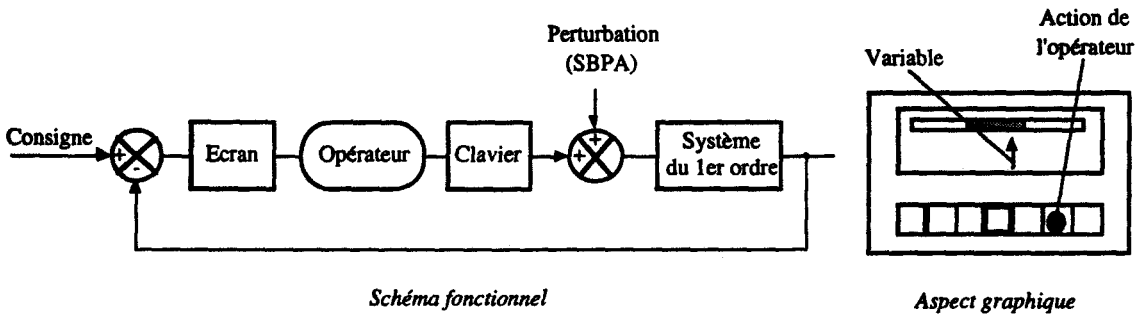


Figure III.3 : Tâche de régulation.

Tâche de réponse à un événement :

A plusieurs reprises en cours d'expérimentation, un même "événement" dépourvu de toute signification particulière survient, signalé visuellement. Le sujet dispose alors d'un certain délai, fixé a priori, pour "acquitter" l'événement en appuyant sur un bouton poussoir prévu à cet effet. La tâche débute donc à l'instant d'occurrence de l'événement et se termine, sauf échec, à l'instant d'acquittement.

La figure III.4 présente l'aspect graphique de la tâche. L'événement est matérialisé par un petit curseur, de couleur verte en situation "normale", et situé en haut d'un barre-graphe représentant le temps disponible pour l'acquitter. Lorsque l'événement est activé, le curseur devient rouge et "chute" le long du barre-graphe. A chaque instant, la distance le séparant du bas du barre-graphe matérialise le temps qui reste à l'opérateur pour réagir.

Les paramètres déterminant la difficulté de la tâche sont le temps disponible pour acquitter l'événement et le nombre d'occurrences de l'événement au cours de l'expérimentation. La consigne donnée aux sujets est d'acquitter les événements le plus rapidement possible dans le temps imparti.

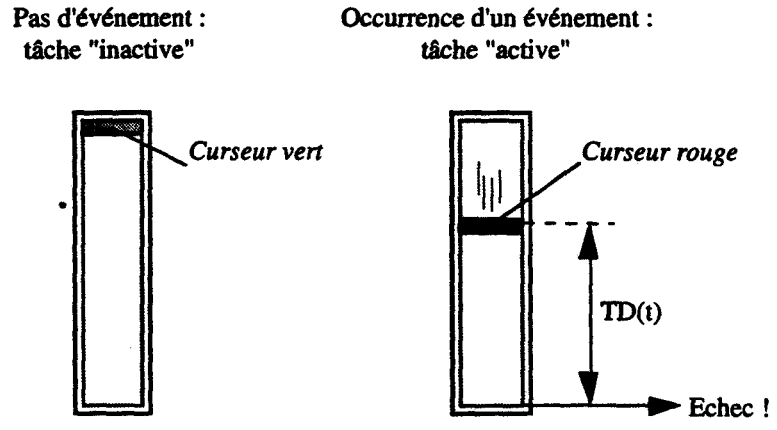


Figure III.4 : Tâche d'acquittement d'événement.

II.3.2 Situation multitâche

BERGER /92/, dans ses expérimentations de validation de la méthode temporelle, fait varier la difficulté globale des scénarios de test en modifiant le nombre et la difficulté de chaque type de tâche. Le but de nos travaux est d'étudier la prise d'information visuelle, cette dernière étant naturellement dépendante du contenu du champ visuel. C'est pourquoi nous utiliserons toujours la même "configuration" de tâches, en modifiant uniquement la difficulté de chacune pour fixer le niveau d'exigence global de la situation multitâche.

Le problème se pose maintenant de déterminer le nombre et la nature des tâches à soumettre aux sujets. Pour cela, il convient de tenir compte de deux "contraintes" capitales. La première, d'ordre méthodologique, est liée à la mise en oeuvre de la méthode temporelle. La seconde, d'ordre physiologique, est liée à l'analyse de l'activité oculaire :

1) Le formalisme de la méthode temporelle a brièvement été présenté dans le paragraphe précédent. Il n'est exploitable que si l'on connaît, à chaque instant, la tâche en cours d'exécution (hypothèse du canal unique). BERGER /92/ se base sur une analyse de l'activité manuelle de l'opérateur. Cette solution n'est envisageable que lorsque ses actions sont fréquentes, ce qui n'est pas le cas lors des phases de "surveillance pure". Aussi BERGER propose-t-il de prendre en compte l'activité oculaire de l'opérateur au niveau de "l'analyseur de situation" du modèle observateur.

2) Les capteurs utilisés pour enregistrer les mouvements oculaires ne fournissent "que" la direction du regard. Ils permettent de connaître l'information qui a probablement été prélevée en vision centrale. Il s'agit d'une partie seulement du matériau visuel prélevé à chaque fixation, l'apport de la vision périphérique - impossible à connaître avec l'oculomètre - étant également important (voir le premier chapitre, § IV.1.4). Autrement dit, l'activité oculaire n'est exploitable avec la méthode temporelle que si l'apport d'information provenant de la périphérie est négligeable. A cette condition, il est raisonnable de supposer que la direction du regard de l'opérateur coïncide avec son attention, et qu'elle indique la tâche en cours d'exécution.

Les tâches sont présentées sur l'écran d'une station de travail, figure III.5 (écran graphique de 19 pouces). Il convient de réaliser un compromis entre la taille de leurs fenêtres graphiques respectives et l'espacement entre ces différentes fenêtres. Une solution consiste à retenir un nombre restreint de cinq tâches, et à les placer aux quatre coins ainsi qu'au centre de l'écran. Cette disposition a l'avantage de maximiser les distances entre tâches. Combinée avec la taille restreinte des fenêtres (de l'ordre du quart de celle de l'écran) et les choix au niveau du graphisme (taille et couleur des objets), elle permet de supprimer toute perception en vision périphérique. Cette manière de faire, certes totalement artificielle, est une condition sine qua non pour la mise en oeuvre de la Méthode Temporelle.

Pour réaliser le choix du type des tâches, nous avons considéré leurs aspects moteurs. Une tâche de tracking nécessitant une action quasi-continue sur le joystick, une seule est possible. L'opérateur agit sur les tâches de régulation et sur les tâches d'acquittement via des boutons poussoirs (deux pour les premières, un seul pour les secondes). Pour des raisons liées tant à la mise en oeuvre de l'oculomètre qu'à celle de la méthode temporelle, il est souhaitable que les sujets ne quittent pas du regard l'écran de la station de travail. Dans ces conditions, un clavier fonctionnel à six touches paraît une taille raisonnable, permettant le recours à deux tâches de régulation et deux tâches d'acquittement d'événement.

La figure III.5 présente la configuration de tâches adoptée. Les sujets qui ont pris part aux expérimentations sont tous droitiers. La tâche de tracking a donc été placée du même côté que l'organe d'action, à droite et en haut de l'écran. Pour éviter toute confusion lors du maniement du clavier spécialisé, les deux tâches de régulation ont été placées à gauche de l'écran, dans chaque coin. La disposition des touches sur le clavier fonctionnel, présentée également en figure III.5, respecte cette disposition. Les deux tâches d'acquittement d'événement ont été placées aux deux emplacements vacants.

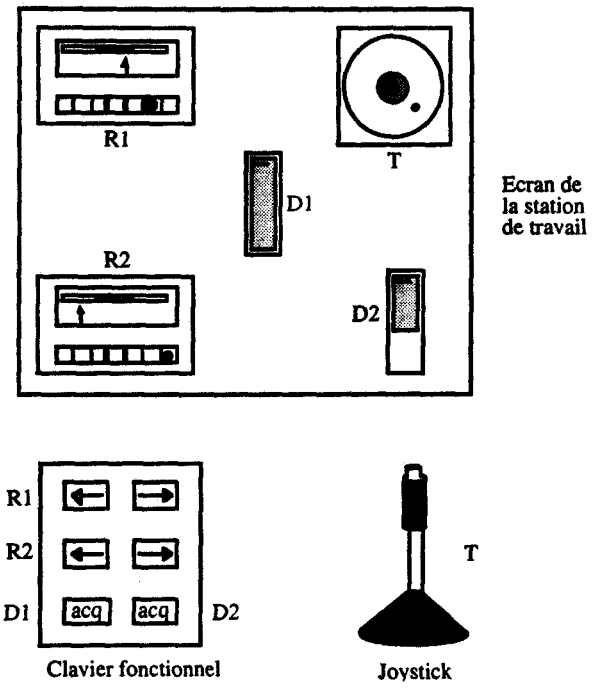


Figure III.5 : Disposition des 5 tâches.

II.4 Scénarios de test

Le "travail" des sujets consiste à exécuter simultanément les cinq tâches, toutes indépendantes et de priorités égales. Les informations relatives à ces cinq tâches n'ont aucun contenu sémantique. Le travail de l'opérateur consiste donc, en quelque sorte, en une tâche de supervision -"non cognitive"- d'un procédé fictif.

La consigne donnée aux sujets avant chaque expérimentation est de minimiser les écarts, pour les tâches de tracking et de régulation, et d'acquitter le plus rapidement possible, et dans le temps imparti, les événements associés aux tâches discrètes. Des zones "d'écarts admissibles" ont été définies empiriquement pour les tâches de tracking (mire centrale, de couleur verte) et de régulation (zone centrale du vernier, de couleur verte également). Les curseurs matérialisant les événements associés aux tâches discrètes étant verts en situation "normale", une formule résumée de la consigne donnée aux sujets est de "maintenir toutes les variables dans le vert".

Le but des expérimentations est d'étudier l'influence de la charge de travail instantanée sur la prise d'information visuelle. Pour cela, un seul scénario est utilisé, durant lequel se succèdent des périodes de charge "faible" et des périodes de charge "élevée". Ces deux niveaux de charge sont fixés en ajustant les caractéristiques intrinsèques des cinq tâches, suite à des expérimentations préliminaires (décrites ultérieurement). A "l'intérieur" de chaque niveau, la méthode temporelle permet de détecter les "pics" de charge éventuels.

On espère ainsi pouvoir étudier, en première étape, l'influence des grosses variations de charge sur le comportement oculaire. En complément, une étude de la sensibilité des indices de charge - évalués à partir de l'analyse des mouvements oculaires - devra être réalisée.

Le paragraphe suivant décrit le dispositif expérimental mis en œuvre.

III. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

III.1 Le "simulateur"

III.1.1 Architecture matérielle

La figure III.6 ci-dessous décrit la plate-forme développée pour les expérimentations. Cette plate-forme s'articule autour d'un calculateur temps-réel (µVax Digital) qui réalise les principales fonctions suivantes :

• A partir des paramètres d'un scénario de test particulier, gestion graphique des cinq tâches (rafraîchissement toutes les 0,1 s. pour le tracking, et toutes les 0,3 s. pour les quatre autres tâches) et génération des perturbations les affectant.

• Acquisition des actions de l'opérateur sur le joystick (échantillonnage à 10 Hz) et sur le clavier fonctionnel (instant d'appui au 1/100ème de seconde).

• Archivage des actions de l'opérateur et de l'état des variables, pour calculs ultérieurs (notamment les calculs de performance et de charge de travail).

L'affichage est réalisé sur l'écran d'une station de travail (VaxStation 3100). Le sujet est assis à une distance d'environ 60 cm ; les accoudoirs de son fauteuils supportent le joystick et le clavier. L'écran graphique - 19 pouces - correspond à un champ visuel d'environ 30° en horizontal et 25° en vertical. Une attention particulière est portée à l'ambiance lumineuse et sonore, maintenue constante au cours des expérimentations.

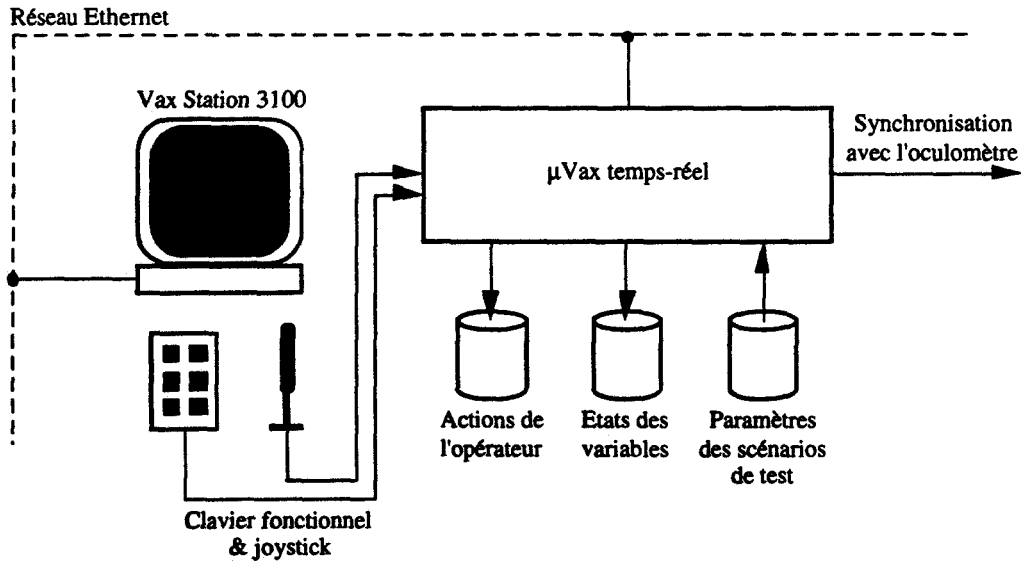


Figure III.6 : Architecture matérielle du simulateur.

Remarque : Les développements logiciels ont été réalisés en langage Pascal, autour du noyau temps-réel ELN de chez Digital, et sous l'environnement graphique X11.

III.1.2 Implémentation des cinq tâches et difficulté des scénarios

Quelques compléments d'informations sont maintenant donnés concernant l'implémentation des cinq tâches, et notamment les paramètres permettant de faire varier leur difficulté.

Tâche de tracking :

La difficulté de la tâche est fixée par la dynamique de la cible et par le gain du joystick (voir figure III.2). Si (o, u, v) est un repère orthonormé lié à la fenêtre graphique de la tâche de tracking, la vitesse de la cible est :

$$\overrightarrow{V_{cible}} = A.\left(\cos(\omega t)\vec{u} + \sin(\omega t)\vec{v}\right)$$

Si G_j est le gain du joystick, l'opérateur peut appliquer à la mire une vitesse maximale de $\pm (G_j.A)$. Les trois paramètres fixant la difficulté de la tâche de tracking sont donc A, ω, et G_j.

Tâche de régulation :

La variable à "réguler" est la sortie d'un système du premier ordre, "saturée" à $\pm$ 1. La perturbation, générée à l'aide d'une Séquence Binaire Pseudo-Aléatoire, agit directement sur l'entrée du système sous la forme d'un échelon d'amplitude $\pm$ 1,5 (+1,5 quand la sortie de la SBPA vaut 1, -1,5 quand elle vaut 0). L'action correctrice de l'opérateur prend sa valeur dans l'ensemble {-3,-2,-1, 0,+1,+2,+3}. L'opérateur agit au moyen de deux boutons poussoirs, lui permettant d'incrémenter et de décrémenter de 1 son action.

Les paramètres fixant la difficulté de la tâche sont donc les caractéristiques du système du premier ordre, le gain statique K et la constante de temps τ, ainsi que les caractéristiques de la SBPA, le nombre de cellules N et la période de décalage T.

Tâche de réponse à un événement :

Sa difficulté dépend de la fréquence d'occurrence de l'événement, ainsi que du temps alloué pour l'acquitter.

Difficulté des scénarios :

L'ensemble des paramètres qui viennent d'être mentionnés permet d'ajuster la difficulté globale du travail donné aux sujets. Des expérimentations préliminaires ont été réalisées afin de définir deux "jeux de paramètres", correspondant à des niveaux de difficulté faible et élevé. Durant les expérimentations proprement dites, les variations de charge seront provoquées en alternant, de manière pseudo-aléatoire, les deux niveaux de difficulté globale.

III.2 L'instrumentation oculométrique

III.2.1 Le capteur ASL (mesure des mouvements oculaires)

Le capteur utilisé pour nos expérimentations est un oculomètre ASL (Applied Science Laboratories) modèle 3000. La figure III.7 ci-dessous en fournit un schéma synoptique :

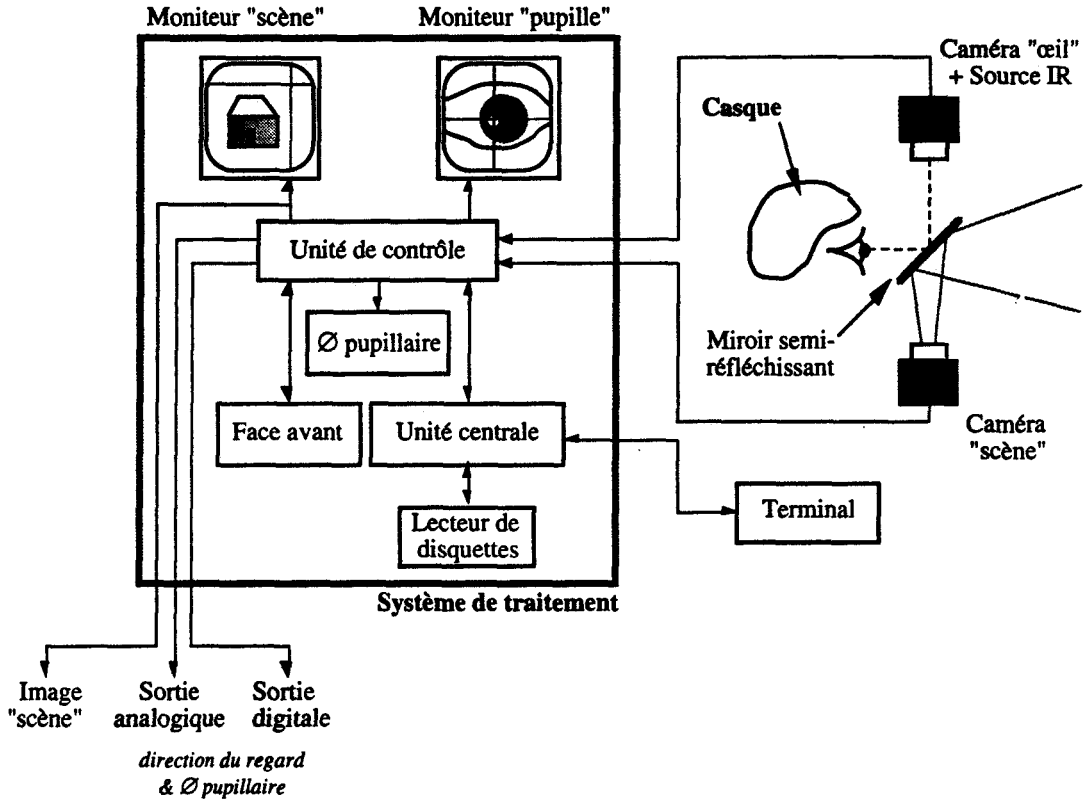


Figure III.7 : L'oculomètre ASL /ASL, 89/.

Le capteur ASL est basé sur la technique du vecteur cornéen : Une source infrarouge éclaire l'œil via un miroir semi-réfléchissant. L'image de l'œil est recueillie par une caméra, via le même miroir (voir figure III.7, partie "casque"). Cette image contient la pupille - dont les propriétés optiques, combinées avec l'éclairement, font qu'elle est particulièrement brillante - ainsi que le reflet quasi-ponctuel de la source IR sur la cornée. Les barycentres de ces deux "formes" sont extraits par des techniques de traitement d'image et définissent le "vecteur cornéen". Une relation trigonométrique très simple lie ce vecteur à la direction du regard (direction relative, i.e. par rapport à la tête). Cette dernière est matérialisée par un réticule incrusté, suite aux traitements numériques, dans l'image scène recueillie par une seconde caméra solidaire également du casque.

L'utilisation du capteur nécessite naturellement une phase préalable de "calibration" : le sujet est invité à "fixer du regard" successivement les neuf points d'une mire pré-définie. Le calculateur ASL, après détermination de divers coefficients, fournit alors la direction du regard à la fréquence de 60 Hz (sous trois formes : analogique, numérique - port parallèle - et vidéo -image scène contenant le réticule-).

Les enregistrements vidéo obtenus permettent de se faire une idée "très grossière" du comportement oculaire de l'opérateur. L'étape suivante consiste à "quantifier" la prise d'information, c'est à dire à obtenir les fixations successives à l'intérieur du champ visuel. Une technique possible consiste à "dépouiller" ces enregistrements vidéo, "manuellement" ou à

l'aide d'un système semi-automatique (dans les deux cas, il faut procéder image par image !). Il s'agit là d'une technique très longue, très fastidieuse, et peu adaptée pour une analyse quantitative des mouvements oculaires (pour plus de détails sur les techniques de dépouillement, voir /ROUSSEAU et al., 89/).

Pour remédier à ces "inconvénients", le laboratoire a développé un système entièrement automatique qui, utilisé conjointement avec l'oculomètre ASL, fournit les fixations oculaires dans un repère lié à la scène (direction absolue du regard). Une brève description de ce système est maintenant donnée.

III.2.2 Le système "tout-automatique" du LAIH (mesure des mouvements de tête)

Son but est de mesurer les mouvements de la tête par rapport à la scène. L'oculomètre fournissant la direction du regard par rapport à la tête, la combinaison des deux informations permet - par une procédure de changement de repère - de mesurer la direction absolue du regard.

Contrairement à la plupart des systèmes, qui visent à l'obtention de la position et de l'orientation de la tête par rapport à la scène (six paramètres !), le système du LAIH a recours à une technique totalement originale :

Des émetteurs infrarouges sont disposés autour du champ visuel, de sorte à définir un repère fixe. Ces cibles lumineuses sont filmées, en même temps que la "scène", par la caméra champ du casque ASL. Le signal vidéo est envoyé, d'une part, vers le système de traitement de l'ASL et, d'autre part, vers le système LAIH (Architecture multiprocesseur, construite autour d'un rack VME sous Versados /CHAMMAM, 87/). Ce dernier, par traitement d'image, détermine les positions successives des trois marqueurs infrarouge dans l'image scène. Des calculs géométriques, qui ne sont pas ici détaillés (voir /BERNARD, 94/), permettent d'obtenir les mouvements de la tête dans le repère matérialisé par les trois émetteurs IR, i.e. les mouvements de la tête par rapport à la scène.

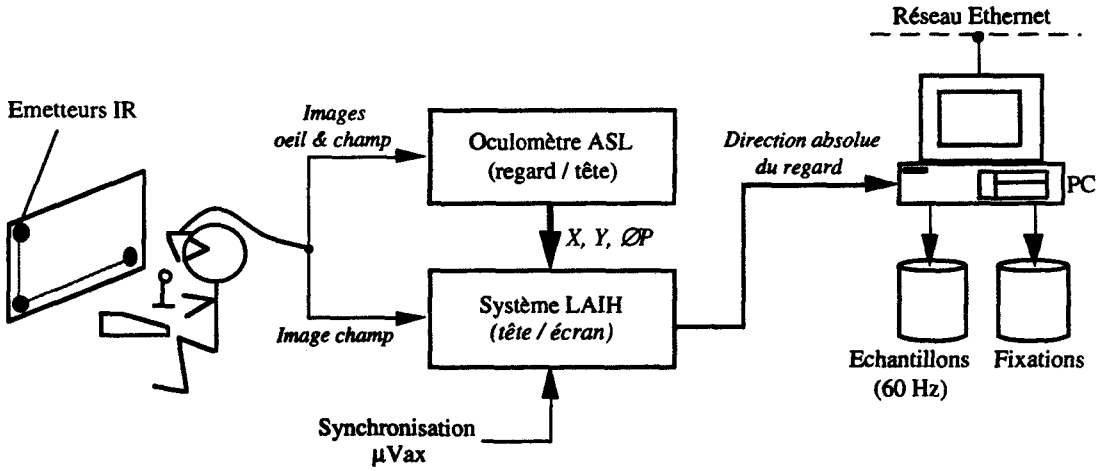


Figure III.8 : Mesure de la direction absolue du regard, à l'aide du système automatique développé au LAIH.

La figure III.8 fournit un schéma synoptique du système automatique qui vient d'être décrit. On y remarque trois émetteurs IR balisant l'écran de la station de travail, et définissant le repère dans lequel les coordonnées des fixations sont calculées. Les "mesures" de l'oculomètre ASL et du système LAIH sont transmises, suite à chaque expérimentation, à un compatible PC qui réalise l'agrégation des "échantillons" en fixations oculaires (Les échantillons sont fournis à la fréquence de 60 Hz, et comprennent en fait trois valeurs : les déviations angulaires horizontale et verticale, ainsi que le diamètre pupillaire. Un diamètre nul indique des données non-valides). Pendant les expérimentations, l'acquisition des mouvements oculaires est déclenchée par le calculateur Digital (décrit au paragraphe précédent) afin de pouvoir mettre en correspondance l'activité oculaire de l'opérateur, son activité manuelle et l'état des variables du "procédé".

III.2.3 Précision de la chaîne de mesure

• Capteur ASL : Les données du constructeur sont les suivantes :

- Plage de mesure (tête fixe) : - environ ± 35° horizontalement ;
  - environ ± 25° verticalement.
- La précision obtenue dépend naturellement de "l'excentricité du regard" par rapport à la position de repos. Elle est de l'ordre de ± 0,5° dans les cas "favorables", et ± 1° dans la "périphérie" du champ de mesure.

Remarques :

- Les plages de mesure horizontale et verticale peuvent paraître limitées. Il faut ici rappeler que les oculomètres "type ASL" laissent les sujets totalement libres de leurs mouvements de tête. Or, des études sur la coordination œil-tête montrent qu'une rotation de l'œil de plus de 30° par rapport à sa position de repos s'accompagne généralement d'un mouvement "compensateur" de la tête (/MASSE, 76/ et /ROBINSON, 79/, cités dans /SIMON, 89/).
- La précision obtenue avec la technique du vecteur cornéen n'est pas foncièrement meilleure que celle obtenue avec certaines techniques moins évoluées (telles que celle du reflet cornéen). Cependant, elle a l'avantage d'être basée sur une "mesure différentielle" - reflet cornéen par rapport à la pupille -, et tolère ainsi les légers glissements inévitables de l'oculomètre sur la tête du sujet.

• Système LAIH : Une thèse récente du laboratoire est consacrée, en grande partie, au système "tout-auto" et à ses applications /BERNARD, 94/. L'auteur, à la suite d'une évaluation des performances du système, rapporte les résultats présentés en figure III.9 :

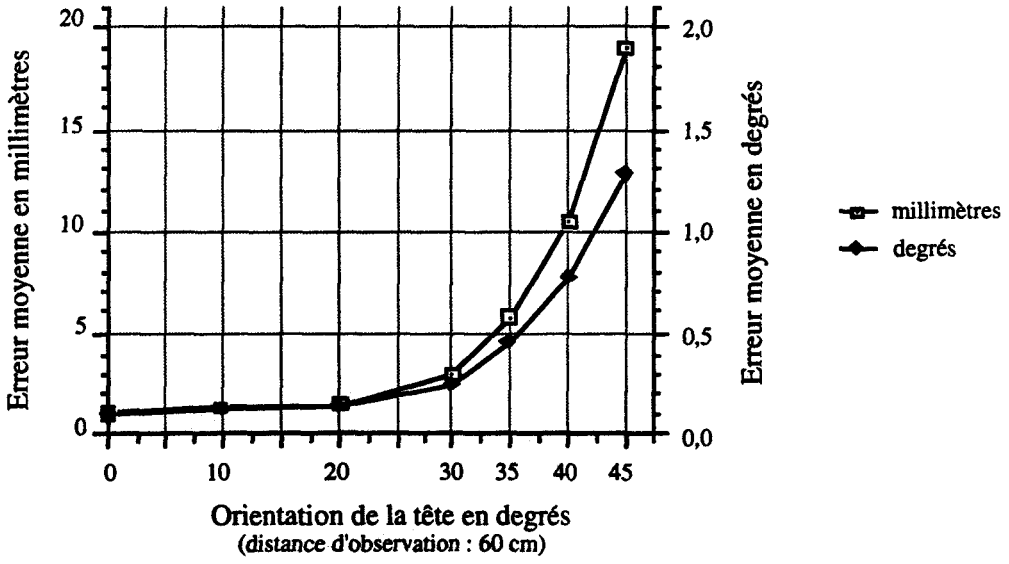


Figure III.9 : Précision du système "tout-auto" du LAIH /BERNARD, 94/.

Ces résultats concernent le système LAIH seul, abstraction faite du capteur ASL. Lorsque les mouvements de tête n'excèdent pas 35°, l'erreur moyenne est inférieure à 0,5°.

Autrement dit, dans les conditions d'utilisation qui sont les nôtres (champ visuel de l'ordre de 30° horizontalement et 25° verticalement), les précisions des deux "maillons" de la chaîne de mesure sont équivalentes : de l'ordre de ± 0,5°. On obtient une précision globale de ± 1°, soit ± 1 cm sur l'écran de la station de travail. Il s'agit là d'une précision satisfaisante, étant donné le contenu graphique de l'écran.

IV. DONNÉES RECUEILLIES

IV.1 État des variables et actions manuelles de l'opérateur

• *État des variables :*

Les "variables" relatives à la tâche de tracking et aux deux tâches de régulation sont archivées à la fréquence de 10 Hz.

Concernant la tâche de tracking, sont sauvegardées la position de la cible (en cm*100) ainsi que sa vitesse (en cm/s * 100).

Pour les tâches de régulation, les sorties des deux systèmes du premier ordre sont sauvegardées, "saturées" à ± 1 (en ‰).

• *Actions manuelles :*

La position du joystick, qui définit le vecteur vitesse de la mire du tracking, est échantillonnée à 10 Hz, en même temps que les variables (en cm/s * 100).

Pour les tâches discrètes et celles de régulation, les appuis sur les touches du clavier fonctionnel sont mémorisés avec la "date" correspondante de l'horloge du calculateur temps-réel Digital (au 1/100ème de seconde).

• *Critères de performance :*

La figure III.10 ci-dessous fournit une description cotée des trois types de tâches. Les "domaines d'évolution" des différentes variables sont équivalents. Aussi, un premier critère de performance provient de la somme des écarts observés sur la tâche de tracking et les deux régulations (écarts par rapport à la zone centrale, hachurée sur la figure). Un second critère de performance consiste en la somme des durées avant acquittement, pour les deux tâches discrètes.

Ces critères de performance serviront essentiellement à suivre l'évolution de l'apprentissage des sujets.

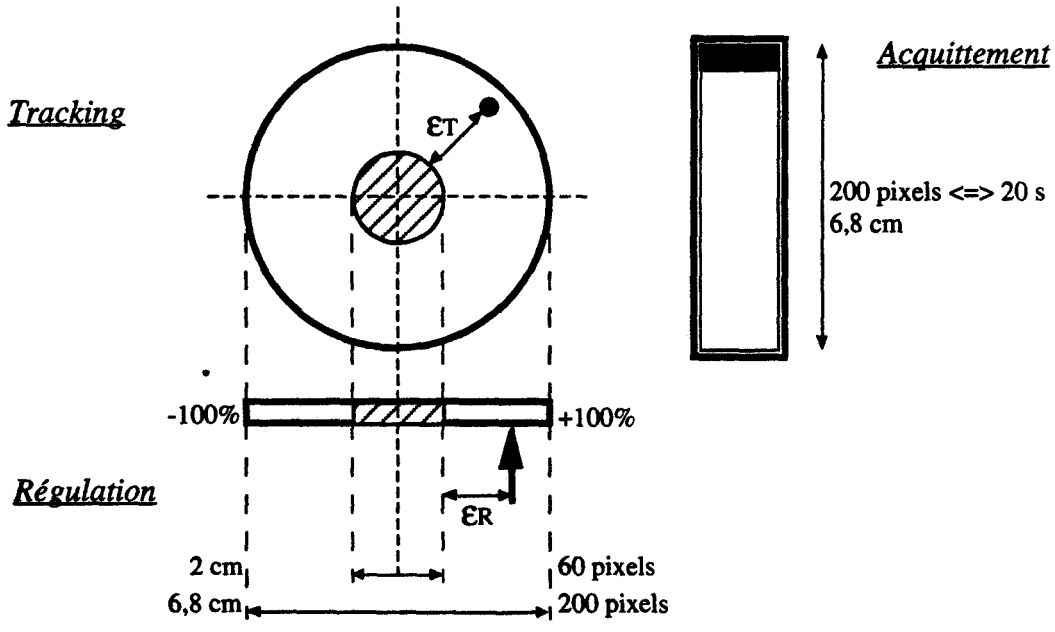


Figure III.10 : Schéma coté des trois types de tâches.

IV.2 Données oculométriques

Suite à chaque expérimentation, la chaîne de mesure oculométrique fournit un fichier contenant les "positions successives du regard", stockées à 60 Hz, les coordonnées x-y étant fournies dans un repère lié au champ visuel. Le problème se pose alors d'agréger ces échantillons, qui n'ont aucune réalité physiologique, en fixations oculaires.

La frontière entre une saccade et une fixation n'est pas franchement établie. Une fixation, loin de correspondre à une immobilité du regard, est "entachée" de micro-mouvements "physiologiques" /ACIER, 90/. Il convient donc d'établir des critères, spatiaux et temporels, pour séparer les deux entités "fixation" et "saccade" :

• Concernant le critère temporel, ROUSSEAU /93/ se base sur les travaux de LOFTUS /81/ qui tendent à montrer que 100 ms serait le seuil à partir duquel une reconnaissance "fiable" d'une image puisse apparaître. Il retient donc cette valeur de 100 ms - soit 6 échantillons du capteur - comme durée minimale d'une fixation. Par ailleurs, aucune durée maximale n'a jamais été mise en évidence (Critère n° **1**).

• Concernant le critère spatial, il est possible de se baser sur des données physiologiques de l'œil.

Tout d'abord, une fixation coïncide - généralement - avec une prise d'information en vision fovéale ; si on appelle vision fovéale celle qui utilise la zone de la rétine composée exclusivement de cônes (voir le premier chapitre, § IV.1.1), elle correspond à un diamètre apparent compris entre 54' d'arc et 1° 40' d'arc /LE GRAND, t. II, 72/, cité dans /SIMON, 89/.

Ensuite, concernant les micro-mouvements affectant le regard pendant une fixation, les auteurs en citent généralement trois types : des petits tremblements, encore appelés micro-nystagmus, des dérives lentes et des micro-saccades "de rattrapage" /LEVY-SCHOEN, 69//MASSE, 76/. Les chiffres varient selon les auteurs, mais il paraît "raisonnable" d'assimiler une fixation à une aire de l'ordre de 30' d'arc.

Compte tenu de ces données physiologiques, et en considérant la précision de l'instrumentation mise en œuvre, un critère spatial de ± 1° a été retenu (Critère n° **2**) /BERNARD, 94/.

Pour identifier les fixations, l'algorithme utilisé consiste en un processus d'agrégation autour du barycentre d'un ensemble évolutif de points /ACIER, 90/. La figure III.11 en fournit une illustration : le test d'appartenance à un groupe s'effectue en vérifiant si le nouvel échantillon est compris dans un cercle ayant pour centre le barycentre du groupe courant, le rayon du cercle étant égal à 1° (critère - spatial - n° 2, décrit précédemment). Un groupe doit, pour être assimilé à une fixation, contenir au moins 6 échantillons (critère - temporel - n° 1).

Il est "toléré" que certains points s'écartent du barycentre d'une distance supérieure au critère, sans que la fixation soit pour autant terminée. C'est le cas des données non valides, correspondant à un "parasitage", à un clignement de l'œil, ou encore à la perte d'un marqueur infrarouge. Trois points parasites consécutifs sont "autorisés", qui n'interviendront pas dans le calcul du barycentre du groupe. Au delà de trois points parasites, une nouvelle fixation est recherchée. Elle pourra éventuellement être fusionnée avec la fixation précédente, si leurs barycentres respectifs sont espacés de moins de 1°. Cette distance constitue le second critère spatial (Critère n° **3**).

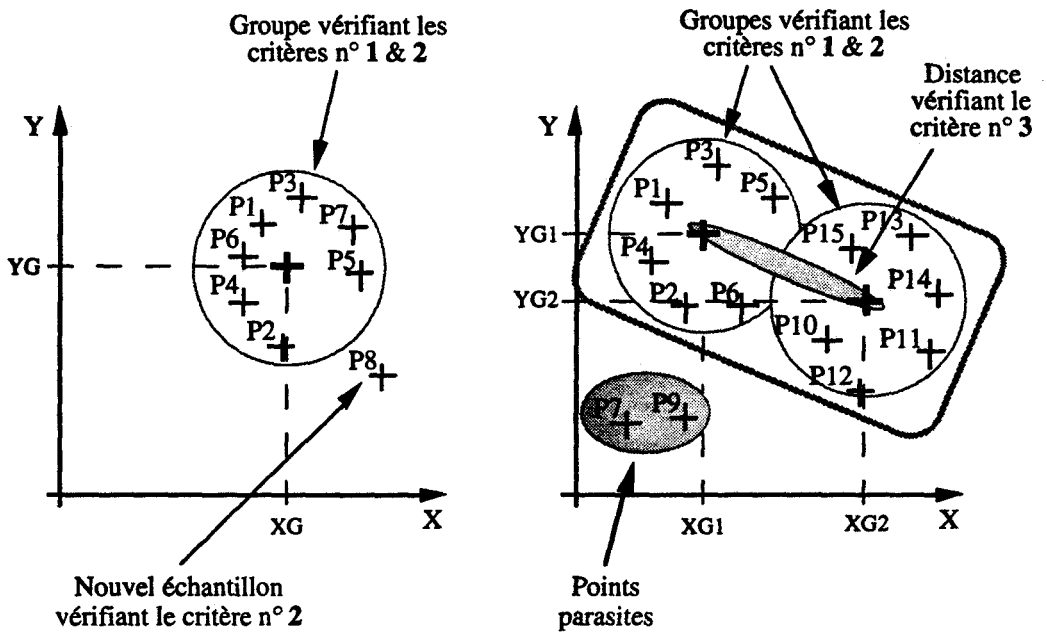


Figure III.11 : Agrégation des échantillons ASL en fixations /BERNARD, 94/.

IV.3 Indices de charge de travail

IV.3.1 Charge globale : échelle de Cooper-Harper Modifiée

Pour évaluer la charge de travail globale, c'est à dire relative à la totalité d'un scénario de test, une échelle de Cooper-Harper modifiée a été utilisée.

L'échelle de Cooper-Harper est l'une des méthodes subjectives les plus anciennes, mais également l'une des plus utilisées. A l'origine, elle était dédiée à l'évaluation de la manœuvrabilité des avions ("aircraft handling characteristics"). Elle s'est avérée particulièrement sensible à la charge de travail du pilote /HART, 86/. Une nouvelle version a donc été extrapolée, l'échelle de Cooper-Harper Modifiée, totalement dédiée à l'évaluation de la charge de travail et dans des situations très variées /WIERWILLE & CASALI, 83//SKIPPER et al., 86/. L'échelle "CHM" a été testée à maintes reprises et sa sensibilité a été mise en évidence /WIERWILLE et al., 85//HILL et al., 92/.

L'échelle CHM se présente sous la forme d'un arbre de décision, guidant l'opérateur vers une estimation numérique comprise entre 1 et 10. Elle a été choisie pour sa simplicité, tant de mise en œuvre que d'utilisation par les sujets.

IV.3.2 Charge instantanée : Méthode Temporelle

• *Formalisme* : •

Le principe de la méthode temporelle a été décrit au paragraphe II.2. BERGER /92/ a étendu le formalisme initial afin de tenir compte, simultanément, de tâches discrètes et continues. Il propose comme estimateur de la charge de travail échantillonnée :

$$WL_{ij} \approx \frac{\Delta T \cdot \sum_{k=1}^{n} TD_{skj}}{TD_{sij} \cdot \max_k (TD_{skj})}$$

où TD_{sij} est la valeur du temps disponible subjectif pour la tâche i, durant le $j^{ème}$ échantillon, et n le nombre de tâches. Lorsqu'une tâche n'est pas en cours d'exécution, la charge échantillonnée due à cette tâche est nulle.

Pour calculer les temps disponibles subjectifs, on suppose que l'opérateur a un bon modèle interne de la dynamique des variables. Concernant la tâche de tracking et celles de régulation, on calcule pour chaque échantillon le temps disponible avant sortie du domaine d'exécution, compte tenu de la vitesse d'évolution et de la valeur de la variable. Concernant les tâches discrètes, le temps disponible est infini en l'absence d'événement. Dans le cas contraire, il est égal à la différence entre le temps disponible a priori - temps alloué à la tâche - et la durée depuis l'occurrence de l'événement.

Le point délicat, pour la mise en œuvre du formalisme, concerne l'analyse de l'activité manuelle et oculaire de l'opérateur en vue de déterminer, à chaque instant - ou échantillon -, la tâche en cours d'exécution.

• *Détermination de "la tâche en cours"* :

Pour cela, nous nous inspirons des travaux de BERGER /92/ et reprenons sa suggestion de prendre en compte l'activité oculaire pour déterminer les instants de début des tâches (td_j, dans les formules). L'instant de fin coïncide soit avec la fin de la consultation, soit avec une action sur la tâche (action discrète, et donc "datée"), du moins pour les tâches discrètes et de régulation. Il semble par contre impossible de procéder de cette manière concernant la tâche de tracking (action continue !), pour laquelle nous considérerons uniquement l'activité oculaire.
Cette façon de procéder n'est "pertinente" que si l'opérateur effectue les cinq tâches séquentiellement, en n'utilisant que les propriétés de la vision centrale. Cette hypothèse doit naturellement être soumise à vérification.

La figure III.12 qui suit fournit un exemple de chronogramme de l'activité de l'opérateur, déduit à partir de ses mouvements oculaires et de ses actions manuelles de la manière suivante :

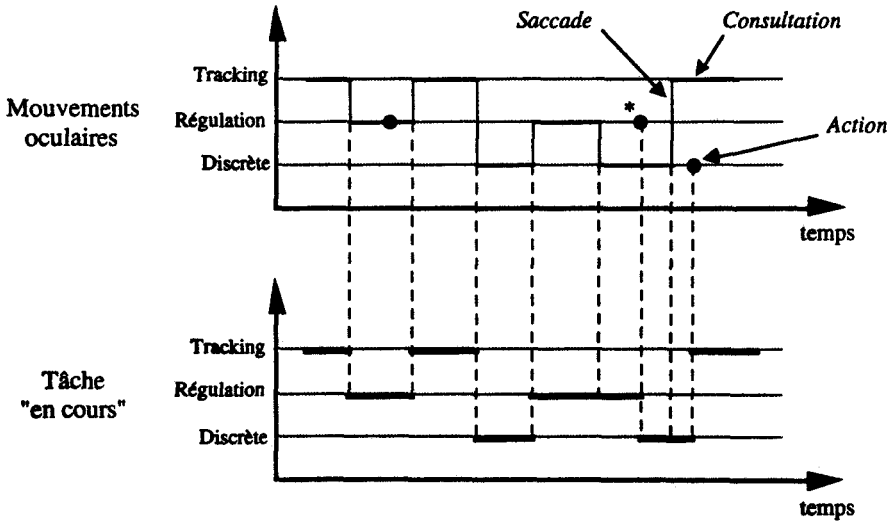


Figure III.12 : Chronogrammes de l'activité de l'opérateur (seul un exemplaire de chaque type de tâche est présenté).

La courbe du haut est un chronogramme des consultations : chaque segment horizontal regroupe un ensemble de fixations consécutives sur la même tâche. La durée de chaque saccade est inclue dans la fixation immédiatement précédente. En effet, à cause du phénomène de suppression saccadique (décrit au 1^{er} chapitre, au § IV.1.2), on considère que l'opérateur travaille, au cours des mouvements, sur la base des informations prélevées au cours de la fixation précédente. Les points matérialisent les actions manuelles.

La courbe du bas présente le chronogramme de l'activité de l'opérateur qui en est déduit. L'instant de début de tâche coïncide avec le début de la consultation de cette tâche.

La dynamique de l'œil étant supérieure à celle de l'ensemble poignet-main, on "tolère" qu'une action discrète soit effectuée juste après la consultation de la tâche (cas repéré par une "*" sur la figure III.12). Ainsi, l'instant de fin de tâche coïncide soit avec la fin de la consultation (consultation "de surveillance", pour reprendre la terminologie de HARRIS /86/), soit avec l'action de l'opérateur (consultation "de commande").

V. EXPÉRIMENTATIONS PRÉLIMINAIRES

L'objectif de ces expérimentations préliminaires est triple :

- tout d'abord, éprouver le dispositif expérimental, tant au niveau matériel que logiciel ;
- ensuite, vérifier le bien-fondé de la prise en compte de l'activité oculaire, telle qu'elle a été décrite au paragraphe précédent, au sein de la méthode temporelle ;
- enfin, ajuster les paramètres des cinq tâches afin d'obtenir plusieurs niveaux de charge de travail.

V.1 Scénarios de test et déroulement

Trois "jeux" de paramètres ont été déterminés, de manière totalement empirique, et sont associés à trois scénarios de difficulté globale qualifiée subjectivement de "faible", "moyenne", et "élevée". Une session de test comprend ces trois scénarios, suivi chacun d'une évaluation subjective de la charge de travail globale, réalisée au moyen d'une échelle de Cooper-Harper Modifiée.

L'expérience montre qu'il est souhaitable de limiter le port de l'oculomètre (casque ASL) à des durées de l'ordre d'une vingtaine de minutes. Au-delà, les sujets se plaignent généralement d'une fatigue visuelle "prématurée" (due probablement autant à l'effort de concentration qu'au port du capteur). La durée d'un scénario a donc été fixée à trois minutes, la session se déroulant comme suit :

- cinq minutes pour le réglage de l'oculomètre (en pratique, il s'agit d'une opération de durée très variable, fonction des sujets) ;

- trois minutes pour chaque scénario, suivies de deux minutes pour la réponse à l'échelle CHM et pour la correction éventuelle des réglages du capteur (la lecture de l'échelle CHM - version "paper & pencil" - a provoqué, chez presque tous les sujets, des glissements du casque ASL, nécessitant d'ajuster les réglages entre deux tests d'une même session).

Quatre sujets ont pris part aux pré-expérimentations. Tous sont droitiers et ont la vue non corrigée.

Avant la session de test, chaque sujet est soumis à plusieurs sessions d'apprentissage personnalisées (de 1 à 3 heures, selon les sujets). Les scénarios utilisés, de difficultés croissantes, visent à habituer progressivement les sujets au maniement de la "maquette" - et notamment à l'utilisation "en aveugle" du clavier fonctionnel - ainsi qu'au port de l'oculomètre. L'apprentissage prend fin lorsque le sujet semble satisfait de son "travail" et que sa performance (mesurée au moyen des critères présentés au § IV.1), suite à plusieurs tests de difficulté élevée, est relativement stable.

V.2 Résultats des expériences préliminaires

• *Niveaux de difficulté et charge de travail globale :*

La figure III.13 ci-dessous présente les résultats obtenus avec l'échelle Cooper-Harper Modifiée, pour les 4 sujets et les 3 niveaux de difficulté :

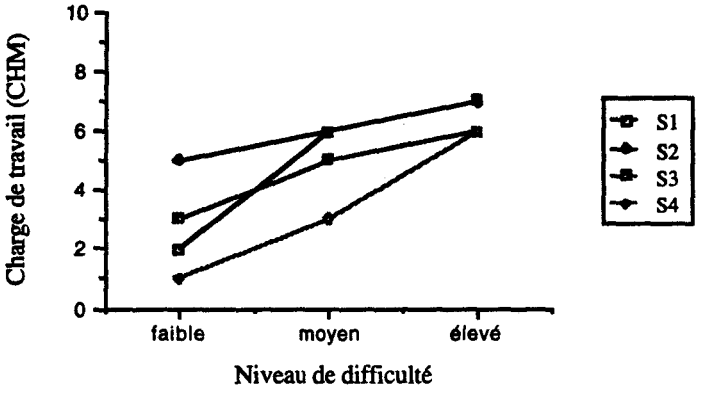


Figure III.13 : Charge de travail globale, pour l'ensemble des sujets et pour les trois scénarios.

Ces résultats globaux, de même que l'examen des résultats individuels, montrent que la différence de charge de travail n'est réellement significative que pour les deux niveaux extrêmes de difficulté. Ce constat résulte probablement de la nature des tâches : en plus des perturbations pseudo-aléatoires, l'opérateur contribue, par ses actions, à la dynamique des variables et donc à la difficulté globale du travail. Les "perturbations" engendrées inconsciemment par le sujet peuvent correspondre à la différence entre deux niveaux de difficulté consécutifs.

• *Charge de travail instantanée (méthode temporelle) :*

Dans un premier temps, il convient de vérifier l'hypothèse émise précédemment, à savoir que l'opérateur effectue ses actions "discrètes" - appuis sur les touches du clavier - pendant une consultation de la tâche correspondante, ou au cours de la consultation suivante. La figure III.14 présente les résultats obtenus pour l'ensemble des sujets :

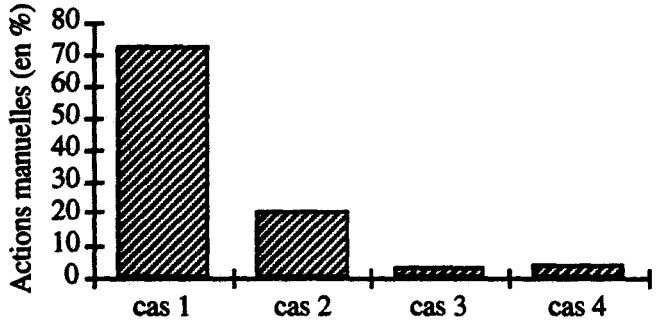


Figure III.14 : Mise en correspondance de l'activité manuelle avec l'activité oculaire (pour les 4 sujets) :
cas 1 : l'opérateur agit sur la tâche pendant une consultation sur cette tâche ;
cas 2 : l'opérateur agit avec une consultation "de retard" ;
cas 3 : l'opérateur agit avec deux consultations de retard ;
cas 4 : l'opérateur agit avec au moins trois consultations de retard.

Les résultats concernent un total de plus de 500 actions. Dans 94% des cas, l'opérateur agit sur une tâche (régulations et tâches discrètes) pendant qu'il la "fixe du regard" ou lors de la consultation suivante. Ceci justifie notre prise en compte des actions comme instants de fin de tâche.

La figure III.15 fournit un exemple de résultat obtenu avec la méthode temporelle, telle qu'elle a été décrite au paragraphe IV.3.2. La courbe du haut présente un échantillon de l'activité oculaire d'un opérateur ; celle du bas correspond à l'indice de charge instantanée calculé avec la méthode temporelle (la période d'échantillonnage ΔT est de 10 ms, ce qui correspond à la "résolution temporelle" du calculateur Digital et de l'oculomètre).

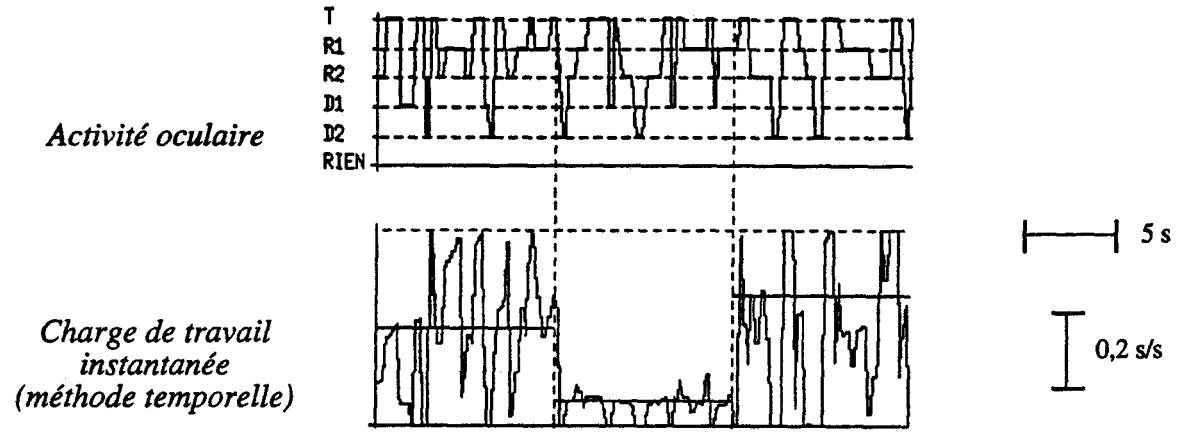


Figure III.15 : Activité oculaire et indice de charge de travail instantanée (méthode temporelle).

Remarque : La charge de travail totale, calculée à partir de l'indice échantillonné de la méthode temporelle, fournit des résultats d'allure comparable à ceux obtenus au moyen de l'échelle CHM, et s'avère être un indice sensible à la difficulté du scénario.

VI. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Suite aux expérimentations préliminaires, seuls deux niveaux de difficulté sont retenus, sur la base des niveaux "faible" et "élevé". Les contrastes entre ces deux niveaux ont été accrus, et les valeurs retenues pour les paramètres des cinq tâches sont les suivantes :

Difficulté / *Tâche*		faible	élevée
Tracking			
	A (cm/s)	0,5	1,5
	ω (rd/s)	0,005	0,015
	gain joystick	2	2
Régulation 1			
SBPA :	période (s)	20	4
	amplitude	1,1	2,1
1er ordre :	constante de temps (s)	40	30
	gain clavier	1	2
Régulation 2			
SBPA :	période (s)	15	2
	amplitude	1,1	2,1
1er ordre :	constante de temps (s)	30	20
	gain clavier	1	2
Discrète 1			
	nbre d'occurrences	7	
	temps disponible (s)	20	
Discrète 2			
	nbre d'occurrences	10	
	temps disponible (s)	10	

Figure III.16 : Valeurs des paramètres des 5 tâches, pour les 2 niveaux difficulté (la SBPA mentionnée pour les tâches de régulation comporte 5 bits).

Un seul scénario de test est utilisé, durant lequel la difficulté alterne entre les deux niveaux définis précédemment (sauf pour les tâches discrètes, dont la difficulté est fixée par leur fréquence d'occurrence). L'évolution de la difficulté au cours du temps a l'allure d'une SBPA (5 cellules ; période de décalage de 10 s.) : la difficulté reste constante sur des périodes "plus ou moins longues", multiples de 10 secondes.

Les 5 tâches sont d'importances égales, la consigne étant de *"maintenir toutes les variables dans le vert"*. Tout échec à l'une des tâches entraîne l'échec au test. Le sujet recommence alors au début du scénario, jusqu'au succès (le nombre de tentatives n'est pas limité).

La durée du scénario a été limitée à 5 minutes. On a supposé que les sujets réussissent après la seconde tentative. En ajoutant les 5 minutes de réglage du capteur et une petite période de repos entre les 2 tentatives, on obtient une durée totale proche des 20 minutes. De plus, les donnée collectées en 5 minutes sont suffisamment nombreuses pour les traitements envisagés.

Six sujets ont participé aux expérimentations. Tous sont droitiers et ont la vue non corrigée. Ils constituent une population homogène - 6 thésards du laboratoire - d'une moyenne d'âge de 26 ans. Tous ont été soumis à des sessions d'apprentissage, similaires à celles décrites pour les expérimentations préliminaires, et étalées sur 2 semaines.

VII. CONCLUSION

Ce chapitre a décrit la démarche adoptée pour l'élaboration d'un plan expérimental, en vue d'étudier l'influence de la charge de travail momentanée de l'opérateur sur son activité oculaire :

- Le choix du contexte expérimental a été dicté, en grande partie, par l'option méthodologique d'utiliser l'indice de la méthode temporelle comme indice de référence.

- Le dispositif expérimental est ensuite décrit, notamment la chaîne de mesure des mouvements oculaires qui permet, de manière totalement automatique, de recueillir les points de fixation dans un repère lié à l'écran graphique de l'opérateur.

- Une troisième partie est consacrée aux diverses données "produites" par les matériels utilisés.

Des expérimentations préliminaires ont été réalisées pour tester les choix méthodologiques, et également éprouver le dispositif mis en œuvre. Elle aboutissent à l'élaboration du protocole expérimental "définitif", qui tient compte à la fois des objectifs de l'étude et aussi des limites des matériels.

Le chapitre suivant décrit l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus et en fournit une analyse détaillée.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

I. INTRODUCTION

II. DONNÉES BRUTES

III. RÉSULTATS STATISTIQUES SUR LES FIXATIONS ET LES CONSULTATIONS

IV. ÉTUDE DES TRANSITIONS ENTRE TÂCHES

V. ÉTUDE DES SÉQUENCES DE CONSULTATION

VI. CONCLUSION

I. INTRODUCTION

La synthèse bibliographique du chapitre II permet de sélectionner les "indices" semblant les plus prometteurs, en vue d'une évaluation de la charge de travail d'un opérateur de supervision à partir de l'analyse de son activité oculaire. Le chapitre III présente en détail la plate-forme développée pour les expérimentations, l'instrumentation oculométrique mise en œuvre, ainsi que le protocole retenu. Le chapitre IV est maintenant consacré aux résultats obtenus.

Une première partie permet de vérifier la validité des données "de base" recueillies (données oculométriques et indice de charge). Les parties suivantes sont consacrées aux résultats proprement dits sur les fixations et les consultations oculaires, sur les transitions et les dépendances statistiques entre les tâches, et sur les trajets oculaires (séquences de consultations).

En conclusion, une synthèse critique des résultats est donnée, en focalisant sur leur "utilisabilité" pour l'évaluation de la charge de travail.

II. DONNÉES BRUTES

II.1 Données recueillies

La figure IV.1 recense l'ensemble des données recueillies :

- Tâche de tracking : la courbe du haut présente l'écart entre la cible et le centre de la mire, celle du bas la norme du vecteur vitesse appliqué à l'aide du joystick.
- Tâches de régulation : La courbe du haut présente l'écart de l'aiguille par rapport à la position centrale, celle du bas l'action correctrice appliquée à l'aide des deux boutons poussoirs.
- Tâches discrètes : les zones repérées par un rectangle en pointillé désignent les occurrences des tâches discrètes, avec leur temps disponible a priori. Les traits verticaux matérialisent les acquittements par l'opérateur.
- Chronogramme des consultations oculaires de l'opérateur.
- Indice de charge de travail instantanée calculé par la méthode temporelle.

II.2 Données oculométriques

Les résultats statistiques présentés dans ce paragraphe visent à vérifier la "précision" ainsi que la validité des données oculométriques obtenues, compte tenu du contexte expérimental.

Dans les chapitres précédents, l'activité oculaire est décrite sous la forme d'une succession de fixations. Nous nous intéressons donc aux caractéristiques spatiales et temporelles de ces fixations :

- les caractéristiques spatiales rendent compte principalement de la précision de l'instrumentation oculométrique (capteur ASL & système LAIH) ;

- les caractéristiques temporelles rendent compte de la validité de l'algorithme d'identification des fixations à partir des signaux échantillonnés fournis par le capteur.

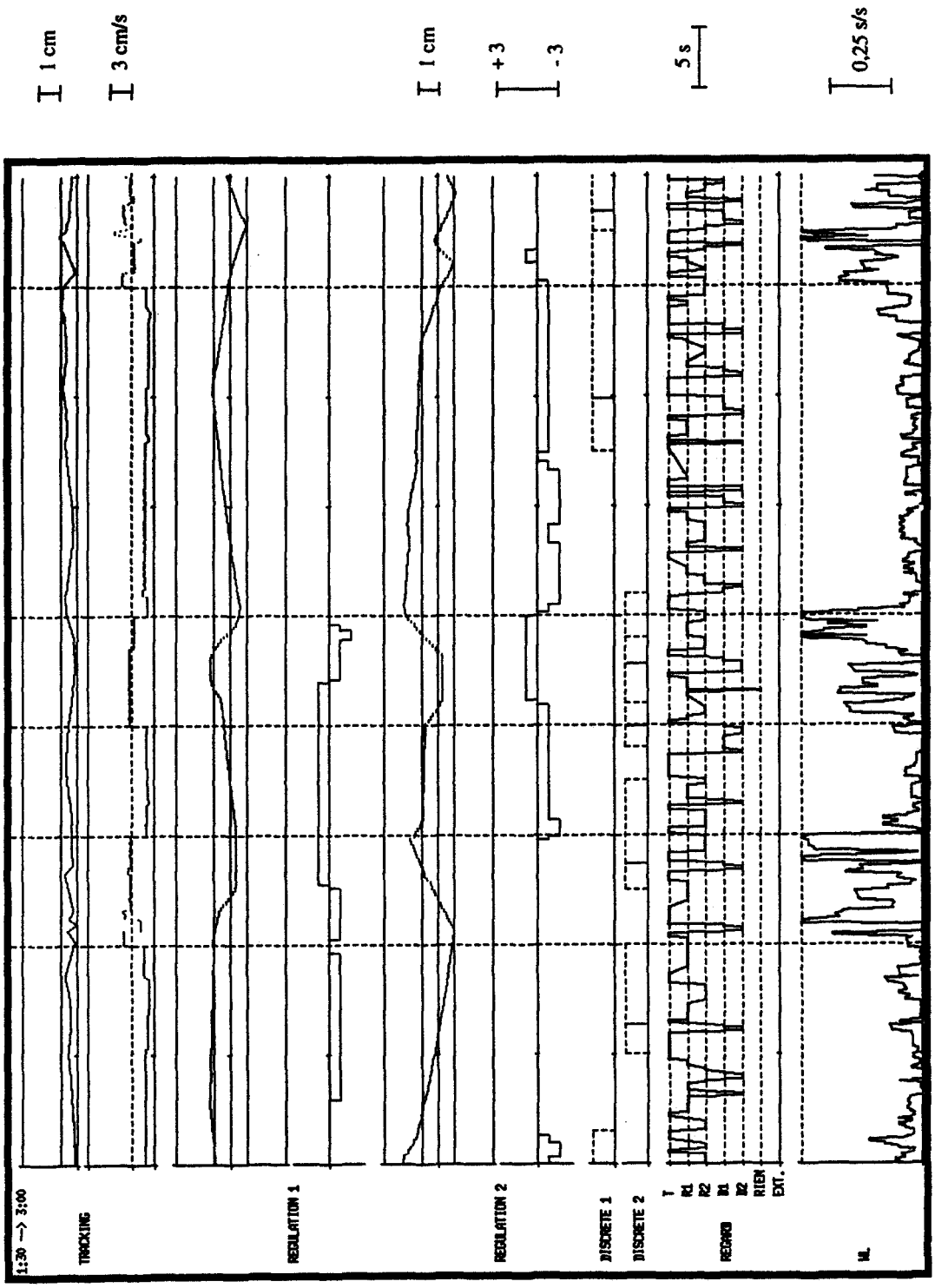


Figure IV.1 : Données mesurées ou calculées à chaque expérience (sujet 1).

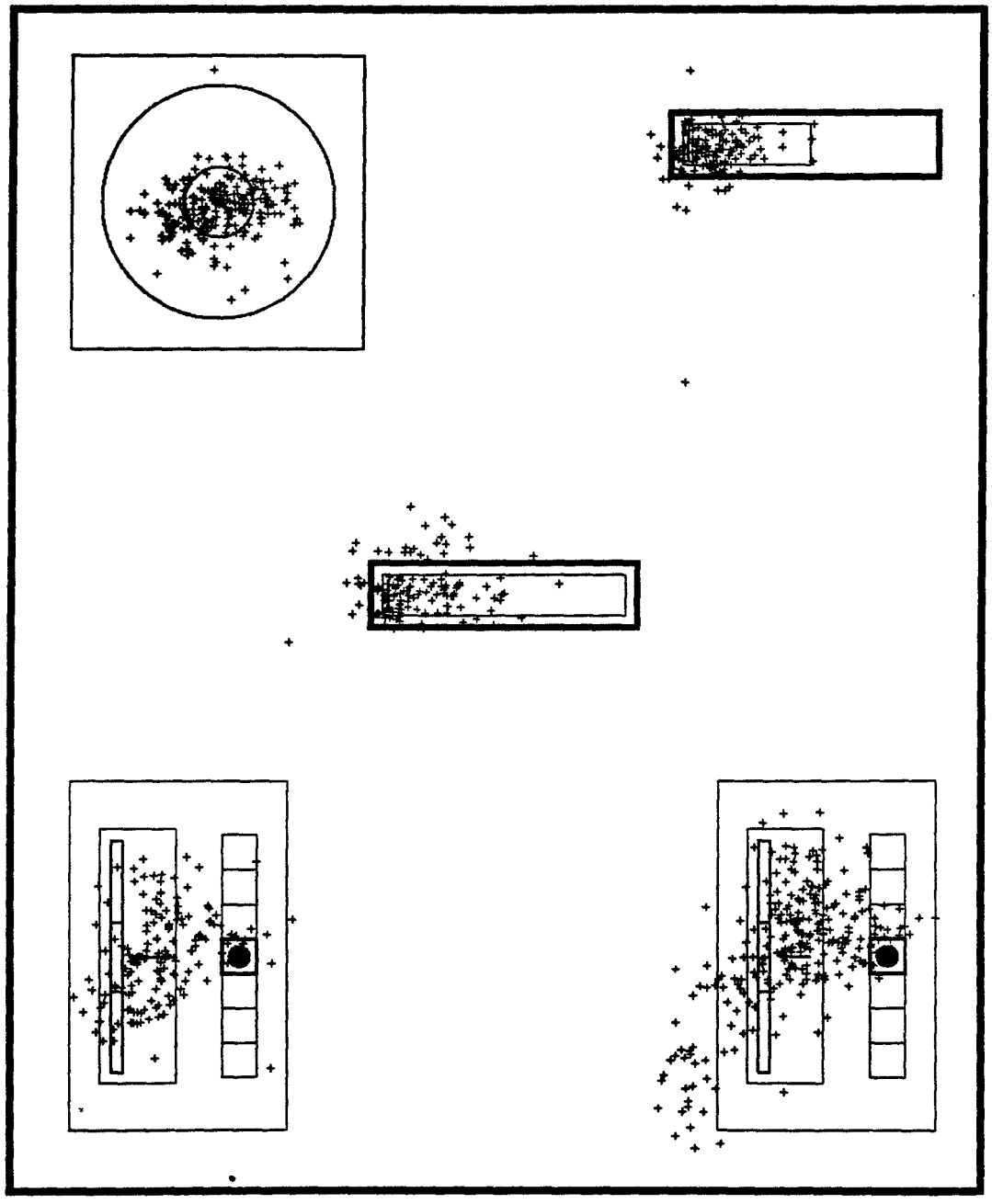


Figure IV.2 : Nuages de points de fixation obtenus pour un même sujet, durant les 5 mn du scénario de test.

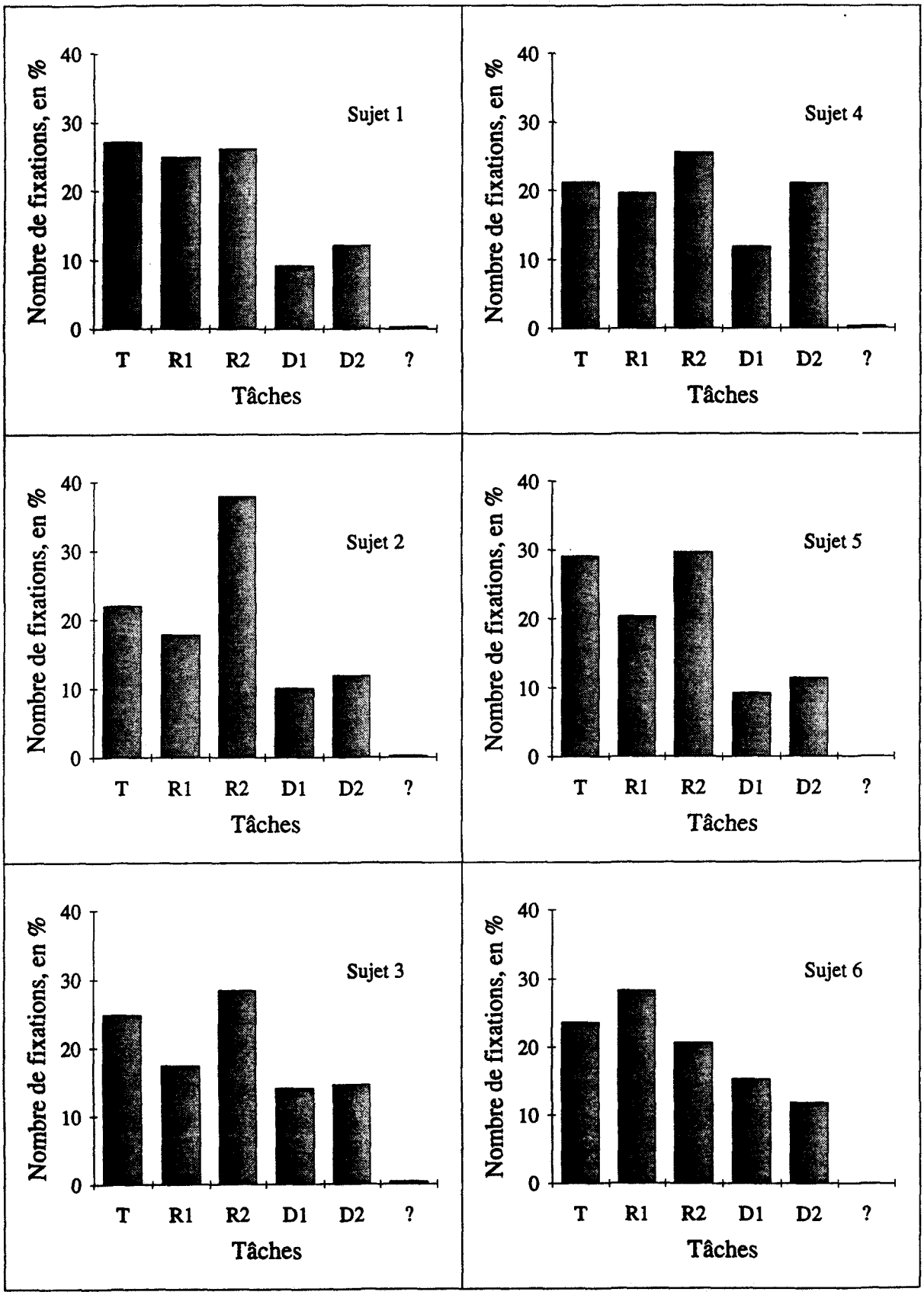


Figure IV.3 : Répartition spatiale des fixations pour les 6 sujets.

Cette "dichotomie" est certes abusive, dans la mesure où ces deux caractéristiques sont intimement liées : la "position" d'une fixation est définie comme le barycentre d'un nuage de points, nuage déterminé en partie à l'aide de critères temporels.

II.2.1 Répartition spatiale des fixations

La figure IV.2 permet de visualiser l'ensemble des fixations recueillies pour un même sujet, durant les cinq minutes du scénario de test. Il s'agit d'une copie d'écran de la "vue" soumise au sujet, sur laquelle sont superposés les points de fixations obtenus.

On peut vérifier sur cette figure que les fixations sont toutes concentrées sur les zones graphiques des cinq tâches. La figure IV.3 fournit la répartition spatiale des fixations, pour les six sujets. En complément, la figure IV.4 fournit les effectifs totaux des fixations et des consultations.

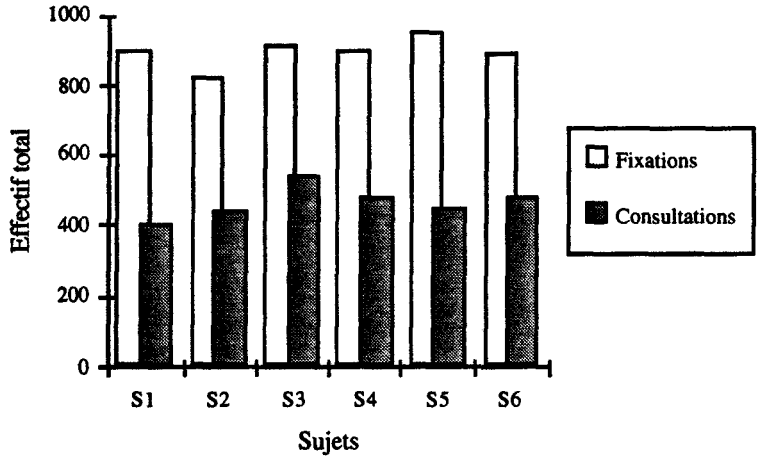


Figure IV.4 : Nombre total de fixations et de consultations pour les 6 sujets.

Sur l'ensemble des expérimentations, aucune fixation n'a été relevée à l'extérieur de l'écran de la station de travail. De plus, la quasi-totalité des fixations a pu être "affectée" à l'une des cinq tâches (le test d'appartenance d'une fixation à une tâche se fait en considérant une zone de dimensions égales à 1,25 fois celles de la fenêtre graphique de la tâche). Cette constatation est importante pour notre "hypothèse de travail", selon laquelle l'opérateur n'utilise que la vision centrale.

Sur les 12 fixations "hors tâches" (tous sujets confondus), repérées par "?" sur la figure IV.3, 8 sont de durées très courtes (de l'ordre de 100 ms) et 4 de durées moyennes (de l'ordre de 250 ms). Si les premières peuvent être considérées comme des point "erratiques" du trajet oculaire, les secondes sont plus difficiles à expliquer : leur localisation (à mi-chemin entre deux tâches) ainsi que leur durée (relativement longue pour un endroit vide de tout matériau visuel) laissent à croire qu'il s'agit là d'une tentative de perception en vision périphérique. PAPIN /83/, dans ses expérimentations sur le diagnostic radiologique, met en évidence que de telles "centrations" longues du regard favorisent la détection périphérique, et permettent de guider le regard du radiologue vers une zone qui lui paraît particulièrement "informative" (vers la tâche présentant la plus grande probabilité d'être en défaut, dans notre cas ?).
Ce résultat semble confirmer l'utilisation quasi-exclusive de la vision centrale par les sujets.

Globalement, les tâches rassemblant le plus de fixations sont les tâches de tracking et de régulation n° 2, c'est-à-dire les deux tâches les plus difficiles (voir la figure IV.3). De même, lorsqu'on compare les effectifs des deux tâches de régulation et des deux tâches discrètes, on s'aperçoit que les plus grands correspondent aux tâches d'indice "2", soit les plus difficiles également. Ce résultat est observé pour 5 sujets.

II.2.2 Durée des fixations

La figure IV.5 présente les distributions des durées de fixation obtenues pour chacune des cinq tâches (tous sujets confondus).

Les durées obtenues sont cohérentes avec les valeurs citées dans la littérature, pour des contextes comparables :

• UNEMA et al. /88/, dans leurs expérimentations sur la conduite automobile (second chapitre, § IV.1), obtiennent des distributions très voisines de celles de la figure IV.5 : valeur modale comprise entre 100 et 200 ms, correspondant à une fréquence comprise entre 30 et 50%.

• HARRIS et al. /86/, dans un contexte de pilotage d'avion, définissent quatre catégories de fixation, chacune caractérisée par la distribution des durées : par ordre de durées croissantes, les "coups d'œil", les "lectures", les "contrôles simples" et les "contrôles doubles". Les distributions obtenues pour nos expérimentations ressemblent fortement à la distribution des durées des "coups d'œil" (durées inférieures à 400 ms, valeur modale située entre 100 et 200 ms avec une fréquence correspondante d'environ 40%. Elles "empiètent" également sur la distribution des fixations de "lecture".

• ACIER /90/ enfin, dans un contexte de surveillance non cognitive (aucune sémantique associée aux variables à surveiller, c'est à dire un contexte proche du notre), rapporte des durées moyennes très comparables aux nôtres (de l'ordre de 300 ms).

II.3 Indice de charge de travail (Méthode temporelle)

II.3.1 Indice de charge instantanée

La figure IV.1 - courbe du bas - présente l'indice de charge instantanée calculé avec la méthode temporelle. Les traits verticaux en pointillés indiquent les changements de difficulté. On peut vérifier que lorsque la difficulté est élevée, la dynamique des "pics" de charge est également plus élevée.

Sur cette courbe, la valeur de l'indice de charge est "saturé" à 0,5 s/s. On peut en effet observer, chez certains sujets, des valeurs ponctuellement infinies. La raison en est la suivante :

Tout échec à l'une des cinq tâches entraîne un échec au test. Pour éviter d'avoir à multiplier les tentatives, l'échec au test n'est réellement effectif que si l'une des variables est en défaut plus de 5 secondes (tâches continues uniquement). Autrement dit, on peut - très ponctuellement - observer des temps disponibles nuls, et donc un indice de charge infini. Le cas se produit trois fois en tout, pour deux sujets.

II.3.2 Méthode temporelle et niveau de difficulté

La figure IV.6 montre l'évolution de la charge de travail moyenne - calculée sur des intervalles de temps de 10 secondes - au cours des 5 minutes du scénario de test, en parallèle avec le niveau de difficulté (faible ou élevé). Les résultats obtenus pour l'ensemble des sujets permettent de vérifier que l'indice de charge fourni par la méthode temporelle est sensible aux variations du niveau d'exigence du travail.

Ce résultat nous permet, dans la suite, de faire "l'équivalence" entre le niveau de difficulté et le niveau de charge de travail.

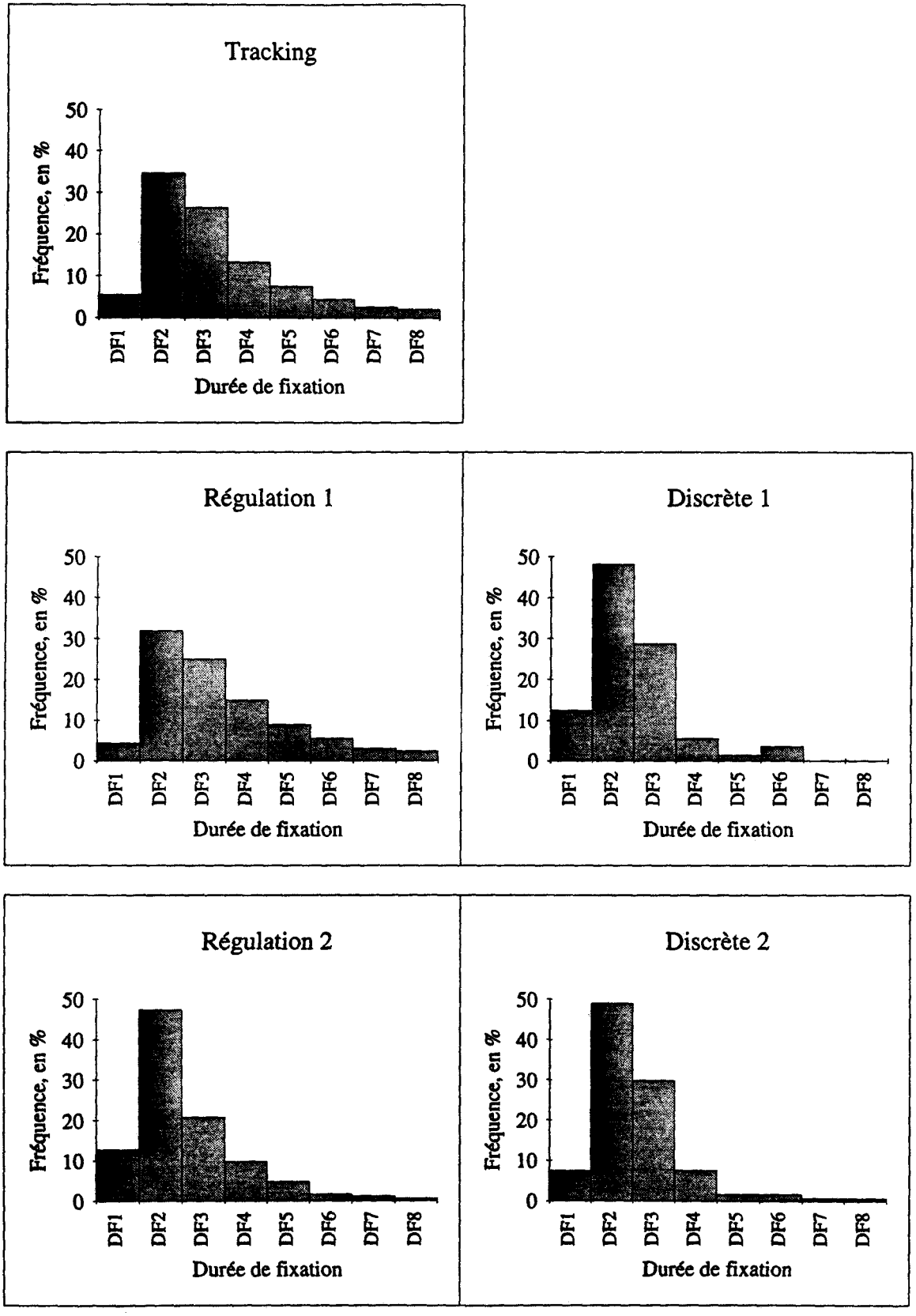


Figure IV.5 : Distribution des durées de fixation sur les 5 tâches, tous sujets confondus (DF1 : entre 0 et 100 ms ; DF2 : entre 100 et 200 ms ; etc).

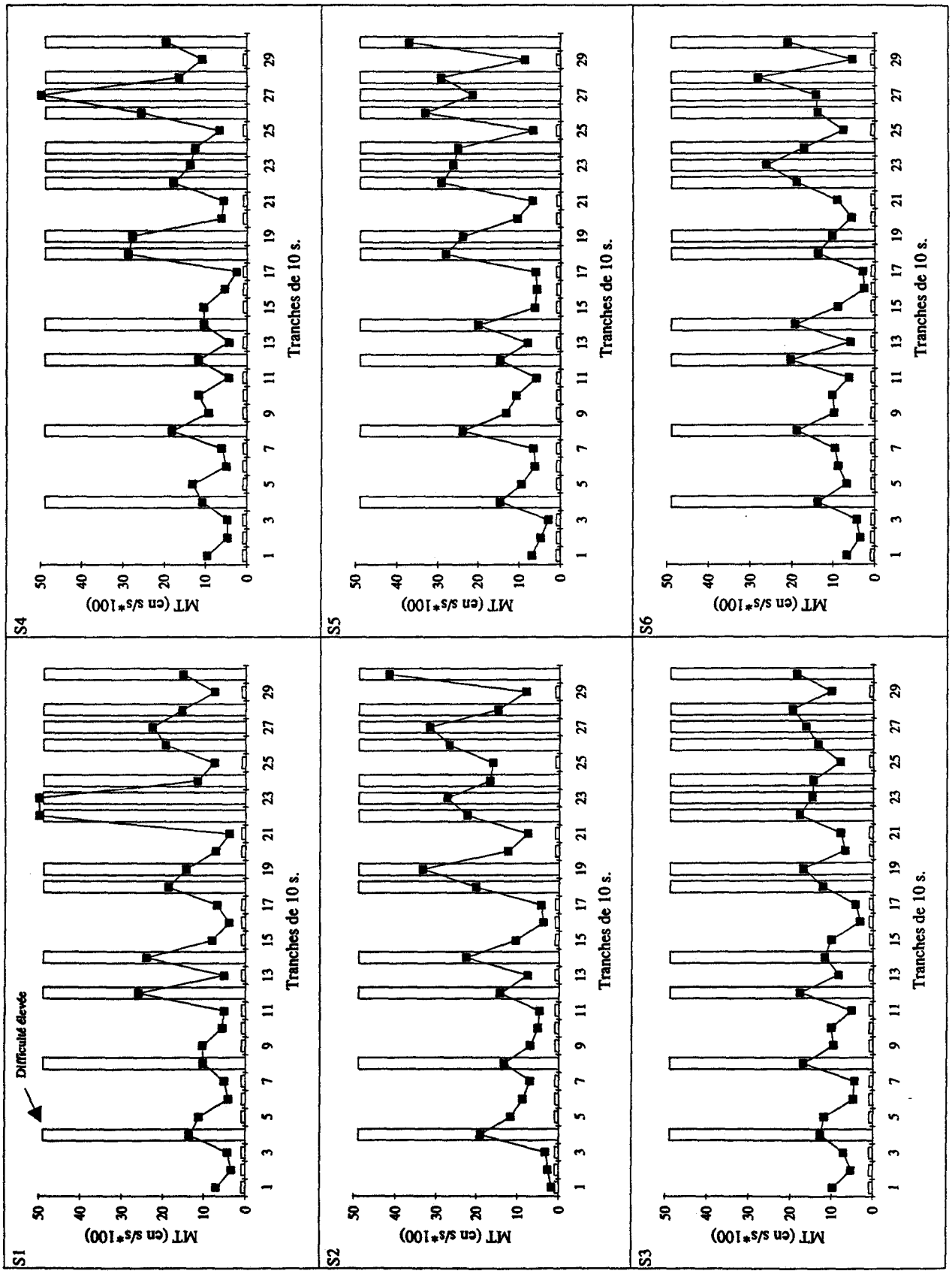


Figure IV.6 : Évolution de la charge de travail moyenne (calculée sur des intervalles de 10 secondes) en fonction du niveau de difficulté.

III. RÉSULTATS STATISTIQUES SUR LES FIXATIONS ET LES CONSULTATIONS

Dans ce paragraphe, quelques résultats sont présentés concernant certaines caractéristiques des fixations et des consultations oculaires. Ces caractéristiques sont calculées soit globalement (en fonction du niveau de difficulté), soit au cours du temps (sur des intervalles de 10 secondes) et mises en parallèle avec l'indice de charge de travail calculé avec la méthode temporelle.

III.1 Fixations

III.1.1 Durée des fixations

Influence du sujet :

La figure IV.7 présente les distributions des durées de fixation pour chacun des sujets, toutes tâches confondues, en fonction du niveau de difficulté.

Aucune influence systématique et "significative" du niveau de difficulté sur les distributions obtenues n'est décelée. Les tendances observées pour les 6 sujets sont les suivantes :

- Sujets 1, 2 et 4 : lorsque la difficulté augmente, la proportion de fixations courtes (100-200 ms) diminue légèrement, au profit des durées moyennes (200-400 ms) ou longues (400-600 ms).
- Sujet 3 : la fréquence correspondant à la valeur modale (durées comprises entre 100 et 200 ms) est légèrement supérieure quand la difficulté est élevée.
- Sujets 5 et 6 : les deux distributions sont relativement similaires.

ACIER /90/, déjà cité dans le premier chapitre (§ IV.2.1), classe les facteurs influant sur la durée des fixations dans trois principaux groupes :

- le type de tâche, les processus de traitement associés et la nature des informations prélevées ;
- la difficulté d'identification des informations ;
- la familiarité du sujet avec la tâche.

Les sujets ont tous été soumis à une phase d'apprentissage, et peuvent donc être considérés comme familiers avec la tâche. De plus, la difficulté d'identification des informations peut, dans notre cas, être considérée comme constante. Aussi, les facteurs les plus influents s'avèrent être ceux du premier groupe.

Dans nos expérimentations, l'état des variables n'est rattaché à aucune sémantique. Les processus de traitement sont donc faiblement cognitifs. Par contre, la nature de la tâche et surtout la nature des informations prélevées sont des facteurs qui semblent particulièrement importants. Aussi nous intéressons nous maintenant aux durées des fixations en fonction de la tâche exécutée.

Influence de la tâche :

La figure IV.8 présente les distributions des durées de fixation obtenues pour chacune des 5 tâches, tous sujets confondus, en fonction du niveau de difficulté.

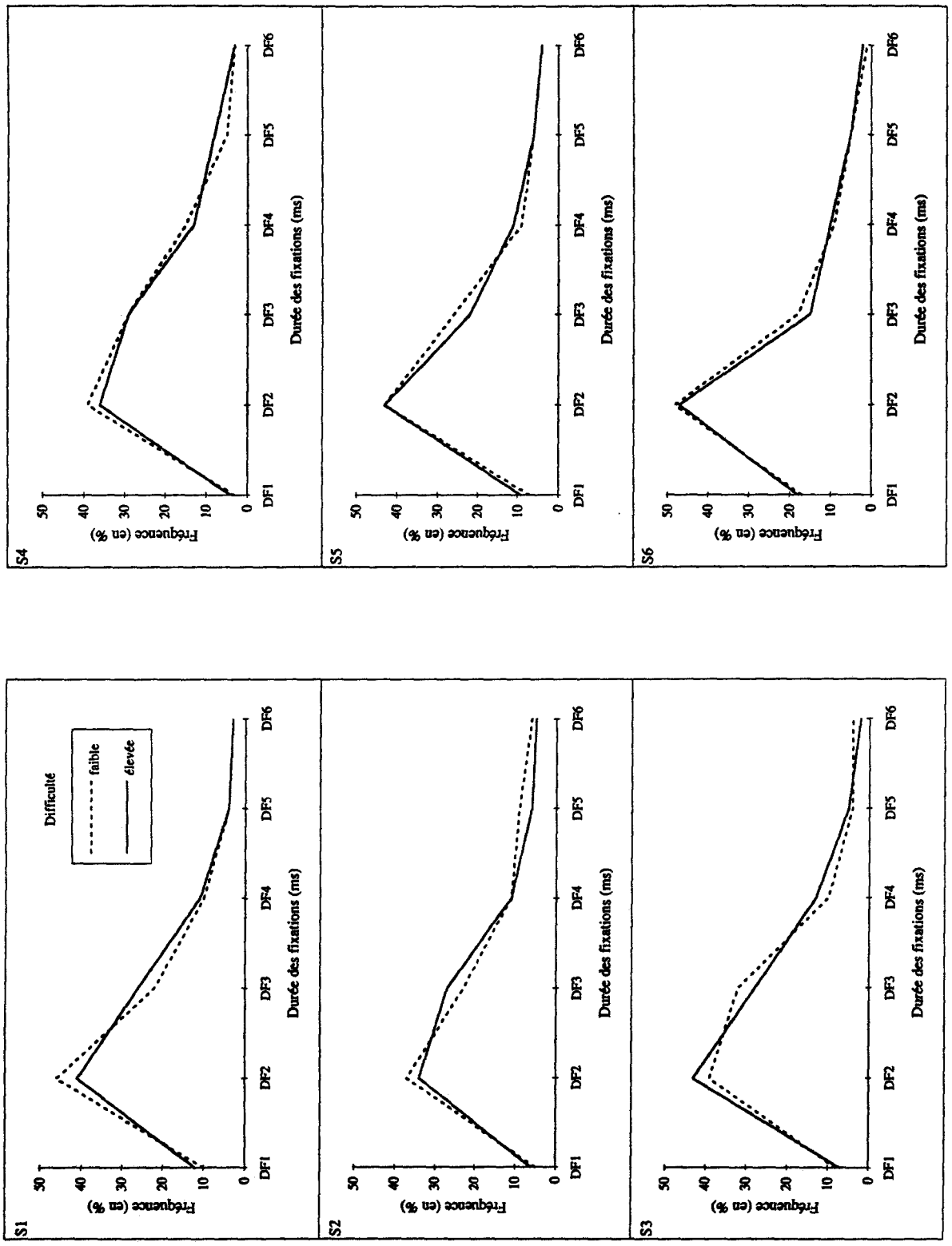


Figure IV.7 : Distribution des durées de fixation pour les 6 sujets, toutes tâches confondues (DF1 : entre 0 et 100 ms ; DF2 : entre 100 et 200 ms ; etc).

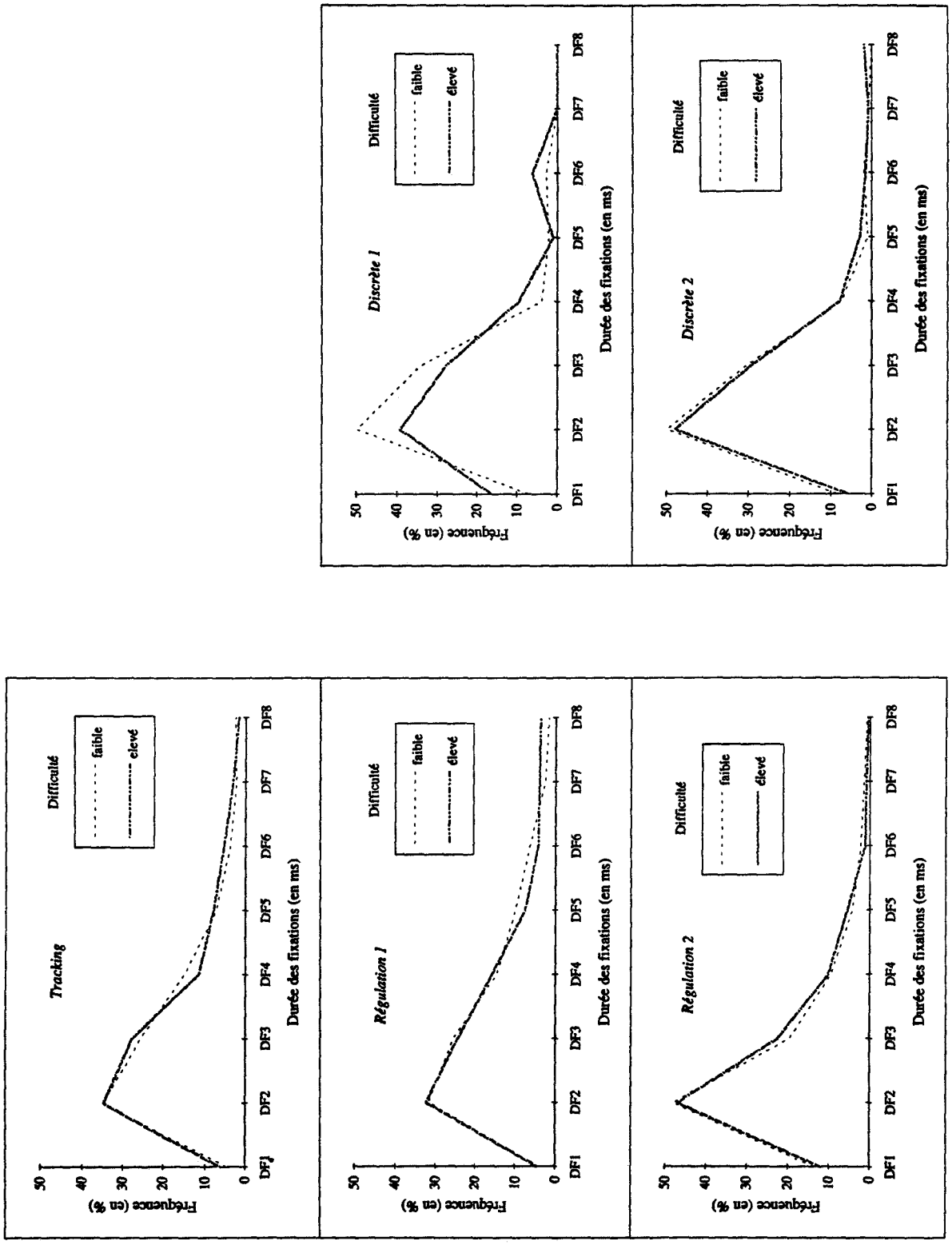


Figure IV.8 : Distribution des durées de fixation pour les 5 tâches, tous sujets confondus (DF1 : entre 0 et 100 ms ; DF2 : entre 100 et 200 ms ; etc).

Globalement, la valeur modale est invariante, quelle que soit la nature de la tâche : entre 100 et 200 ms. La fréquence correspondante varie entre 30 et 50 %. L'influence du niveau de difficulté sur les différentes distributions est très faible (sauf pour la tâche discrète n° 1). La comparaison des distributions obtenues pour les différentes tâches est par contre intéressante :

• *Tracking & Régulation n° 1* : Les distributions obtenues pour ces deux tâches sont quasiment identiques. La fréquence correspondant aux valeurs modales est de 35 % pour la tâche de tracking et de 32 % pour la tâche de régulation. Ce sont ces deux tâches qui présentent les fixations les plus longues.

• *Régulations n° 1 & 2* : La tâche de régulation n° 2 présente des durées de fixation plus courtes que la n° 1. La fréquence correspondant à la valeur modale est de 47 %. La dispersion autour de la valeur modale est donc assez faible.

Les durées de fixation plus élevées sur la tâche n° 1 peuvent provenir d'une quantité d'informations prélevées plus importante, ou d'un temps de traitement plus long. Étant donné la faible composante cognitive de la tâche, la première "hypothèse" semble la plus vraisemblable. D'autre part, la tâche de régulation n° 1 est plus facile que la n° 2, c'est à dire présente une dynamique moindre. Une explication possible est alors la suivante :

La dynamique de la tâche n° 1 étant plutôt faible, l'opérateur a plus facilement recours à son "modèle prédictif" de l'évolution de la variable. Pour cela, il a besoin de la valeur de la variable - pour vérifier que l'écart par rapport à la consigne est "acceptable" - mais aussi de sa vitesse d'évolution. Par contre, la dynamique de la tâche n° 2 étant plus élevée, l'opérateur a tendance à réguler la variable en "tout ou rien", en se basant essentiellement sur l'écart de la variable par rapport à la consigne. Si cette hypothèse se vérifie, elle doit se traduire par une fréquence de fixation de la tâche n° 1 inférieure à celle de la tâche n° 2, le recours de l'opérateur à son modèle interne lui permettant de différer ses "re-consultations".

• *Discrètes n° 1 & 2* : Elles présentent les distributions les moins dispersées. Le fait marquant concerne la tâche n° 1, la seule dont la distribution des durées de fixation semble subir une influence du niveau de difficulté. En effet, les durées de fixation semblent s'allonger lorsque la difficulté augmente. Il faut ici rappeler que la tâche n° 1 laisse un délai de 20 secondes à l'opérateur pour agir, contre 10 secondes seulement pour la tâche n° 2.

Il est possible de fournir une tentative d'explication similaire à la précédente, concernant les deux tâches de régulation :

Le temps disponible de la tâche n° 2 étant restreint, l'opérateur agit dès qu'il détecte un "état anormal" (tâche activée), et ce quelque soit le niveau de difficulté. Cela se traduit par une distribution des durées de fixation caractéristique des "coups d'œil", telle que la définit HARRIS /86/ (typiquement, vérification d'une information binaire telle que l'état d'un voyant).

Concernant la tâche n° 1, lorsque la difficulté augmente, l'opérateur "utilise" le temps disponible : en plus de détecter la présence d'un événement à acquitter, l'opérateur évalue son temps disponible, matérialisé par la chute du curseur sur le barre-graphe. Les "coups d'œil" se transforment en "lectures", ce qui se traduit par des fixations plus longues. Ceci permet à l'opérateur de se dispenser de "re-consulter" la tâche et, éventuellement, de repousser son acquittement à une période "plus calme".

La figure IV.9 montre la distribution des durées d'acquittement pour les deux tâches discrètes. On s'aperçoit que cette durée est plus longue lorsque la difficulté est élevée, ce qui semble confirmer la tentative d'explication précédente.

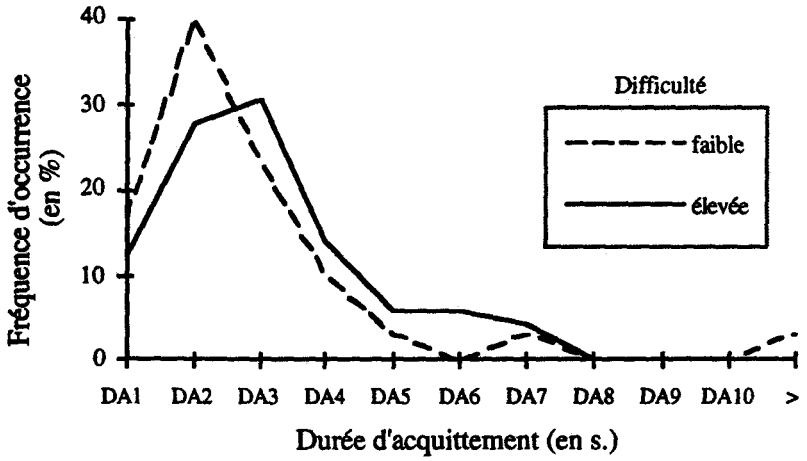


Figure IV.9 : Distribution des durées d'acquittement des tâches discrètes, tous sujets confondus (DA1 : entre 0 et 1 secondes, DA2 : entre 1 et 2 secondes, etc).

III.1.2 Fréquence des fixations

La figure IV.10 présente la fréquence moyenne des fixations sur les 5 tâches, pour les 6 sujets et les 2 niveaux de difficulté. On peut vérifier que, pour deux tâches de même nature, cette fréquence a toujours tendance à être supérieure sur la tâche la plus difficile (celle d'indice "2"). Ce résultat confirme l'hypothèse émise au paragraphe précédent, concernant la durée des fixations sur les tâches de régulation.

Concernant l'influence du niveau de difficulté, aucune tendance systématique et significative n'est mise en évidence. Les augmentations de fréquence les plus importantes (supérieures à 0,1 Hz) sont observées sur les tâches les plus difficiles, i.e. les tâches de tracking et de régulation n° 2.

Nous nous sommes également intéressés à la fréquence moyenne des fixations, toutes tâches confondues, sur des intervalles de temps de 10 secondes. La figure IV.11 montre un exemple de résultat, obtenu pour le sujet 1. Aucune corrélation n'a pu être établie entre l'évolution de la fréquence des fixations et celle de l'indice de charge fourni par la méthode temporelle (coefficients de corrélation linéaire compris entre 0,16 et - 0,49 pour l'ensemble des sujets).

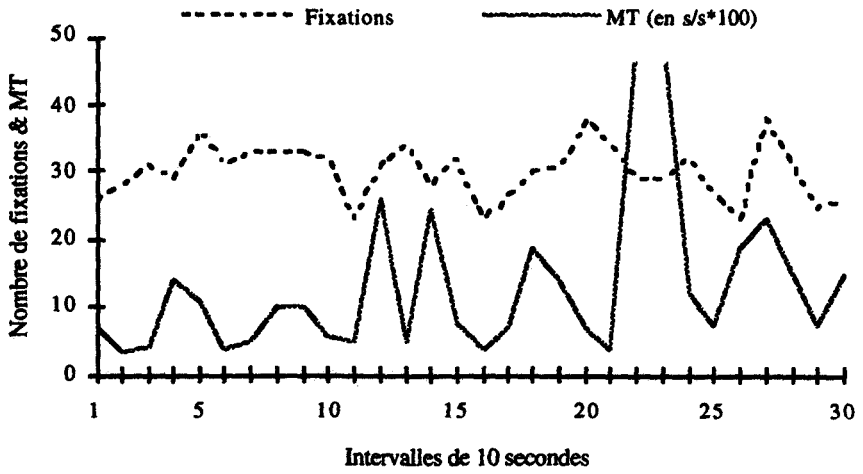


Figure IV.11 : Evolution du nombre de fixations et de la charge de travail (calculés sur des intervalles de 10 s.) pendant les 5 mn du scénario de test (sujet S1).

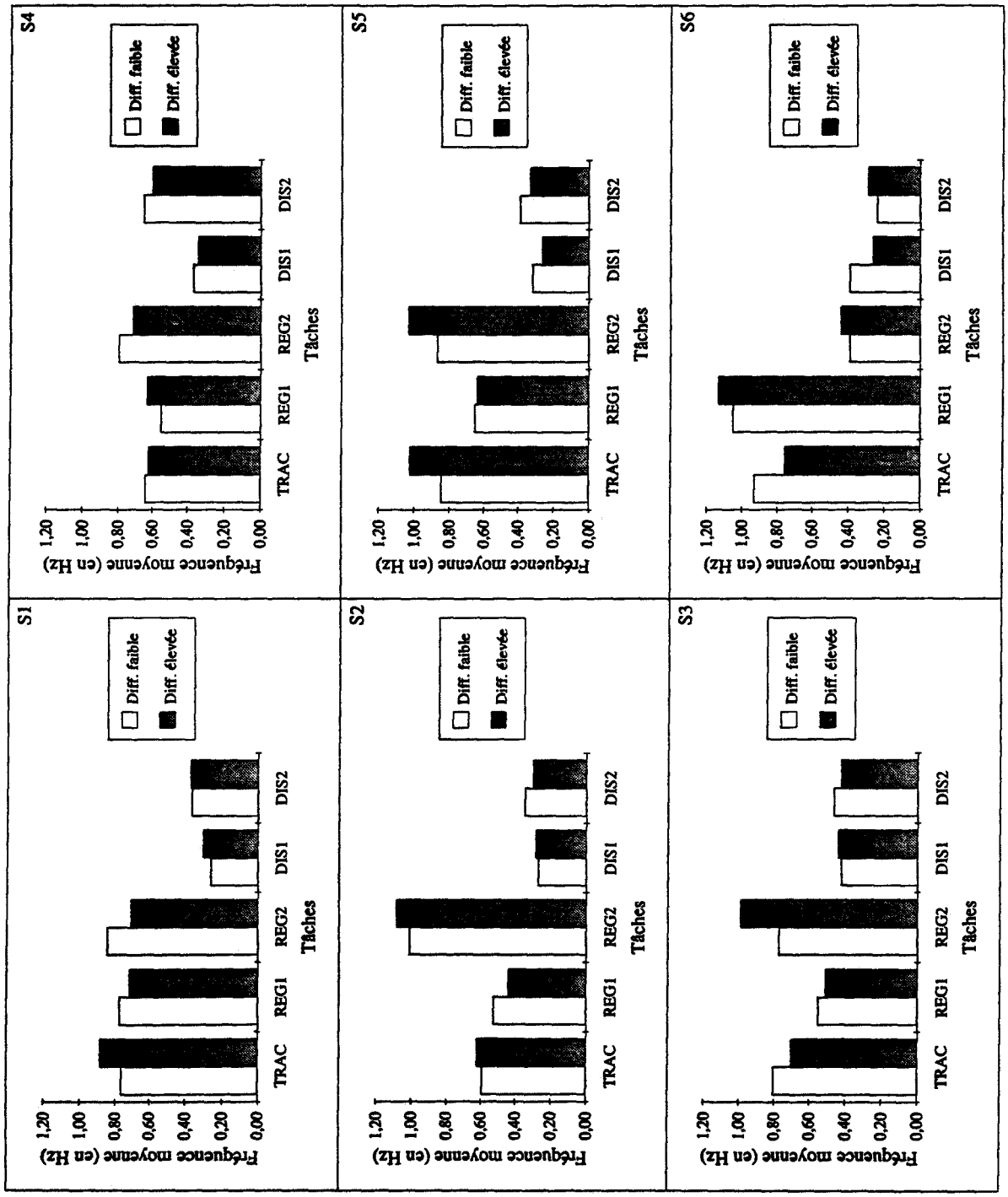


Figure IV.10 : Fréquence moyenne de fixation des 5 tâches.

III.2 Consultations

III.2.1 Taux de consultation

On entend par taux de consultation d'une tâche (ou taux d'occupation temporelle), pour une période donnée, le rapport de la durée totale de fixation de cette tâche sur la durée totale de la période. La figure IV.12 présente les taux de consultation des 5 tâches, pour les 6 sujets et les 2 niveaux de difficulté.

Aucune tendance systématique n'apparaît. Ce résultat n'est pas étonnant, compte tenu des résultats obtenus avec la durée et la fréquence des fixations.

III.2.2 Nombre de fixations par consultation

Influence du sujet :

La figure IV.13 montre la distribution du nombre de fixations par consultation pour les 6 sujets, toutes tâches confondues. Aucune influence systématique du niveau de difficulté n'apparaît.

Influence de la tâche :

La figure IV.14 montre la même distribution, pour les 5 tâches cette fois, tous sujets confondus.

L'influence du niveau de difficulté est la même pour les 2 tâches de régulation et les 2 tâches discrètes : les consultations sont plus courtes - en nombre de fixations - lorsque la difficulté est élevée. Ce résultat est très comparable à ceux obtenus par HARRIS et al. /86/ (déjà cités dans le 2nd chapitre, au § IV.2) dans un contexte de pilotage d'avion. Les auteurs proposent une explication qui semble convenir également à notre contexte : lorsque la difficulté est élevée, c'est à dire lorsque la dynamique des variables est importante, l'opérateur préfère consulter une autre variable plutôt que de prolonger sa consultation courante par quelques fixations "de contrôle", servant notamment à s'assurer de l'effet d'une commande.

Concernant la tâche de tracking, le phénomène inverse est observé. Pour le niveau de difficulté élevé, la dynamique de la cible est importante. De plus, l'opérateur agit de manière quasi-continue sur le joystick. Il se peut alors que l'opérateur n'arrive pas à s'affranchir de ces quelques fixations de contrôle supplémentaires.

Pour les autres tâches (les 2 régulations et les 2 discrètes), les consultations sont plus "courtes" lorsque la difficulté est élevée (90 % des consultations comprennent 1 ou 2 fixations). Ce résultat provient probablement de la dynamique moindre de ces tâches, notamment concernant les tâches de régulation (de par la présence du 1er ordre).

III.3 Synthèse

Les résultats obtenus montrent que le niveau de difficulté (i.e. le niveau de charge de travail, voir § II.2.2) influe peu sur la durée des fixations. Les variations les plus sensibles semblent se produire de manière "indirecte", lorsque l'augmentation des exigences de la tâche conduit l'opérateur à modifier la nature des informations qu'il prélève. KREBS et al. /77/ décrivent cette modification dans un contexte de pilotage d'avion (voir le 2nd chapitre, § IV.1.3). Nos résultats semblent en fournir une autre illustration, du moins lorsque l'on compare entre-elles les tâches de mêmes natures (mais de difficultés différentes).

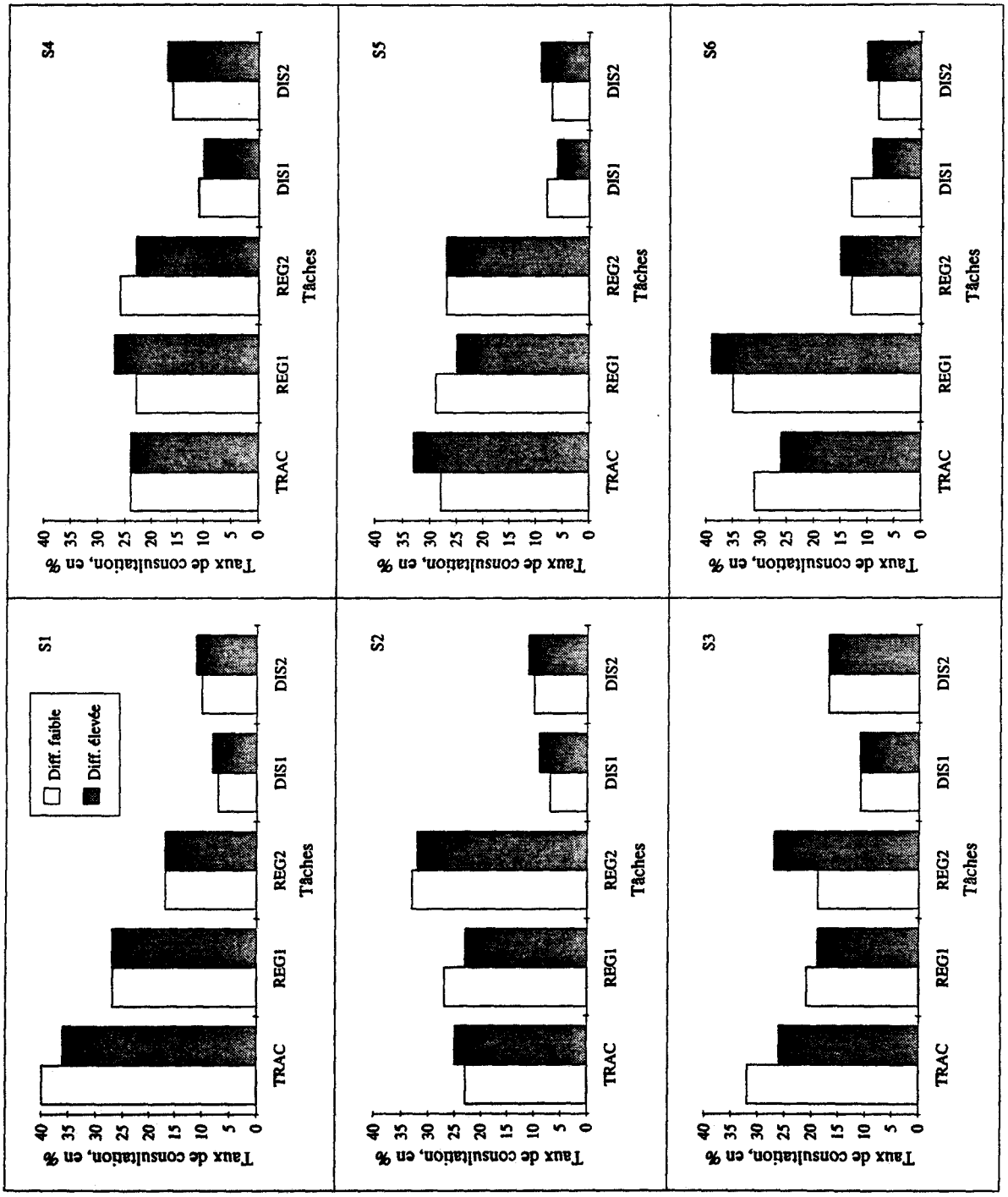


Figure IV.12 : Taux de consultation des 5 tâches.

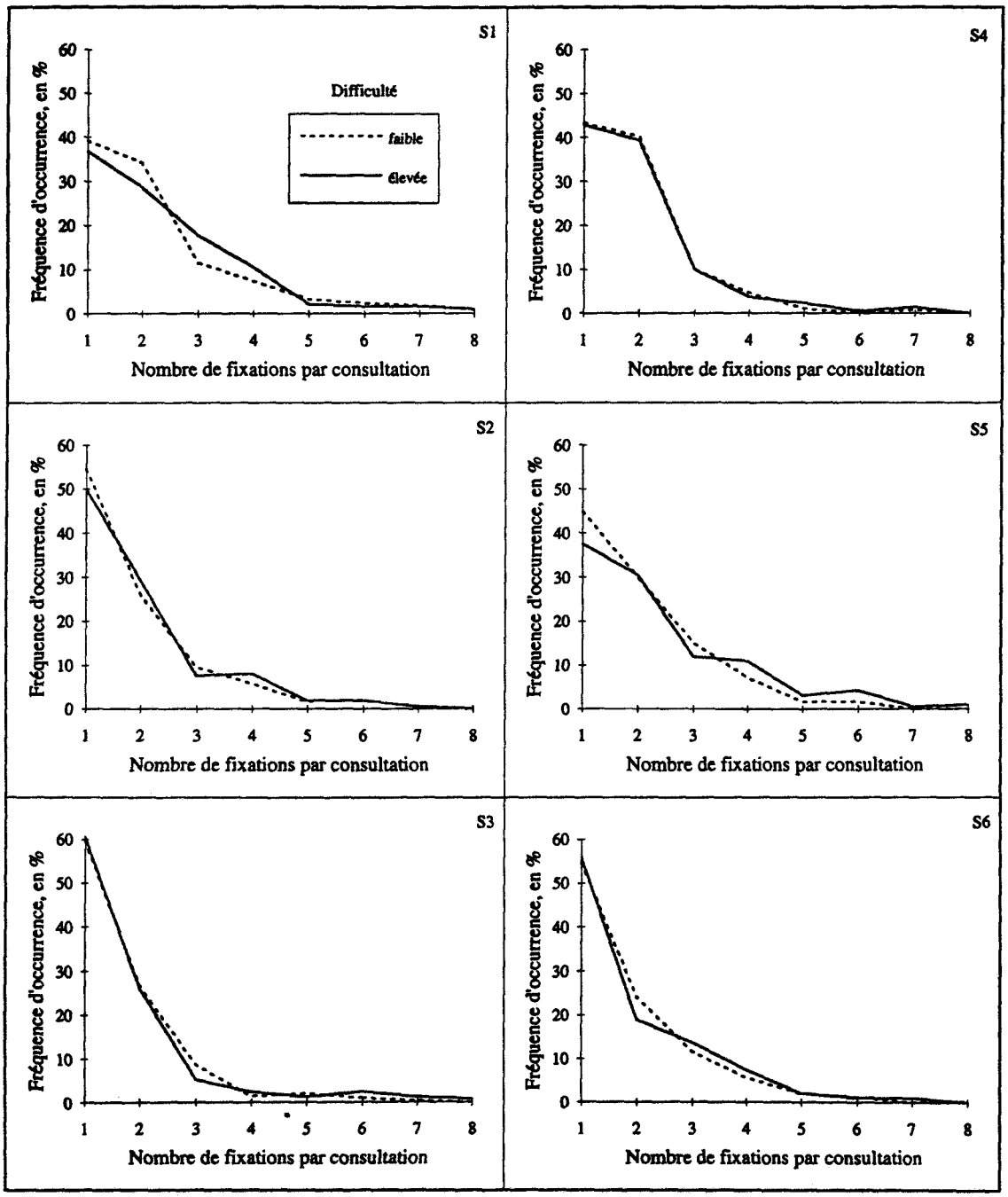


Figure IV.13 : Distribution du nombre de fixations par consultation pour les 6 sujets (toutes tâches confondues).

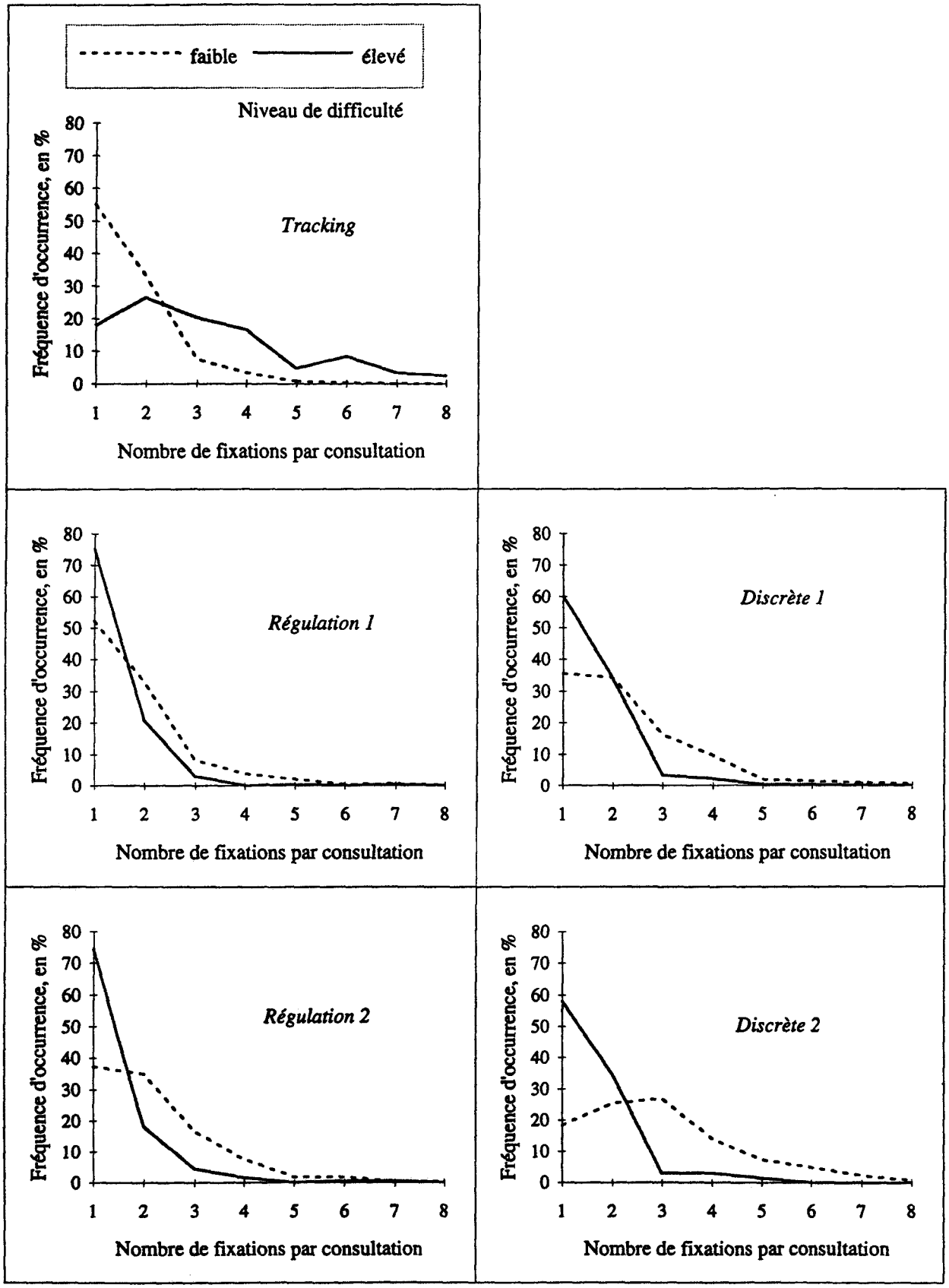


Figure IV.14 : Distribution du nombre de fixations par consultation pour les 5 tâches (tous sujets confondus).

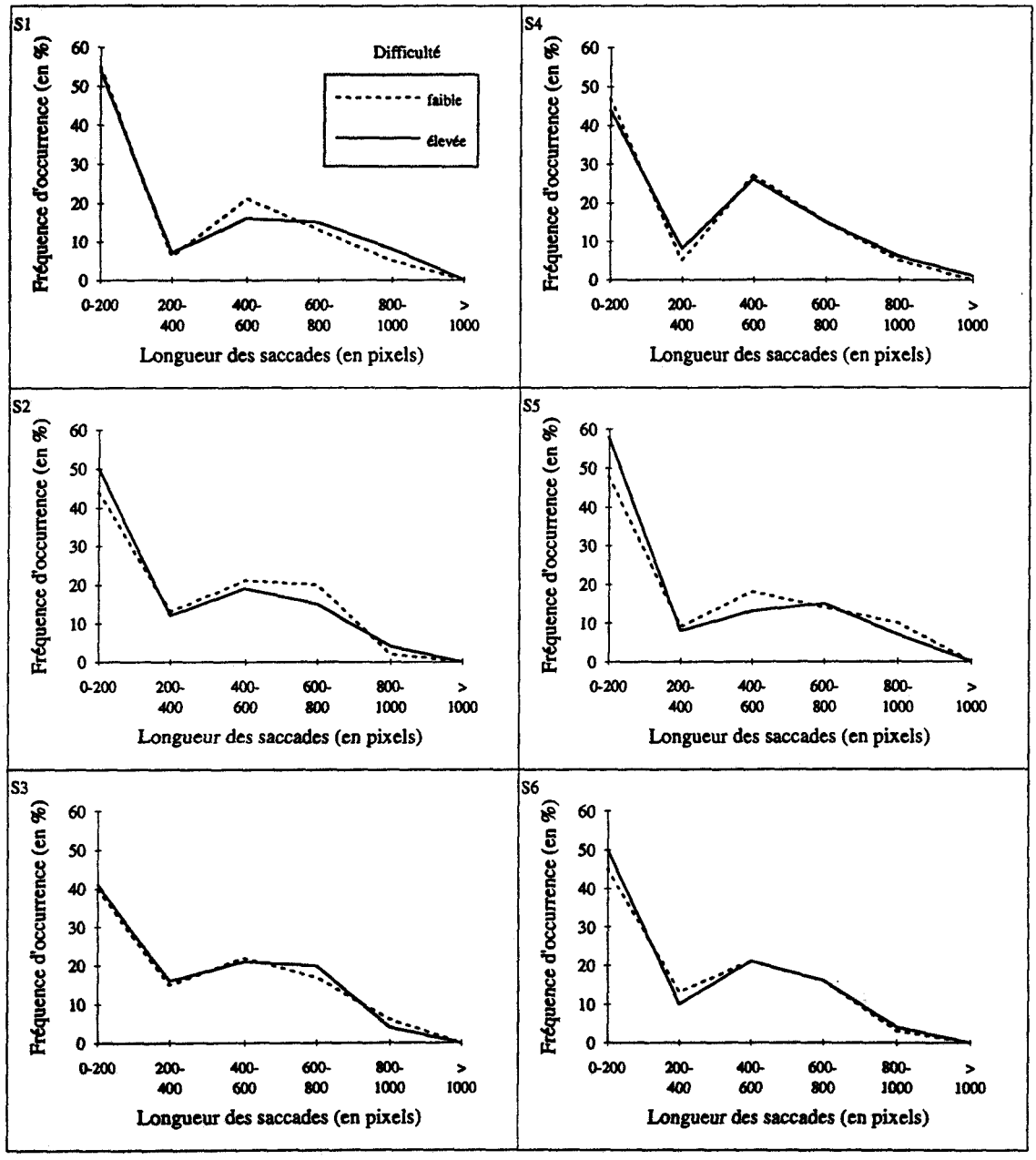


Figure IV.15 : Distribution des longueurs de saccades, pour les 6 sujets.

Concernant l'évolution de la fréquence des fixations - calculée sur 10 secondes - au cours du scénario, aucun lien systématique avec l'évolution de la charge de travail n'apparaît clairement. Globalement, sur la totalité des deux niveaux de difficulté, cette fréquence a tendance à augmenter sur les tâches les plus difficiles.

Ces résultats semblent en accord avec ceux obtenus par MORAY et al. /89/ dans un contexte comparable au nôtre. Les auteurs étudient la "répartition de l'attention" de l'opérateur, suite à un défaut sur l'installation. Ils rapportent que l'attention (en fait le taux de consultation) se "déplace" vers le système en défaut, plus sous la forme de consultations plus fréquentes que de fixations plus longues.

Concernant les consultations, et plus particulièrement la distribution du nombre de fixations par consultation, les résultats sont différents suivant le type de tâche. Pour les tâches discrètes et de régulation, on observe une baisse du nombre de fixations par consultation lorsque la difficulté augmente. Pour la tâche de tracking, la tendance inverse est observée, mais peut néanmoins s'expliquer par la dynamique importante de la cible. Ces résultats sont également en accord avec ceux trouvés dans des travaux comparables, notamment ceux de HARRIS et al. /86/.

Pour conclure avec les caractéristiques des fixations et des consultations, il semble que les variations observées en fonction du niveau de difficulté sont soit trop faibles, soit trop variables, pour être à la base d'un estimateur "sensible" de la charge de travail. C'est pourquoi, dans la partie suivante, nous focalisons sur l'organisation de la prise d'informations, c'est à dire sur "l'enchaînement" des consultations.

IV. ÉTUDE DES TRANSITIONS ENTRE TÂCHES

On a vu en II.1.1 que la quasi-totalité des fixations se trouvent à l'intérieur des zones graphiques des 5 tâches. Par conséquent, les transitions entre tâches s'effectuent en une seule saccade.

Dans ce qui suit, le terme "transition" désigne donc une saccade, abstraction faite des caractéristiques telles que l'amplitude exacte du mouvement, sa durée, etc. Seules importent les tâches de départ et d'arrivée.

IV.1 Longueur des saccades

La figure IV.15 présente la distribution de la longueur des saccades, pour chacun des 6 sujets, en fonction du niveau de difficulté.

Les distributions obtenues sont bimodales :

- Le premier mode correspond aux saccades courtes se produisant à l'intérieur des fenêtres graphiques des tâches. Quels que soient le sujet et le niveau de difficulté, environ 40 % des saccades sont inférieures à 3,4 cm (100 pixels).

- Le second mode regroupe les saccades se produisant entre deux tâches. La dispersion autour de ce second mode est plus grande, puisqu'il regroupe toutes les distances entre 2 des 5 tâches.

Aucune influence systématique du niveau de difficulté n'est apparente. On a vu dans le second chapitre (§ III.4) qu'une modification de la longueur des saccades peut être

symptomatique d'un changement de stratégie, d'un appauvrissement ou au contraire d'un accroissement de l'exploration oculaire. Dans notre cas, les distances entre tâches étant comparables, il n'est pas surprenant d'observer aucune influence significative du niveau de difficulté (même dans l'hypothèse d'une modification de la "stratégie" de l'opérateur).

IV.2 "Échanges" entre tâches : Matrices et graphes de transition

Pour recenser l'ensemble des transitions entre les 5 tâches, 2 matrices sont constituées pour chaque sujet, contenant chacune l'ensemble des transitions observées pour les 2 niveaux de difficulté.

Pour toutes les matrices calculées, les termes diagonaux représentent une proportion importante de l'effectif total, figure IV.16. Cette proportion augmente légèrement avec le niveau de difficulté : moins de 4% pour 5 sujets, 10% pour le 6ème.

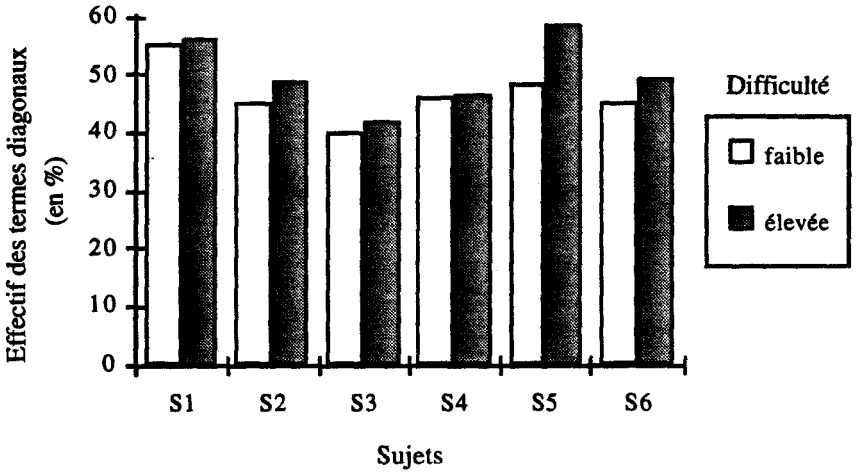


Figure IV.16 : Effectifs des termes diagonaux, pour les 6 sujets et les 2 niveaux de difficulté.

Les termes diagonaux ont été étudiés en détails précédemment, dans le paragraphe consacré aux consultations (§ III.2.2). En effet, ils "contiennent" toutes les consultations comportant plus d'une fixation. De plus, on a vu dans le 2nd chapitre (§ IV.1.1) qu'il est préférable, pour étudier les transitions, de ne pas prendre en compte les termes diagonaux. C'est pourquoi les diagonales des matrices ont toutes été annulées, ce qui revient à considérer les consultations au lieu des fixations.

La figure IV.17 présente les échanges entre tâches, pour les 6 sujets ("échanges" car ils s'agit des transitions bi-directionnelles entre les 3 groupes de tâches). Aucune influence systématique du niveau de difficulté n'apparaît. Des variations importantes (supérieures à 10%) sont néanmoins observées chez la plupart des sujets, variations laissant entrevoir des modifications de l'organisation de la prise d'information.

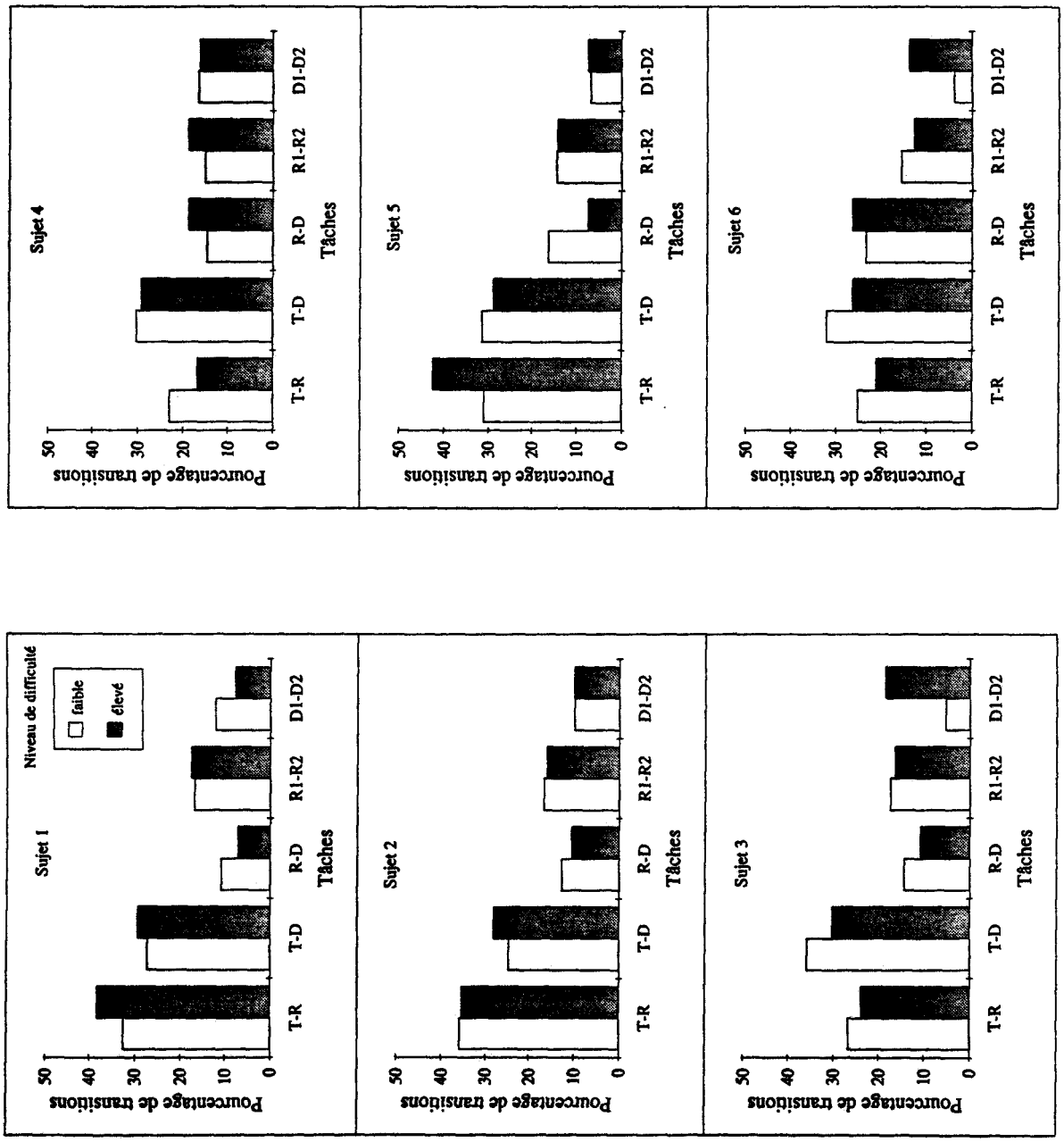


Figure IV.17 : Echanges entre tâches.

IV.3 Étude du "désordre oculaire"

IV.3.1 Résultats globaux

Dans un premier temps, nous nous intéressons au désordre oculaire sur la totalité de chacun des deux niveaux de difficulté (les périodes de même difficulté sont "mises bout à bout").

En première approche, des graphes de liaison sont tracés à partir des matrices calculées précédemment, pour les deux niveaux de difficulté. L'interprétation qualitative de ces graphes permet de mettre au jour certaines différences manifestes entre les deux niveaux de difficulté : inversion d'un sens de parcours privilégié, passage d'échanges bidirectionnels à des échanges unidirectionnels, etc.

Une approche plus quantitative est ensuite adoptée, en vue de dégager les différences "significatives" entre les matrices de transition correspondant aux niveaux de difficulté faible et élevée. Nous avons pour cela utilisé les "taux de liaison", dont une description est maintenant donnée.

Taux de liaison /ROUANET et al., 87/ :

Les taux de liaison sont calculés à partir d'une matrice de transition et permettent de mettre en évidence les "attractions" et les "répulsions" entre les différentes modalités (tâches, dans notre cas).

Par définition, *la liaison entre deux modalités est positive (attraction), négative (répulsion), ou nulle (indépendance), selon que la fréquence conditionnelle est supérieure, inférieure, ou égale à la fréquence marginale correspondante.*

Si n_{ij} est le terme général de la matrice de transition (i : zone de départ ; j : zone d'arrivée) et n son effectif total, on obtient :

- Fréquence de transition (ou fréquence conjointe) :

$$f_{ij} = \frac{n_{ij}}{n}$$

- Fréquence marginale : somme sur les lignes ou les colonnes des fréquences conjointes :

$$f_i = \sum_j f_{ij} \; ; \; f_j = \sum_i f_{ij}$$

- Fréquence conditionnelle ("fréquence de j si i") :

$$f_j^i = \frac{f_{ij}}{f_i}$$

Le taux de liaison entre deux modalités est alors défini comme l'écart de la fréquence conjointe à la fréquence produit divisé par la fréquence produit, la fréquence produit étant le produit des fréquences marginales :

$$t^{ij} = \frac{f_{ij} - f_i \cdot f_j}{f_i \cdot f_j} = \frac{n \cdot n_{ij}}{n_i \cdot n_j} - 1$$

Une autre définition, plus "intuitive", peut maintenant être donnée en faisant appel à la notion "d'effectif théorique". L'effectif théorique d'une case d'un tableau de contingence est le produit des effectifs marginaux divisé par l'effectif total. C'est également la valeur qu'aurait cette case si, les effectifs marginaux étant connus, le taux de liaison pour cette case était nul (i.e. si les deux modalités étaient "indépendantes"). Le taux de liaison peut alors être défini comme suit :

$$t^{ij} = \frac{\text{obs - théo}}{\text{théo}}$$

avec obs : effectif observé $= n_{jk}$ et
théo : effectif théorique $= (n_j.n_k) / n$

La valeur minimale d'un taux de liaison est -1, signifiant l'absence de transitions (obs=0), et donc la "répulsion totale" des 2 modalités. Il n'y a pas de valeur maximale a priori, cette dernière dépendant notamment de l'effectif total de la matrice. Une table de taux de liaison composée de valeurs proches de 0 est symptomatique d'un comportement oculaire peu ordonné, voire aléatoire : à chaque consultation, toutes les transitions possibles sont quasi-équiprobables. A l'inverse, la présence de valeurs très proches de -1 ou positives et très grandes indiquent un comportement très structuré, présentant probablement des chemins oculaires privilégiés.

Résultats obtenus :

Le problème est de caractériser le comportement oculaire pour les deux niveaux de difficulté, et surtout de détecter les changements significatifs. Pour cela, on étudie les tableaux des taux de liaison correspondant aux deux niveaux de difficulté, ainsi que le tableau contenant la différence des taux de liaison /SIMON et al., 93a/.

Avant de détailler les résultats individuels, quelques tendances globales peuvent être soulignées :

- D'une manière générale, il y a peu d'échanges entre les tâches de régulation et les tâches discrètes (les taux de liaison sont quasiment tous négatifs, et la plupart proches de -1). Lorsque de tels échanges existent (sujets 4 et 6 essentiellement), ils sont unidirectionnels.

- Pour tous les sujets, et quelque soit le niveau de difficulté, il existe de nombreux échanges entre les deux tâches de régulation (voir la figure IV.17). Les échanges sont beaucoup moins nombreux entre les deux tâches discrètes. De plus, ils sont généralement unidirectionnels, laissant apparaître un "cycle de scrutation" débutant et finissant sur la tâche de tracking.

- La tâche de tracking semble jouer un rôle privilégié. En effet, l'étude des graphes des attractions fait apparaître des cycles ayant pour "point commun" la tâche de tracking et respectant la nature des tâches.

La figure IV.18 présente les graphes d'attractions obtenus avec chacun des 6 sujets. Ces graphes sont tracés à partir des tables des taux de liaison. Ils illustrent, pour chaque sujet, l'influence du niveau de difficulté. Ils ne sont pas destinés à rendre compte, de manière exhaustive, de toutes les transitions observées.

Seules sont représentées les transitions dont le taux de liaison est supérieur à 0,5. Si on se réfère à la seconde définition du taux de liaison, cela signifie que l'effectif observé est égal à 1,5 fois l'effectif théorique, i.e. l'effectif correspondant à l'indépendance des deux modalités. Par ailleurs, l'épaisseur des traits est proportionnelle à la valeur des taux de liaison (valeur maxi = 3).

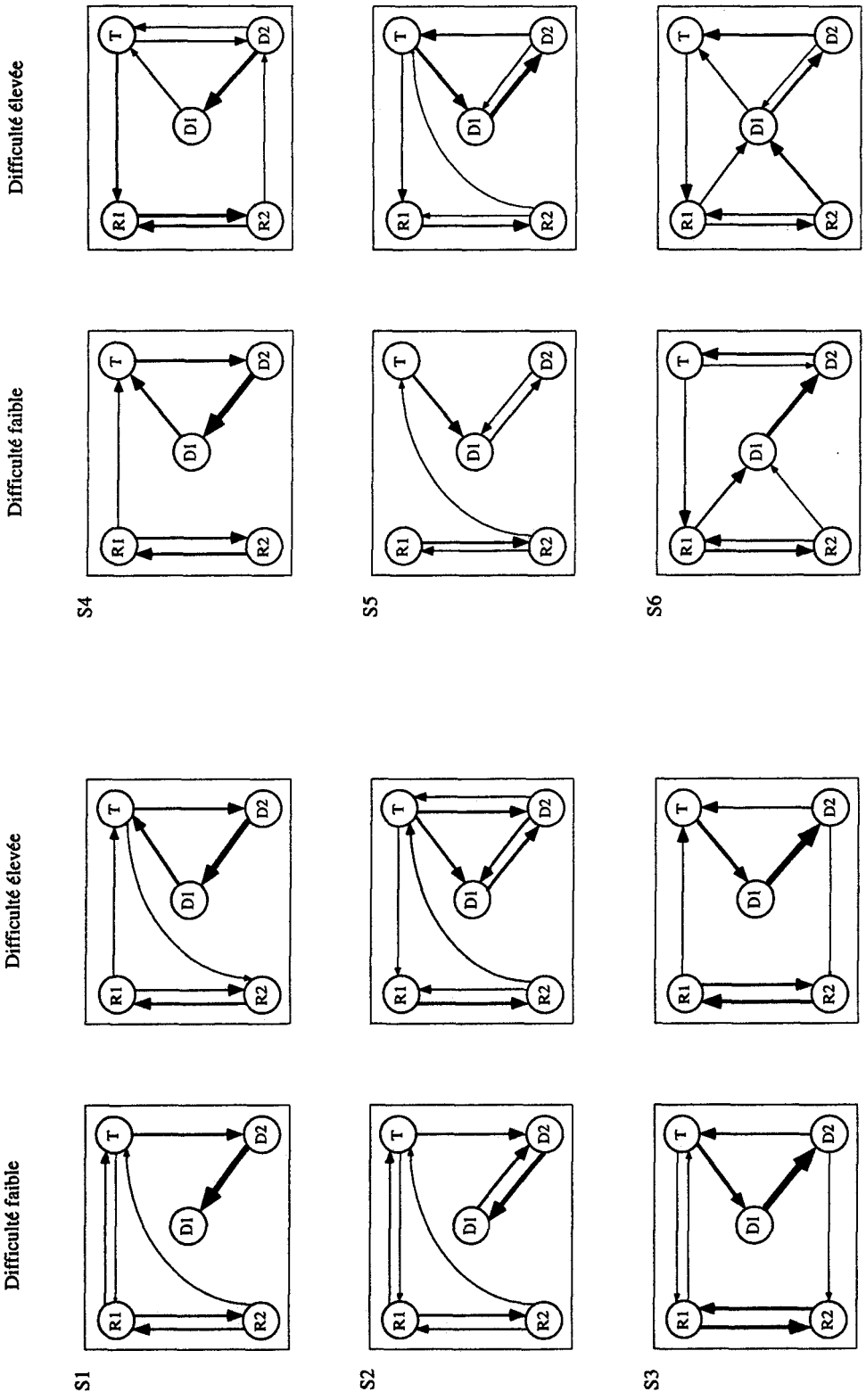


Figure IV.18 : Graphes des attractions, pour les 6 sujets.

L'analyse détaillée des graphes de la figure IV.18 laisse apparaître une structuration du comportement oculaire lorsque la difficulté augmente. En effet, des cycles de scrutation se dégagent, des sens de parcours (sens "de rotation") apparaissent, des échanges bidirectionnels deviennent uni-directionnels, ...

L'examen détaillé des graphes d'attractions obtenus pour le niveau de difficulté élevé fait apparaître deux groupes d'opérateurs, ayant des comportements oculaires bien distincts :

• *1er groupe : sujets 1, 2 et 5.*

Pour ces 3 sujets, on observe des échanges relativement constants - en fonction du niveau de difficulté - entre les 2 tâches de régulation d'une part (échanges bidirectionnels pour les 3 sujets), et entre les 2 tâches discrètes d'autre part (échanges bidirectionnels pour les sujets 2 et 5, et essentiellement dans le sens D2-D1 pour le sujet 1).

D'autre part, la tâche de tracking semble être un point de passage obligatoire entre ces deux groupes de tâches. Des trajets oculaires semblent se dégager, débutant sur cette tâche, continuant dans l'un des deux groupes de tâches (régulations ou tâches discrètes), pour finir à nouveau sur la tâche de tracking.

Le sens de parcours des tâches semble relativement constant pour chaque sujet : sens horaire pour le sujet 1, et sens trigonométrique pour les sujets 2 et 5.

• *2nd groupe : sujets 3, 4 et 6.*

Ces trois sujets semblent parcourir l'écran de manière "circulaire" : les sujets 3 et 4 parcourent les 4 coins de l'écran (sens horaire pour le sujet 3 et trigonométrique pour le sujet 4), tandis que le sujet 6 parcourt successivement les 5 tâches dans l'ordre T-R1-R2-D1-D2 (sens trigonométrique).

On retrouve, pour les trois sujets, des échanges bidirectionnels nombreux entre les deux tâches de régulation, ainsi que les "cycles" de scrutation des tâches discrètes passant par la tâche de tracking, pour les sujets 3 et 4 (avec un sens de parcours curieusement inverse de celui de la "boucle principale").

Il semble donc que le comportement des opérateurs appartenant au premier groupe soit plutôt influencé par la nature des tâches (les opérateurs font soit du tracking, soit de la régulation, soit des tâches discrètes, mais "mélangent" peu les types de tâches), tandis que le comportement des opérateurs du second groupe serait plutôt influencé par la disposition des tâches sur l'écran.

Cette analyse qualitative se base sur l'ensemble des transitions observées pour chaque niveau de difficulté. Elle met en évidence une "structuration" de l'activité oculaire des opérateurs lorsque la difficulté augmente, mais sans tenir compte des aspects temporels.
Le paragraphe suivant vise à étudier l'évolution du désordre oculaire (estimé à l'aide de l'entropie, indice présenté dans le second chapitre au paragraphe V.2.1) au cours des 5 minutes du scénario, notamment en la comparant avec l'évolution de l'indice de charge fourni par la méthode temporelle.

IV.3.2 Résultats temporels

Nous avons présenté dans le second chapitre, au paragraphe V.2.1, des indices permettant d'évaluer le "désordre oculaire" à partir d'une matrice de transitions. Ces indices n'ont pas été utilisés précédemment, dans l'étude globale, car ils sont peu "explicatifs". Par contre, ils sont susceptibles de renseigner sur l'évolution du désordre oculaire au cours du scénario.

Nous nous intéressons ici au désordre oculaire "spatial". Nous n'avons donc pas utilisé le "taux d'entropie" - présenté dans le second chapitre - mais une amélioration de "l'entropie", proposée par ELLIS & STARK /86/ : "l'information conditionnelle". Cet indice est calculé avec la formule suivante :

$$Hc = - \sum_{i=1}^{n} P(i) . \left(\sum_{j=1}^{n} P(i,j) . \log_2 P(i,j) \right), \quad i \neq j$$

où P(i,j) est la probabilité conditionnelle de passage de la zone i à la zone j, P(i) la probabilité d'ordre zéro de la zone i, et n le nombre de zones. Cet indice permet de quantifier la "dépendance statistique" des transitions entre les différentes zones.

L'indice Hc a été calculé pour chaque sujet, sur des intervalles de temps de 10 secondes. La figure IV.19 présente les résultats obtenus pour le sujet 1, en parallèle avec l'indice de charge de travail (Hc max = 2 bits).

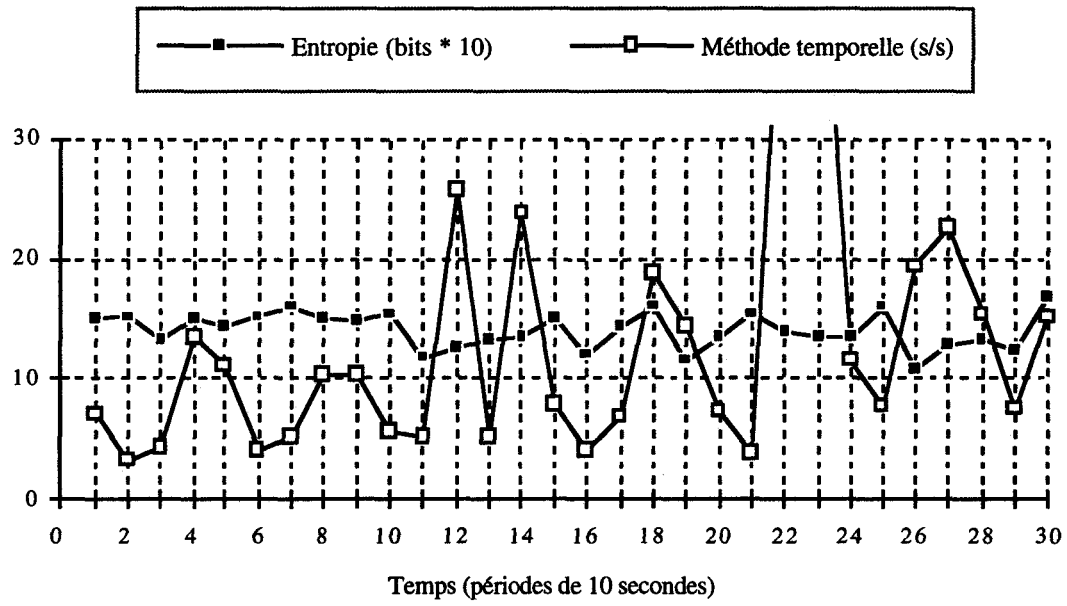


Figure IV.19 : Évolutions du "désordre oculaire" et de l'indice de charge de travail (sujet 1).

L'examen détaillé des résultats obtenus pour chacun des 6 sujets ne laisse apparaître aucun lien systématique entre les deux variables. Les deux variables semblent même être tantôt en phase, tantôt en opposition de phase. Un calcul de coefficient de corrélation linéaire, pour chacun des 6 sujets, fournit des résultats compris entre -0,41 et 0,49. L'absence de résultat provient probablement du faible effectif sur lequel l'indice est calculé : de l'ordre de 30 fixations (pour 10 secondes). Cet effectif est faible pour estimer des probabilités de transition à partir des fréquences observées.

Remarque : Utilisé globalement, c'est à dire sur la totalité des deux niveaux de difficulté, l'indice Hc confirme les résultats obtenus avec les taux de liaison. En effet, les valeurs obtenues pour la difficulté élevée sont inférieures à celles obtenues pour la difficulté faible. Ce résultat indique une augmentation des "dépendances statistiques" entre les zones lorsque la difficulté augmente, et confirme donc la "structuration" du comportement oculaire.

En conclusion, l'étude des transitions entre tâches laisse apparaître un comportement oculaire plus ordonné lorsque les exigences de la tâche sont élevées. Des chemins oculaires privilégiés ainsi que des boucles de scrutation semblent se dégager. Ce résultat, basé sur l'étude des transitions, doit néanmoins être soumis à vérification en s'intéressant aux séquences de consultations de longueurs supérieures à 2.

V. ÉTUDE DES SÉQUENCES DE CONSULTATION

V.1 Extraction des séquences

L'étude des chemins oculaires peut se faire soit à partir des fixations, soit à partir des consultations.

La figure IV.20 présente la distribution du nombre de fixations par consultation, pour l'ensemble des sujets et toutes tâches confondues. Elle permet de vérifier que, globalement, l'influence du niveau de difficulté sur "l'effectif" - en fixations - des consultations est très faible. C'est pourquoi, les chemins oculaires sont étudiés à partir des consultations. De plus, le recours aux consultations présente l'avantage de limiter le nombre de séquences possibles (on ne peut pas observer plusieurs consultations consécutives sur la même zone).

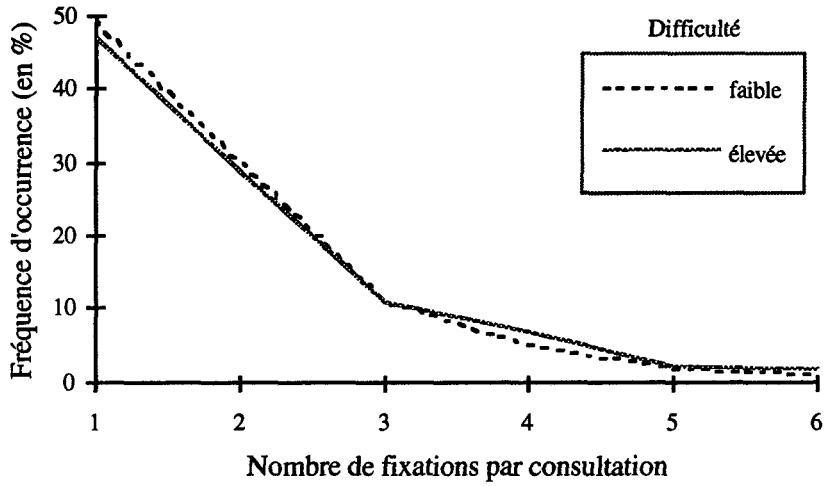


Figure IV.20 : Distribution du nombre de fixations par consultation (tous sujets confondus).

Nous avons étudié les séquences de longueurs 3, 4, 5 et 6 /SIMON et al., 93b/. Ces longueurs paraissent suffisantes, compte tenu du nombre limité de tâches (5) et de l'effectif total de consultations pour chaque sujet (de 400 à 540). Il faut en effet réaliser un compromis entre la longueur des séquences et leur fréquence d'occurrence.

Les séquences sont d'abord extraites globalement, sur les 5 minutes du scénario, puis pour chacun des deux niveaux de difficulté. Elles sont comptabilisées en décalant un "masque" de longueur fixe (entre 3 et 6) sur la séquence "globale" correspondant à la totalité du scénario. Le masque est décalé d'une consultation à la fois. Cette manière de procéder introduit de nombreuses redondances dans les séquences obtenues, mais permet de s'affranchir du problème de la consultation "de départ", dont dépendent les résultats.

V.2 Étude de l'influence de la difficulté

V.2.1 Résultat préliminaire

La figure IV.21 présente le nombre total de séquences utilisées par l'ensemble des sujets, par rapport au nombre "théorique" de séquences $(n.[n-1]^{l-1}$, avec n : nombre de zones, et l : longueurs des séquences). Elle montre que lorsque la difficulté est élevée, les sujets utilisent une proportion plus faible du nombre de séquences possibles. Ce résultat est cohérent avec ceux obtenus avec les taux de liaison. Le problème se pose maintenant de déterminer l'influence du niveau de difficulté sur les séquences de consultations "privilégiées", i.e. les plus fréquentes pour chaque sujet.

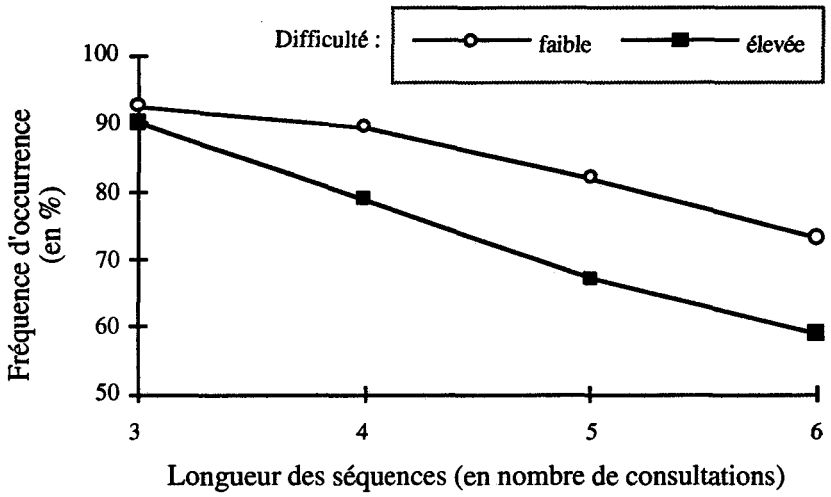


Figure IV.21 : Proportion des séquences utilisées par l'ensemble des sujets, par rapport aux séquences possibles.

V.2.2 Mise en évidence de l'influence du niveau de difficulté

Notre but est de déterminer les séquences de consultations privilégiées, pour chaque sujet, et surtout de détecter l'influence du niveau de difficulté.

Pour cela, on calcule pour chaque séquence d'une longueur donnée l'indice suivant :

$$I(s) = (F_{faible}(s) - F_{élevée}(s)) . F(s) ,$$

où F(s) est la fréquence totale d'occurrence de la séquence s (nombre d'occurrences de la séquence s divisé par le nombre de séquences différentes), $F_{faible}(s)$ et $F_{élevée}(s)$ les fréquences d'occurrence de la même séquence pour les deux niveaux de difficulté. L'idée est de mettre en évidence, pour chaque séquence, les différences entre les deux niveaux de difficulté, en pondérant par la fréquence totale d'occurrence de la séquence.

Donnée à titre d'exemple, la courbe de la figure IV.22 présente les valeurs de l'indice I(s) obtenues sur l'ensemble des sujets, pour les séquences de longueur 3. En abscisses figurent l'ensemble des séquences trouvées. Pour la longueur 3, on retrouve la totalité des séquences possibles ($5 \times 4^2 = 80$).

L'indice I(s) est classé par ordre décroissant. La partie gauche de la courbe regroupe donc les séquences caractérisant le niveau de difficulté faible, tandis que la partie droite regroupe celles caractérisant le niveau de difficulté élevé. En appliquant deux seuils à cette courbe (un seuil positif et un autre négatif), on obtient les séquences "significatives" des deux niveaux de difficulté.

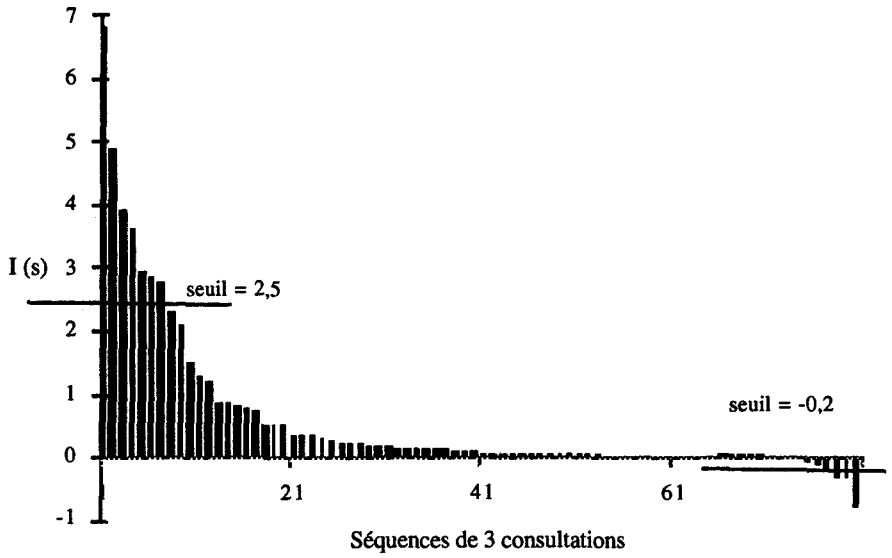


Figure IV.22 : Principe de détection de l'influence du niveau de difficulté sur les séquences de consultations d'une longueur donnée (la courbe concerne les séquences de longueur 3 obtenues pour l'ensemble des sujets).

V.2.3 Résultats individuels

La "technique" décrite précédemment a été utilisée pour l'ensemble des sujets et pour les 4 longueurs de séquences. Donnée à titre d'exemple, la figure IV.23 montre les résultats obtenus avec le sujet 1 pour les séquences de longueurs 5.

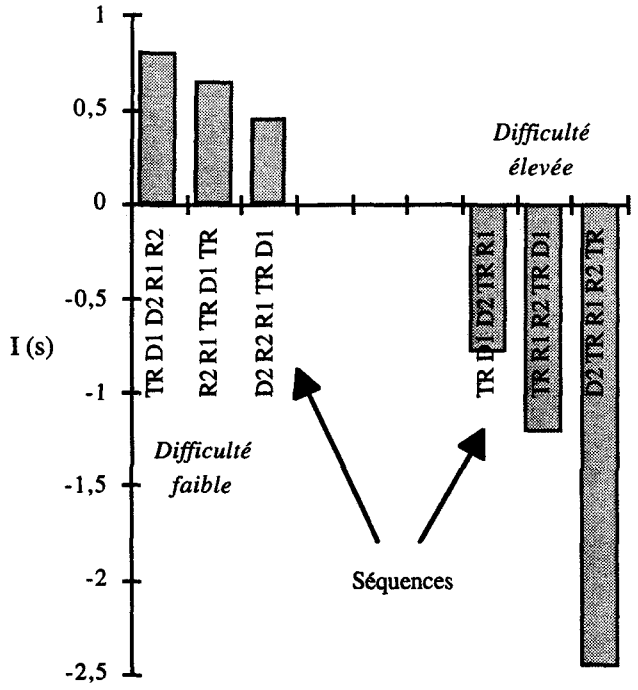


Figure IV.23 : Extraction des principales séquences de consultations (sujet 1).

Seules les séquences "significatives" ont été conservées sur la figure. Un graphe peut alors être dessiné, représentant non plus les transitions mais les chemins oculaires.

Les graphes obtenus pour l'ensemble des sujets sont très similaires à ceux obtenus avec les taux de liaison. Ils ne sont donc pas reproduits ici.

L'étude des séquences de consultations confirme donc les résultats obtenus avec les transitions. Ils les complètent même, puisque les cycles apparaissant avec les taux de consultation sont maintenant confirmés.

VI. CONCLUSION

Vis à vis des objectifs initiaux de l'étude, qui étaient de rechercher l'existence d'une corrélation éventuelle entre la charge instantanée (mesurée par la méthode temporelle) et des indices (à déterminer) de l'activité oculaire, deux conclusions s'imposent : les paramètres caractéristiques des fixations oculaires ne semblent pas adaptés, alors que ceux des transitions entre tâches et des séquences de consultation le sont :

L'influence de la charge de travail sur la durée des fixations semble, dans notre contexte, particulièrement réduite. La durée des fixations semble en effet liée essentiellement à la nature de l'information prélevée : information binaire (état d'un voyant), valeur d'une variable (position d'une aiguille), tendance d'une variable (vitesse d'évolution d'un curseur), ... L'absence de résultats provient probablement de la nature des tâches retenues pour les expérimentations, trop faiblement cognitives. Les temps de traitement des informations, influant sur la durée des fixations, varient alors peu.

La fréquence moyenne des fixations semble peu liée à l'évolution de l'indice de charge de travail fourni par la méthode temporelle. L'intervalle d'étude (10 secondes) est peut-être trop court pour observer une tendance systématique.

Les consultations paraissent plus affectées par le niveau de charge de travail que les fixations. On observe, lorsque la difficulté augmente, une diminution de leur effectif de fixation (La tendance inverse est observée pour la tâche de tracking. Ce résultat est dû probablement à la dynamique très élevée de la cible, voir § II.2.2). Cette diminution est interprétée en termes "d'économie" : économie de "fixations de contrôle", prolongeant certaines consultations en vue, par exemple, de vérifier l'efficacité d'une action correctrice.

Les résultats concernant les transitions et les séquences de consultations sont les plus intéressants et les plus prometteurs, vis à vis de nos objectifs. Ils montrent que, face à une augmentation des exigences du travail, le comportement oculaire de l'opérateur devient plus structuré, présente des régularités plus nombreuses. TOLE et al. /83/ obtiennent un résultat similaire dans un contexte de pilotage d'avion. Leur interprétation est que, lorsque le pilote est "chargé", il dispose de moins de temps pour effectuer divers coups d'œil de vérification. On rejoint donc l'explication proposée au sujet des consultations.

Ce résultat semble décrire ce que SPERANDIO appelle une "régulation des modes opératoires" en fonction du niveau de charge. Lorsque les exigences de la tâche augmentent, l'opérateur adopte des tactiques oculaires plus "économiques", en termes de fixations. Il "optimise" ses trajets oculaires. Il semble donc possible, à partir de l'analyse de l'activité oculaire de l'opérateur, d'estimer indirectement son niveau de charge de travail.

L'objectif initial de cette étude était de proposer un indice de charge de travail instantanée. Les résultats des expérimentations ne semblent guère favorables à une telle évaluation. Le chapitre suivant s'attache à expliquer les résultats obtenus, pour ensuite en proposer quelques utilisations possibles, concernant la charge de travail momentanée.

CHAPITRE V : DÉVELOPPEMENTS ET PERSPECTIVES

I. INTRODUCTION

II. DESCRIPTION D'UN MODÈLE DE L'ACTIVITÉ OCULAIRE DE L'OPÉRATEUR DE SUPERVISION

III. PROBLÈME DE LA CLASSIFICATION DES COMPORTEMENTS OCULAIRES

IV. MISE EN RELATION DES DIVERSES VARIABLES

V. CONCLUSION

I. INTRODUCTION

Le cinquième chapitre vise à tirer les enseignements des expérimentations décrites aux chapitres précédents. On s'y attache à décrire et discuter les résultats obtenus, pour ensuite envisager leur utilisation en situation réelle de travail.

Ce chapitre comporte trois parties :

La première partie utilise des travaux issus de l'Automatique et des Neurosciences pour proposer un schéma descriptif de l'activité oculaire en supervision. Cette description est focalisée sur les résultats obtenus avec les transitions et les séquences de consultations.

La partie suivante évoque le problème de la classification des opérateurs en fonction de leur comportement oculaire. L'analyse - essentiellement qualitative - des transitions et des séquences de consultations semble mettre en évidence deux types de comportements (les "spatiaux" et les "sémantiques"). Dans cette seconde partie, on se propose de tenter de "quantifier" les différences de comportements.

La troisième partie décrit une technique permettant de mettre en relation entre elles l'ensemble des variables caractérisant l'activité de l'opérateur : indice de charge de travail instantanée, indice de performance, caractéristiques de l'exploration oculaire, ... Le but est non seulement d'établir des relations éventuelles, mais également de tenter d'expliquer les résultats obtenus en utilisant l'ensemble des variables.

II. DESCRIPTION D'UN MODÈLE DE L'ACTIVITÉ OCULAIRE DE L'OPÉRATEUR DE SUPERVISION

Cette première partie du cinquième chapitre constitue un essai de modélisation du comportement oculaire de l'opérateur de supervision.

Dans un premier temps, on s'attache à décrire deux approches de modélisation issues de deux domaines totalement différents. Il s'agit d'une approche "Automatique", proposée par ACIER /90/, et d'une approche "Neurosciences", proposée par KOSSLYN et al. /90/. Ces travaux, s'ils sont différents à bien des égards, nous ont paru particulièrement intéressants vis à vis de nos objectifs.

L'étape suivante consiste à exploiter les résultats obtenus lors des expérimentations pour proposer un modèle spécifique au contexte de l'étude.

II.1 Approche "Automatique"

Un schéma général du comportement oculaire d'un opérateur de supervision sur écran graphique, proposé par ACIER /90/, est décrit au premier chapitre (§ IV.2.1, figure I.12). Ce modèle souligne l'importance de la nature de la tâche ainsi que du type de traitement réalisé par l'opérateur. Autrement dit, il fournit essentiellement une description - certes très sommaire - des opérations mentales "de hauts niveaux" impliquées dans la prise d'information visuelle.

En complément de cette description, ACIER /90/ fournit un schéma fonctionnel qui vise à identifier les différents "étages" intervenant lors de la prise d'information proprement dite.

La description précédente (celle de la figure I.12) s'y trouve résumée en une seul boite noire baptisée "Contrôle". Ce schéma fonctionnel fait l'objet de la figure V.1 :

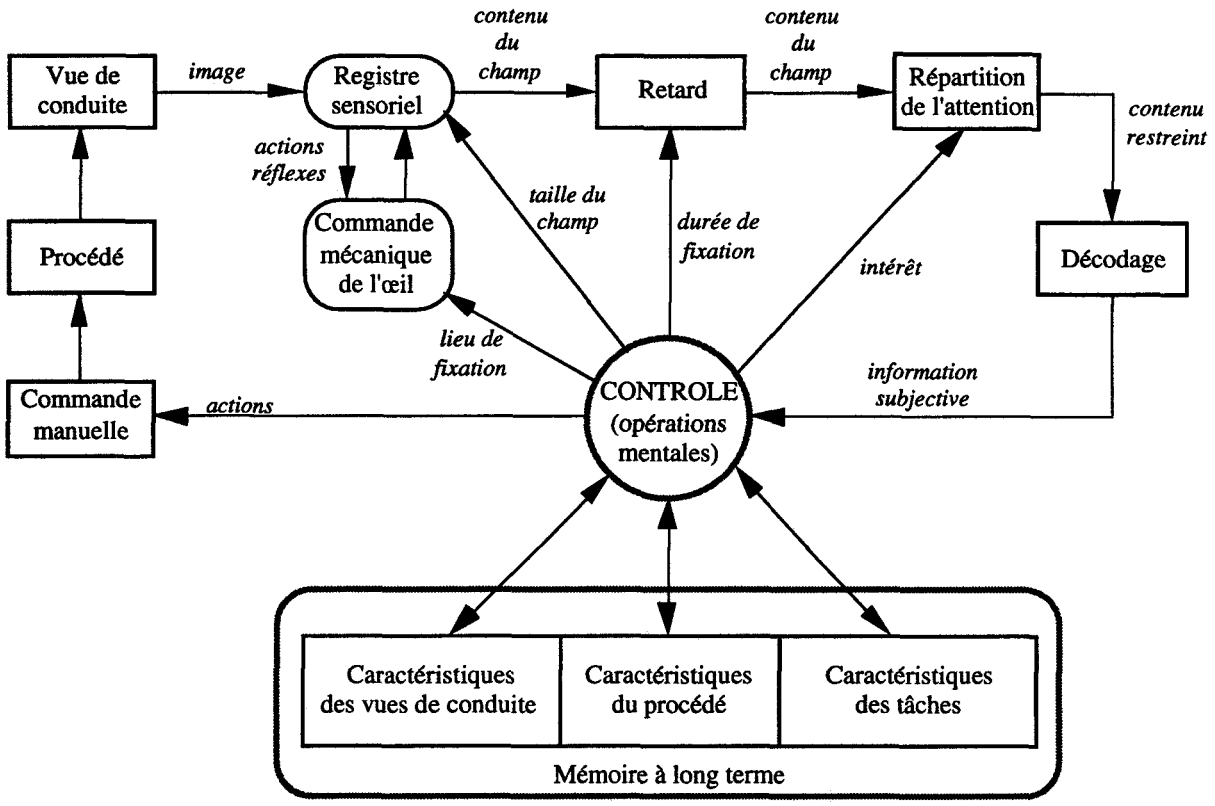


Figure V.1 : Schéma fonctionnel de la prise d'information visuelle en supervision de procédé.

ACIER décrit la prise d'information visuelle comme suit :

A chaque fixation, un ensemble d'objets est projeté sur la rétine, rebaptisée "registre sensoriel". Seul un sous-ensemble de ces objets, correspondant au champ visuel fonctionnel (voir chapitre II, § II.3), est transmis au cerveau. La durée des fixations est représentée par un "retard de transmission".

L'étage de "répartition de l'attention" rend compte du fait que l'attention ne coïncide pas forcément avec le point de fixation ; de plus, lorsque plusieurs objets sont présents dans le champ, l'attention accordée à chacun d'entre-eux n'est pas forcément égale.

L'ensemble des objets transmis ("contenu restreint") est alors décodé pour devenir des informations subjectives, i.e. relatives à la "représentation mentale" de l'opérateur. Ces informations concernent l'état des variables à surveiller (valeur normale ou anormale, évolution lente ou rapide, ...) et permettent à l'opérateur de se faire un jugement sur l'état global du procédé.

Ce modèle a recours à trois "mémoires" :

- Le "registre sensoriel", qui correspond à la rétine et aux organes de pré-traitement associés et englobe donc la totalité du champ visuel.

- La mémoire à court terme, ou mémoire de travail, qui contient les informations subjectives ainsi que les résultats de diverses opérations mentales. Sur le schéma fonctionnel de la figure V.1, elle est intégrée dans la boite "Opérations mentales".

• La mémoire à long terme, qui contient la connaissance de l'opérateur concernant notamment le procédé (modèle interne du fonctionnement de l'installation, pannes possibles, etc), les tâches à réaliser (modes opératoires) et les vues de conduite (informations affichées ou disponibles, organisation spatiale des vues, modes de présentation, etc).

Le contenu des mémoires à long et court termes guide en grande partie la prise d'information. Néanmoins, le choix d'un nouveau "point de fixation" n'est pas obligatoirement la conséquence d'une opération mentale. Il existe notamment une "voie réflexe" reliant directement le registre sensoriel à la commande mécanique de l'œil et qui correspond au "réflexe de fixation" (chapitre I, § IV.1.2).

Le schéma fonctionnel proposé par ACIER a l'avantage de rester simple, tout en recensant un nombre important de caractéristiques de l'activité oculaire. Son principal inconvénient est qu'il décrit une prise d'information "élémentaire", c'est à dire en une seule fixation. Il s'avère peu adapté pour décrire une succession de fixations. De plus, ce modèle ne fait apparaître que deux types de comportements : les comportements réflexes (réflexe de fixation) et les comportements "non-réflexes", c'est à dire guidés par les opérations mentales. Ce modèle n'en constitue pas moins le point de départ de notre description.

II.2 Approche "Neurosciences"

Dans un tout autre domaine, KOSSLYN et al. /90/ proposent une description de l'organisation fonctionnelle des "étages de hauts niveaux" de la perception visuelle. Ce modèle est, au départ, plutôt dédié à la *reconnaissance* et à l'*identification* d'objets quelconques. Il est issu de travaux en Neurosciences sur le système visuel des "primates" et sert à étudier l'influence de certains "dommages cérébraux" sur son fonctionnement.

L'idée de départ est que le cerveau comprend un certain nombre de "sous-systèmes" travaillant ensemble. Ces différents sous-systèmes correspondent à des aires cérébrales relativement bien définies (environ 30 zones distinctes impliquées dans le traitement des informations visuelles ont déjà été identifiées). Bon nombre de dysfonctionnements du système visuel proviennent d'une rupture des interconnections entre ces différents sous-systèmes, ou d'une détérioration des sous-systèmes eux-mêmes.

Le modèle proposé par les auteurs fait l'objet d'une simulation informatique. Il leur permet d'étudier les liens entre des dommages "causés" aux aires cérébrales et les symptômes observables sur le fonctionnement du système visuel.

II.2.1 Structure générale du modèle

La figure V.2 présente la structure générale du modèle proposé par KOSSLYN et al. :

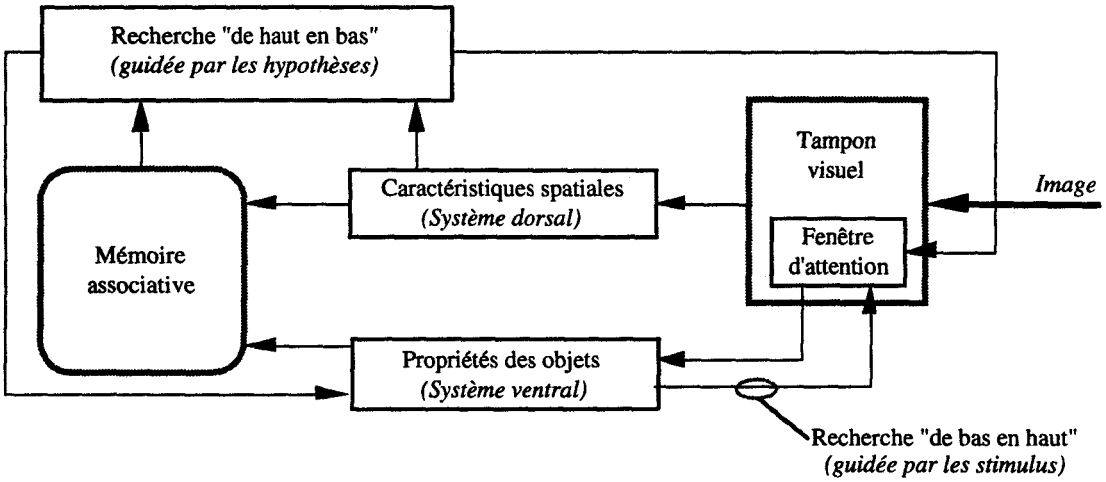


Figure V.2 : Organisation fonctionnelle de la perception visuelle /KOSSLYN et al., 90/.

• Le ***tampon visuel*** correspond à l'image projetée sur la rétine. Il correspond donc au champ visuel. Sa résolution est celle de la rétine.

• La ***fenêtre d'attention*** permet de rendre compte de l'aspect sélectif de la perception visuelle. En effet, la quantité d'information contenue dans le tampon visuel est très supérieure à la capacité de transmission de la "connexion" entre le capteur "œil" et le cerveau. Ceci implique une allocation successive de cette capacité limitée aux différents "objets" présents dans le champ.

• L'une des idées directrices du modèle concerne la séparation du "Quoi" et du "Où" : les propriétés des objets (telles que leur forme, leur couleur, ...) et leurs caractéristiques spatiales (leur position, leur orientation, ...) sont traitées par deux systèmes fonctionnant en parallèle mais de manière totalement indépendante. Il s'agit respectivement des ***systèmes ventral et dorsal,*** correspondant à deux sous-systèmes corticaux distincts du système visuel.

• Ces deux sous-systèmes alimentent la ***mémoire associative***, qualifiée ainsi car il est possible d'accéder aux informations qu'elle contient par plusieurs modalités sensorielles (les auteurs donnent l'exemple du "chat" : on peut l'identifier par la vue, par l'ouïe ou par l'odorat). Ces informations concernent, par exemple, le nom de l'objet, la catégorie à laquelle il appartient, les contextes familiers dans lesquels on peut le rencontrer, ses fonctions, son coût, éventuellement ses divers constituants et leurs relations spatiales, ...

• L'emplacement et l'étendue de la fenêtre d'attention peuvent être ajustés par deux mécanismes différents :

- Les mécanismes de pré-attention (de "bas en haut") sélectionnent une région de l'espace visuel uniquement sur la base des propriétés physiques des stimulus : couleur, texture, intensité, etc. Ce mécanisme entre en jeu dans deux circonstances :

  - lors de la fixation "initiale", face à une nouvelle situation, et donc avant que des hypothèses soient générées quant à la nature des stimulus ;

  - lorsqu'un changement inattendu se produit (mouvement brusque d'un objet, variation d'intensité lumineuse, ...), attirant l'attention sur quelque chose de neuf. Il s'agit du "réflexe de fixation", déjà mentionné dans le premier chapitre (§ IV.1.2).

Dans les deux cas, la fenêtre d'attention peut être ajustée sans interprétation préalable des stimulus.

- La fenêtre d'attention peut également être guidée "de haut en bas", c'est à dire de manière systématique, afin de rechercher le stimulus attendu. L'information stockée dans la mémoire associative est alors utilisée pour générer des hypothèses ; ces hypothèses sont ensuite soumises à vérification, en déplaçant "avec méthode" la fenêtre d'attention.

II.2.2 Description des différents sous-systèmes

La figure V.3 ci-dessous permet de détailler les différents "sous-systèmes" :

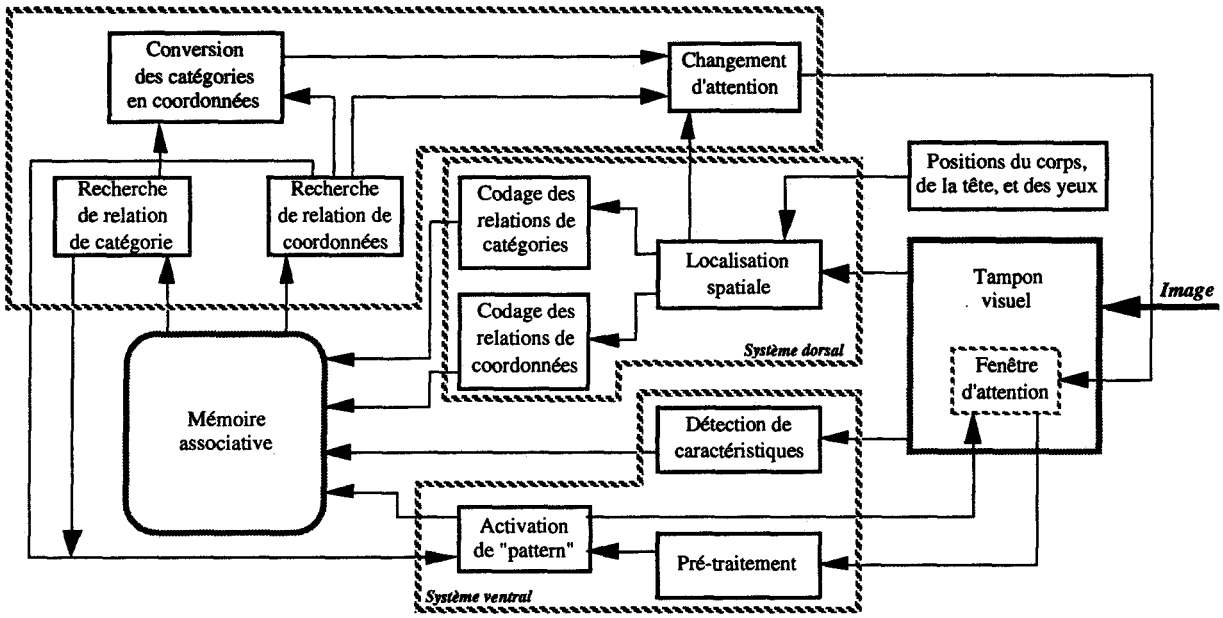


Figure V.3 : Différents sous-systèmes intervenant dans la perception visuelle /KOSSLYN et al., 90/.

1) Système "dorsal" :

• Le sous-système de *localisation spatiale* : La position des objets contenus dans le tampon visuel est relative à la rétine et non à l'espace visuel. Cette représentation est peu pratique dans bien des situations (par exemple, dans le cadre d'une tâche de navigation, pour l'identification de "gros objets" encodés en plusieurs fixations, ou encore pour l'examen d'une scène dans sa globalité). Un sous-système de "localisation spatiale" se charge donc, compte tenu des positions du corps, de la tête et des yeux, de déterminer la position des objets dans l'espace, leur taille, leur orientation, le tout pour un certain "niveau de résolution".

• Le sous-système de *codage des relations de catégories* : Après cette transformation en coordonnées spatiales, il faut "encoder" les informations pour ensuite les stocker dans la mémoire associative. Un problème se pose pour l'identification des objets ayant une infinité de configurations possibles, comme par exemple un corps humain. Il est en effet impossible de stocker en mémoire toutes les configurations possibles. Par conséquent, si la totalité de l'objet est encodé en une fixation, il est très peu probable qu'il existe un "pattern" correspondant déjà stocké en mémoire. Il paraît donc plus efficace d'encoder les aspects invariants de l'objet. Pour revenir à l'exemple précédent, un corps humain a toujours le même aspect général : une tête, un tronc, deux bras, deux jambes, ... Il est possible d'avoir une représentation des relations entre les différentes parties de l'objet, relations valables quelque soient les transformations subies par cet objet. Ces relations, entre objets ou entre plusieurs parties d'un même objet, sont du type : "connecté à", "à gauche de", "au-dessus de", ... Elles sont calculées à partir de une ou plusieurs fixations successives.

• Le sous-système de *codage des relations de coordonnées* : Pour certains objets, l'identification ne peut se produire qu'à partir de relations spatiales "fines" entre les différentes parties les constituant. Pour conserver le même exemple, si la tête d'un homme comprend toujours deux yeux, un nez, une bouche, ..., éléments situés toujours aux mêmes endroits du visage, ce sont - entre autres - les distances précises entre ces différents éléments qui vont permettre de reconnaître un individu particulier. Autrement dit, le sous-système de localisation spatiale calcule toutes les positions dans un repère unique, et le sous-système de codage des relations de coordonnées calcule les relations entre différentes paires d'objets ou paires de parties d'un même objet. Ce sous-système est notamment très important pour les tâches de "navigation" en général. Par exemple, dans le cadre de l'escalade, le grimpeur a besoin non seulement des positions relatives des différentes prises, pour élaborer sa tactique d'ascension, mais également des distances exactes entre prises, pour savoir s'il peut effectivement les atteindre.

2) Système "ventral" :

• Le sous-système de *pré-traitement* : Ce sous-système utilise des combinaisons d'arêtes, de textures, de couleurs et d'intensités pour localiser les propriétés "non accidentelles" du signal d'entrée (i.e. le contenu de la fenêtre d'attention). Ces propriétés "non accidentelles" sont appelées "traits déclencheurs" ("trigger features"). Elles sont constantes, quelles que soient les conditions dans lesquelles l'objet est "inspecté". Ce sous-système est supposé marquer ces "traits déclencheurs" sur l'image elle-même, le tout étant ensuite codé et stocké dans la mémoire associative. Ce processus opère "de bas en haut" (il est entièrement guidé par les propriétés des stimulus), avant l'identification proprement dite.

• Le sous-système d'*activation de pattern* : L'identification d'un objet demande que "l'entrée" corresponde à une information stockée au préalable en mémoire. Cette dernière contient les représentations des objets déjà vus. Ces représentations sont comparées au signal d'entrée, et la reconnaissance se produit lorsqu'il y a une ressemblance "suffisante". La sortie de ce sous-système peut être considérée comme un "nom" (qui n'est pas exprimé dans un langage naturel), avec un certain "degré de confiance" associé, selon qu'on cherche à connaître un type d'objet ou une instance particulière.

• Le sous-système de *détection de caractéristiques* : Toute la vision n'est pas centrée sur la représentation des formes. Les jugements esthétiques, par exemple, dépendent de combinaisons complexes de caractéristiques. Il existe un sous-système, assez mal défini, qui extrait les caractéristiques autres que de formes et les envoie directement dans la mémoire associative.

Le sous-système "d'activation de pattern" intervient dans le mécanisme de pré-attention ("de bas en haut") décrit au paragraphe II.2.1 : lorsqu'une forme générale a été reconnue, sa "classification" et le "degré de confiance" associé sont transmis à la mémoire associative, ce qui "marque" l'identification de l'objet. Le paragraphe suivant décrit le mécanisme complémentaire, "de haut en bas".

3) Système permettant de tester une hypothèse :

Deux mécanismes permettent donc de déplacer l'attention :

- un mécanisme "de bas en haut", ou "guidé par les stimulus", décrit précédemment ;
- un mécanisme "de haut en bas", basé sur la connaissance, les attentes, les convictions, etc.

Le second mécanisme, le plus complexe, utilise donc la connaissance pour formuler puis tester des hypothèses sur les propriétés qu'est censé avoir l'objet à identifier. Pour cela, deux sous-systèmes de recherche de relations de coordonnées et de catégories "piochent" directement dans la mémoire associative. Ces deux sous-systèmes opèrent simultanément et s'inhibent ensuite mutuellement, après "confrontation", pour conserver l'information la plus intéressante.

Le problème des relations de catégories est qu'elles ont leur propre système de coordonnées. Elles doivent donc être converties en la spécification d'un endroit précis de l'espace, d'où la présence d'un sous-système de conversion de catégories en coordonnées.

Un quatrième sous-système se charge de "déplacer" l'attention, en ajustant les positions de la fenêtre d'attention, des yeux, de la tête et du corps. De plus, ce sous-système est capable de modifier la "mise au point" i.e. la profondeur de champ, information implicite dans le buffer visuel. Pour pouvoir déplacer la fenêtre d'attention à l'intérieur du buffer visuel, c'est à dire avec des coordonnées relatives à la rétine, le sous-système doit être capable de réaliser la transformation inverse de celle réalisée par le sous-système de localisation spatiale.

Ce modèle est plus détaillé mais également plus complexe que le précédent (il fait d'ailleurs l'objet d'une simulation informatique). Il faut garder à l'esprit qu'il a été conçu pour décrire la reconnaissance et l'identification d'objets ou de scènes quelconques, ce qui est sensiblement différent de notre contexte.

Son principal avantage, par rapport au modèle précédent, est qu'il est capable de décrire une recherche d'informations en plusieurs "étapes", par le biais de plusieurs hypothèses successives. Il est donc capable de rendre compte des séquences de fixations. De plus, ce modèle fait apparaître un comportement intéressant dans le contexte de la supervision, qui est le "pattern matching".

Le modèle proposé par KOSSLYN et al. présente donc quelques caractéristiques particulièrement intéressantes vis à vis à la fois du contexte de l'étude et des résultats expérimentaux obtenus.

II.3 Proposition d'un modèle descriptif

Le schéma fonctionnel proposé avec la figure IV.4 permet de décrire les principaux comportements oculaires "de base", en relation avec les comportements cognitifs de l'opérateur tels que les décrit RASMUSSEN :

- le réflexe de fixation, guidé exclusivement par les stimulus ;
- le comportement oculaire guidé par les hypothèses, qui correspond essentiellement aux raisonnements basés sur la connaissance ;
- le "pattern matching", qui correspond plutôt à des comportements basés sur l'habileté ou sur des règles.

Au sujet du "pattern matching", BERGER /92/ a étudié le comportement cognitif de l'opérateur de supervision de la chaufferie d'un sous-marin nucléaire. Il met en évidence que l'opérateur traite les indicateurs au moyen "d'images". Autrement dit, il semble identifier l'état du procédé à partir d'une reconnaissance de formes.

La notion de "catégorie" utilisée par KOSSLYN s'apparente plus, dans notre cas, à la "sémantique" et à la "nature" des tâches. En effet, les tâches sont connues par leur disposition à l'écran, mais également par les "liens" qui les unissent. Dans notre cas précis, ces liens sont

inexistants, les tâches étant toutes indépendantes. Néanmoins, les résultats expérimentaux semblent montrer que certains opérateurs considèrent les tâches par "nature", ou par "catégorie". C'est le cas notamment des opérateurs du premier groupe, décrit dans le quatrième chapitre au paragraphe IV.3.1. Ces résultats sont d'ailleurs en accord avec ceux de DICK /80/, obtenus dans un contexte de pilotage d'avion. L'auteur fait remarquer que les pilotes semblent considérer des "paquets d'informations" ("information bundles"). Il est un peu osé, dans notre cas, de parler de "paquets de tâches", vu leur faible effectif. Néanmoins, il s'agit là d'un aspect qui mérite des expérimentations supplémentaires.

Il semble donc que les opérateurs peuvent accéder aux différentes tâches par deux mécanismes :

- un accès "direct", par les coordonnées ;
- un accès "indirect", par les catégories.

Autrement dit, l'opérateur peut décider de consulter la tâche "en haut à gauche de l'écran", ou "l'autre tâche de régulation".

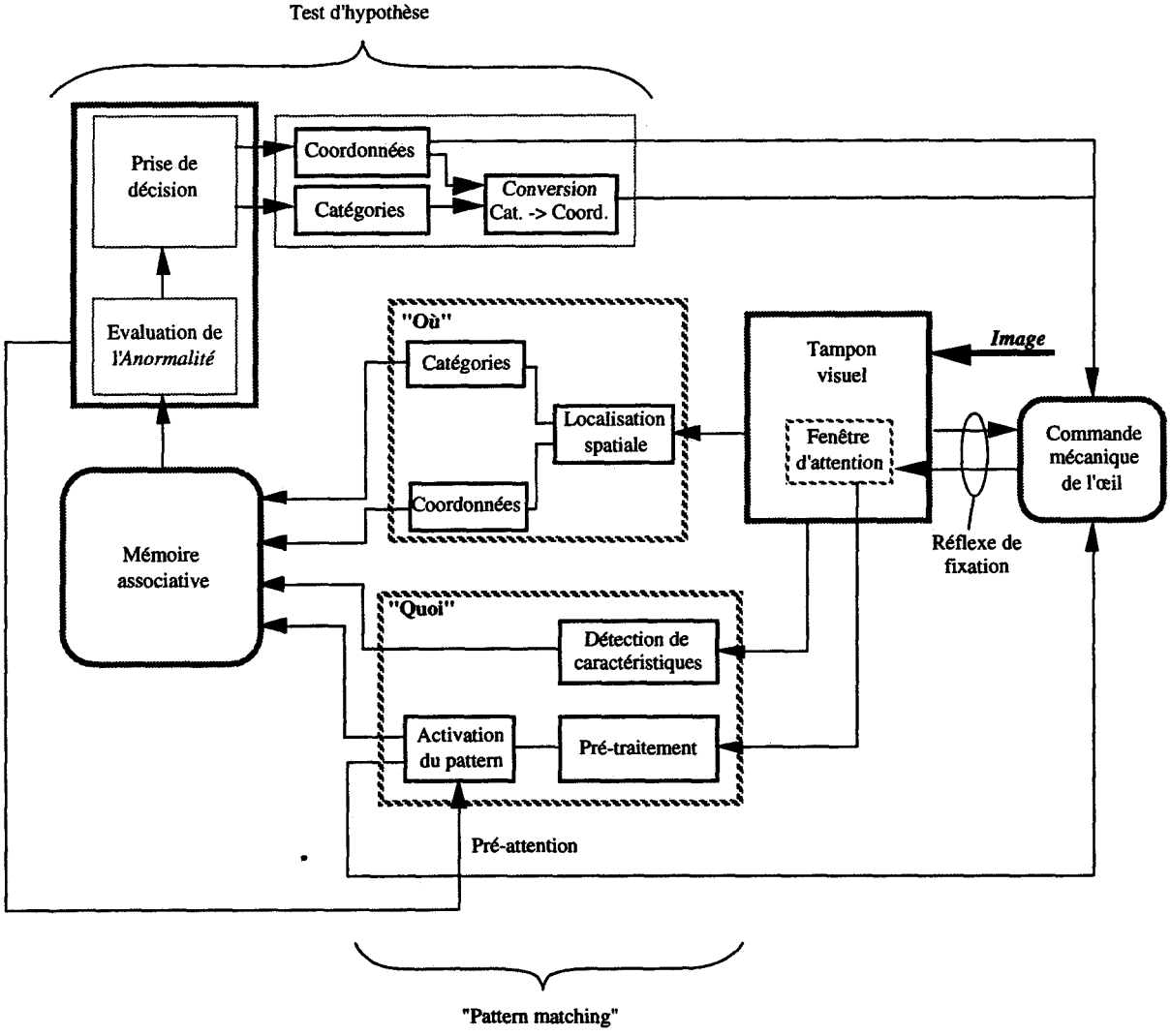


Figure V.4 : Schéma fonctionnel de la prise d'information visuelle en supervision, adapté de KOSSLYN et al. /90/ et ACIER /90/.

Concernant la "structuration" du comportement oculaire lorsque la charge de travail augmente, celle-ci peut provenir d'une utilisation quasi-exclusive du mécanisme de "pattern matching", au détriment de celui de "test d'hypothèse". Ce dernier, plus "lourd", induit probablement un comportement plus aléatoire, à cause de "coups d'œil de vérification" issus d'opérations mentales possibles uniquement lorsque les exigences du travail le permettent. Il s'agit là d'une explication proposée par TOLE et al. /83/, dans un contexte de pilotage d'avion.

Toutes ces hypothèses doivent naturellement être soumises à vérification. Il serait notamment intéressant d'augmenter le nombre de tâches, de faire varier leur disposition à l'écran, de créer des liens sémantiques entre elles, ... Autrement dit, une perspective de recherche consiste à étudier les paramètres que sont la nature des tâches et leur disposition à l'écran.

III. ANALYSE QUANTITATIVE DES CHEMINS OCULAIRES EN VUE D'UNE CLASSIFICATION DES OPÉRATEURS

Dans le quatrième chapitre, les résultats expérimentaux les plus probants ont été obtenus suite à une étude essentiellement qualitative des graphes des liaisons entre taches ainsi qu'une étude statistique des séquences de consultations. On se propose, dans cette seconde partie, de recenser des éléments permettant de réaliser une étude similaire, mais quantitative. Le problème posé est donc le suivant : Comment caractériser les chemins oculaires, et comment les comparer ? Cette comparaison peut être intra-individuelle, pour étudier l'influence d'un facteur tel que le niveau de charge, ou inter-individuelle, en vue de réaliser une classification des opérateurs.

L'analyse des chemins oculaires focalise sur les caractéristiques spatiales des fixations. Les trois parties suivantes concernent trois codages possibles de ces caractéristiques.

III.1 Utilisation des coordonnées cartésiennes des fixations

Une première solution pour décrire les chemins oculaires consiste à utiliser directement les "positions successives du regard". Autrement dit, un chemin est caractérisé par une série de couplets (X, Y) correspondant aux positions des fixations successives (il s'agit en fait des coordonnées du barycentre du "nuage de points" correspondant à la fixation). Ce codage est le plus simple qui soit, puisqu'il consiste à utiliser directement la position absolue du regard mesurée par l'oculomètre, sans se soucier du contenu de la scène.

LOSLEVER et ROUSSEAU /93/ utilisent ce "codage" dans leurs travaux sur la lecture d'images publicitaires. En effet, il est souvent difficile d'effectuer un découpage a priori de telles images en "zones d'intérêt".

Si un sujet est caractérisé par une suite de fixations F_i (avec i variant de 1 à NF), les séquences de fixations peuvent être construites comme suit (pour les séquences de longueur 3, par exemple) :

$$\text{séquence n° j :} \qquad S_j = \{F_j, f=j, j+1, j+2\} \text{ avec } (j+2) \leq NF$$

Chaque séquence est donc "indicée" par sa première fixation et peut être décrite par les coordonnées des 3 points qui la composent :

$$S_j = \{ (X_f, Y_f), f=j, j+1, j+2\}$$

En raison du caractère purement géométrique des données, la métrique entre deux séquences peut être la métrique euclidienne. Soient S^i_s la séquence n° s du sujet i et $S^{i'}_{s'}$ la séquence n° s' du sujet i' ; la distance les séparant peut être calculée comme suit :

$$d^2\left(S^i_s, S^{i'}_{s'}\right) = \sum\left(\left(X^i_f - X^{i'}_f\right)^2 + \left(Y^i_f - Y^{i'}_f\right)^2\right)$$

avec f=s, s+1, s+2 et
f'=s', s'+1, s'+2

Si i=i', l'ensemble des distances calculées permet d'évaluer la "répétitivité" du comportement oculaire du sujet i. Si s=s', les distances calculées traduisent "l'identité chronologique" des comportements des deux sujets.

LOSLEVER et ROUSSEAU utilisent donc cette technique pour étudier la lecture d'une image publicitaire. Ils effectuent le regroupement automatique des séquences par une classification ascendante hiérarchique. Une analyse "manuelle" du résultat de la classification est ensuite réalisée, pour déboucher sur une comparaison avec la sémantique de l'image.

Le principal défaut de cette technique est qu'elle nécessite de connaître les coordonnées absolues des points de fixations ! Elle est donc inopérante dans le cas d'enregistrements oculométriques sous forme de bandes vidéo, pratique pourtant courante. Un autre inconvénient provient de l'interprétation des résultats de l'analyse, nécessitant une mise en correspondance parfois "laborieuse" avec le contenu de la scène. Enfin, les chemins oculaires étudiés doivent tous être de même longueur, ce qui paraît un peu restrictif.

III.2 Codage spatial avec valeurs d'appartenance binaires

Cette seconde solution a recours à un découpage a priori de "l'image scène" en zones d'intérêt. Un caractère peut être associé à chacune des zones. Une séquence de fixations peut alors être transformée en chaîne de caractères.

Ainsi codés, les chemins oculaires peuvent faire l'objet d'une étude statistique en utilisant des techniques de traitement de chaînes de caractères, techniques usitées notamment en reconnaissance de formes (recherche des plus longues sous-chaines communes, ...). Ce type d'étude fait l'objet du paragraphe V du quatrième chapitre.

La classification "quantitative" des opérateurs nécessite de disposer d'un critère de distance. Dans le paragraphe précédent, le calcul de distance se fait sur des séquences de longueurs identiques. Cela revient à "délaisser" la dimension temporelle des fixations, dimension qui n'apparaît plus que sous la forme d'un ordre chronologique. Dans la "pratique", il paraît plus intéressant de travailler sur des "fenêtres temporelles" (i.e. des intervalles d'étude correspondant, par exemple, à plusieurs niveaux de charge de travail). Le problème qui se pose alors est celui de la comparaison de deux chemins oculaires de longueurs différentes.

HACISALIHZADE et al. /92/ proposent d'utiliser des algorithmes propres au traitement de chaînes de caractères pour évaluer la distance entre deux chemins oculaires de longueurs quelconques. Ces algorithmes sont basés sur la notion de "côut d'édition" d'une chaîne de caractères en une autre, sachant qu'il existe trois opérations de base : la *substitution*, la *suppression* et l'*insertion* d'un caractère /WAGNER & FISCHER, 74/. Chacune de ces trois opérations de base correspond à un coût élémentaire qu'il s'agit de déterminer, compte tenu des spécificités du domaine d'application. HACISALIHZADE et al. proposent comme valeurs :

- *Substitution* : 1 ;
- *Insertion* : 2 ;
- *Suppression* : 3.

Ils soulignent que ces coûts ont été déterminés de manière empirique. Il s'agit en effet de la difficulté majeure pour la mise en œuvre de cette technique par ailleurs "séduisante".

HACISALIHZADE et al. donnent comme exemple d'application de cette technique la lecture d'une œuvre d'art, c'est à dire la lecture d'une image "fixe". Les coûts peuvent être déterminés - même empiriquement - en fonction de la configuration spatiale des différentes zones et de leur sémantique. Notre contexte expérimental est très différent dans la mesure où chaque tâche possède non seulement sa propre zone graphique, mais en plus est caractérisée à chaque instant par son "état". Il paraît donc indispensable de tenir compte, en plus des aspects spatiaux des tâches, de l'évolution des variables.

Dans les modèles qualitatifs de l'activité oculaire basés sur les files d'attente, l'hypothèse émise est que l'opérateur essaie en permanence de minimiser le risque de ne pas consulter une variable en défaut. Ainsi, on a vu au premier chapitre avec CARBONELL (§ IV.2.2) qu'un coût est associé à chaque variable, coût relatif au dépassement d'un seuil prédéterminé. Autrement dit, selon la "théorie" de CARBONELL, on peut supposer que les différences de comportement oculaire proviennent - du moins en partie - d'une estimation différente de ces coûts "subjectifs" selon les opérateurs.

Ceci nous conduit à la notion "d'anormalité" d'une situation. En effet, l'anormalité permet d'exprimer le degré subjectif de "dysfonctionnement" perçu par l'opérateur /ACIER, 90/. Cette fonction d'anormalité peut être définie comme un gradient de 0 à 1 :

- La valeur "0" correspond à une situation complétement normale (coïncidence entre la "mesure" et la "consigne").
- La valeur "1" correspond à une situation complétement anormale, induite par le franchissement d'un seuil limite mettant "en péril" le système supervisé.

La courbe représentant la valeur d'anormalité en fonction de la valeur de la variable peut être "esquissée" à partir de l'interview d'experts. ACIER /90/ propose, lui, de l'obtenir à partir de l'activité oculaire des opérateurs. Pour cela, il formule l'hypothèse suivante :

La validation d'un défaut suit de quelques instants l'observation en vision centrale d'un écart de consigne élevé.

Dans notre cas, on suppose qu'une action manuelle sur une tâche correspond à la détection d'un défaut. Pour chaque action, la fixation précédente sur la tâche est recherchée, et la valeur de la variable correspondant à cette fixation est relevée. La fonction d'anormalité est alors définie comme la fonction de répartition normée des valeurs de détection.

En guise d'exemple, la figure V.5 ci-dessous fournit la fonction d'anormalité obtenue pour l'ensemble des sujets et pour les deux tâches de régulation.

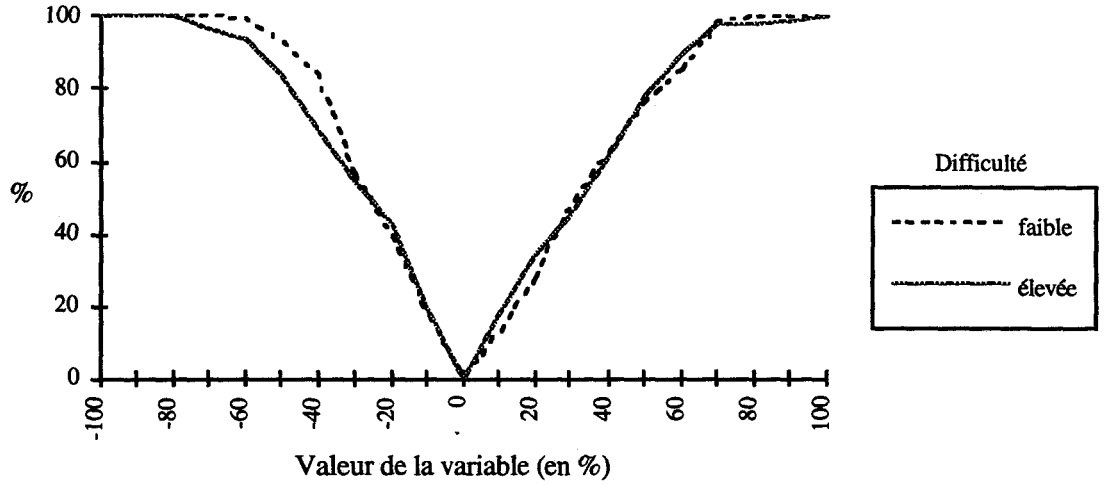


Figure V.5 : Exemple de fonction d'anormalité (pour les deux tâches de régulation, tous sujets confondus).

L'utilisation des fonctions d'anormalité pour déterminer les coûts intervenant dans les calculs de distance entre chemins oculaires constitue une perspective de recherche intéressante. De même, un effort important est à consacrer à la sélection des algorithmes les mieux adaptés aux spécificités du contexte. La littérature à ce sujet est abondante /ABE & SUGITA, 82//HALL & DOWLING, 80/.

Certains travaux utilisent les chaînes de caractères pour décrire l'activité "en général" d'un opérateur. Par exemple, MORAY et al. /92/ étudient ainsi la stratégie adoptée par l'équipage d'un hélicoptère au cours d'une mission de recherche et de secours (tâche simulée et simplifiée). Il décrit les différentes "activités" à l'aide de caractères, et cherche ensuite à en extraire un "modèle" sous la forme d'une grammaire. Les tâches utilisées pour nos expérimentations semblent trop peu cognitives pour envisager une étude similaire, focalisée naturellement sur l'activité oculaire. Il s'agit néanmoins d'une perspective de recherche particulièrement intéressante.

III.3 Codage spatial avec valeurs d'appartenance "floues"

Le "codage" précédent, à l'aide de caractères, se prête parfaitement à un dépouillement manuel d'enregistrements vidéo de l'activité oculaire. Sa principale limitation provient de l'objectivité de "l'opérateur" qui dépouille !

Par contre, dans le cas d'un dépouillement totalement automatique, il y a un risque de perte d'information. Le découpage de l'image scène est en effet toujours délicat. De plus, quoiqu'il arrive, la machine sera booléenne dans l'affectation des fixations aux diverses zones.

Pour éviter cette perte d'information, une solution consiste à utiliser un découpage "flou". Cette approche repose sur la théorie des sous-ensembles flous proposée par ZADEH et consiste à utiliser des valeurs d'appartenance à une modalité comprises entre 0 et 1, et non binaires. Le principe d'un tel codage est donné en figure 6 :

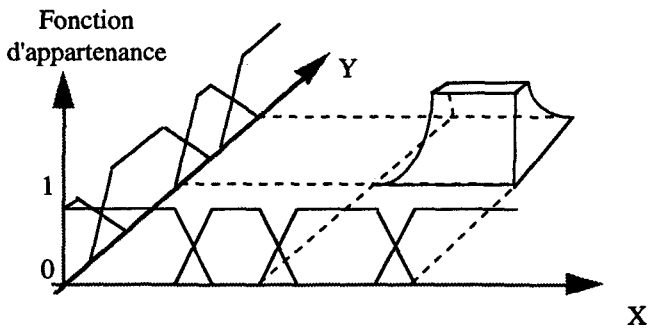


Figure V.6 : Principe du découpage d'une image en zones "floues" /ROUSSEAU et al., 93/.

Nous avons utilisé pour nos expérimentations des fonctions d'appartenance binaires pour décrire l'activité oculaire. En effet, pour des raisons exposées au troisième chapitre (§II.3.2), le graphisme des tâches a été choisi de telle sorte que les sujets travaillent exclusivement en vision centrale. De plus, la "vue de conduite" présentée aux sujets était peu chargée, avec cinq zones graphiques seulement. Dans ces conditions, un codage spatial avec des fonctions d'appartenance binaires s'avère tout à fait satisfaisant.

Cependant, en situation réelle de travail (où les écrans des consoles de supervision sont beaucoup plus "chargés", l'information beaucoup plus dense), le recours à des fonctions d'appartenance "floues" paraît particulièrement intéressant. Ces dernières permettent tout d'abord de tenir compte facilement de "l'imprécision" du capteur oculométrique. De plus, elles constituent une approche intéressante pour prendre en compte l'apport de la vision "périfovéale" /ROUSSEAU, LOSLEVER et al., 93/ (Notons au passage qu'un codage similaire peut être utilisé pour la durée des fixations).

L'utilisation d'un tel codage pour caractériser notamment les chemins oculaires constitue une autre perspectives de recherche. De plus, l'élaboration d'un critère de distance entre chemins oculaires ainsi codés s'avère encore plus ardu que précédemment.

IV. MISE EN RELATION DES DIVERSES VARIABLES

Dans les paragraphes et même les chapitres précédents, nous nous sommes intéressés essentiellement à l'influence de la charge de travail de l'opérateur sur sa prise d'information visuelle. Notamment, les résultats présentés dans le chapitre IV consistent en une étude statistique des caractéristiques de l'activité oculaire, caractéristiques mises en relation avec le niveau de difficulté de la tâche ou l'indice de charge instantanée.

Or, il semble intéressant de prendre également en compte d'autres variables temporelles telles que les écarts par rapport aux consignes (pour les trois tâches continues) ou les actions manuelles de l'opérateur.

Cette partie décrit une technique permettant de mettre en relation simultanément ces différentes variables (pour rappel, l'ensemble des variables recueillies ou calculées à chaque expérience est recensé avec la figure IV.1).

IV.1 Variables temporelles

IV.1.1 Provenance des variables

Les variables peuvent être relatives à l'opérateur proprement dit, ou provenir du système homme-machine considéré dans sa globalité :

• *Variables caractérisant l'activité de l'opérateur* : il s'agit des actions manuelles de l'opérateur (sur le clavier et le joystick), de son activité oculaire, et de l'indice de charge de travail instantanée.

Dans la suite du paragraphe, ces variables sont désignées par des lettres majuscules :

- T, pour l'action (continue) sur le joystick de la tâche de tracking ;
- R1 et R2, pour les actions correctrices sur les deux tâches de régulation ;
- D1 et D2, pour les acquittements des deux tâches discrètes ;
- O, pour l'activité oculaire (décrite par le chronogramme des fixations).
- W, pour l'indice de charge instantanée calculé avec la méthode temporelle.

• *Variables caractérisant l'état du système* : il s'agit de l'état des différentes variables à contrôler. Cet état peut être décrit par les valeurs des variables et également leurs vitesses d'évolution. Pour simplifier, nous ne retiendrons dans un premier temps que l'écart des variables par rapport aux consignes.

Ces grandeurs sont désignées dans la suite par des lettres minuscules :

- t, pour la tâche de tracking : il s'agit de l'écart de la cible par rapport au centre de la mire ;
- r1 et r2, pour les tâches de régulation : il s'agit des écarts des aiguilles par rapport à la position centrale ;
- d1 et d2, pour les tâches discrètes : il s'agit de la durée écoulée depuis l'instant d'occurrence du dernier événement, et ce tant que l'événement n'est pas acquitté (en l'absence de tout événement à acquitter, la variable est nulle).

A chaque instant, l'opérateur et le "système" peuvent donc être caractérisés par 12 variables. Ces variables sont de natures très différentes. Par exemple, pour les actions manuelles, l'action sur le joystick du tracking est échantillonnée à 10 Hz, tandis que l'action sur une tâche de régulation consiste en une succession d'appuis sur deux boutons poussoirs. Il faut donc, pour pouvoir mettre en relation toutes ces variables, "harmoniser" leurs caractéristiques spatio-temporelles, i.e. choisir une "unité temporelle" commune et un système de codage des "amplitudes".

IV.1.2 Codage des variables

• Choix d'une unité temporelle commune :

L'unité temporelle est fixée à 100 ms, c'est à dire égale à la période d'échantillonnage du joystick (T) et, surtout, à la période d'archivage des variables "continues" (t, r1 & r2).

Compte tenu de la dynamique des tâches, une période de 100 ms paraît en effet suffisante pour "dater" les actions de l'opérateur sur le clavier (la "précision" initiale est de 10 ms). De plus, cette valeur paraît tout à fait acceptable vis à vis de la charge de travail instantanée (la charge est initialement calculée sur des périodes de 10 ms ; on utilisera la valeur moyenne sur 10 échantillons).

Le problème est plus délicat en ce qui concerne l'activité oculaire. Cette dernière est caractérisée par la succession des fixations, dont la majeure partie durent entre 100 et 400 ms (soit plusieurs "quanta temporels"). Les saccades durent, elles, globalement de l'ordre de 50 ms ; il paraît donc difficile de leur consacrer une "modalité" spécifique. Il a donc été choisi d'intégrer leur durée dans celle de la fixation précédente. Cette "approximation" a déjà été utilisée pour le calcul de la charge de travail échantillonnée (chapitre III, § IV.3.2), où elle est justifiée par le phénomène de "suppression saccadique". De plus, 50 % des consultations comprennent au moins deux fixations (voir figure IV.20). Autrement dit, le "quantum temporel" de 100 ms s'avère suffisant pour la description de l'activité oculaire.

La durée d'une expérience étant de 5 minutes, chaque sujet sera donc caractérisé par 3000 "échantillons", comportant chacun les 12 "variables" précédemment décrites.

• Codage des "amplitudes" :

D'une manière générale, il existe deux grandes familles d'échelles d'amplitude : les échelles *qualitatives* et les échelles *quantitatives.* Au sein de chaque famille, il existe également certaines nuances. Ainsi, concernant les échelles qualitatives, il convient de distinguer les échelles *nominales* (aucune structure n'existe entre les différentes "valeurs possibles", encore appelées "modalités") des échelles *ordinales* (il existe une relation d'ordre, sans pour autant qu'il y ait de continuité entre les différentes modalités).

Les 12 variables recensées au paragraphe précédent sont très hétérogènes et reposent sur des échelles très différentes, par exemple :

- Echelle qualitative nominale pour la variable "O" décrivant l'activité oculaire (la variable prend ses valeurs dans l'ensemble des zones graphiques de l'écran).

- Echelle quantitative discrète pour les variables R1 et R2 correspondant aux actions correctrices sur les tâches de régulation.

- Echelles quantitatives continues pour les variables t, r1 et r2.

- Echelle "mixte" pour les variables associées aux tâches discrètes, d1 et d2 : une échelle qualitative pour "l'état" de la tâche (présence ou absence d'un événement à acquitter) et une échelle quantitative en présence d'un événement (durée écoulée depuis l'instant d'occurrence).

La mise en relation des différentes variables nécessite de définir une échelle commune. L'enrichissement d'une échelle qualitative étant a priori impossible, on est contraint d'en étendre l'emploi à l'ensemble des variables. Afin de minimiser la perte d'information suite à une telle transformation (passage d'une échelle quantitative à une échelle qualitative), il parait judicieux d'avoir recours à un codage "flou".

La figure V.7 illustre un tel codage :

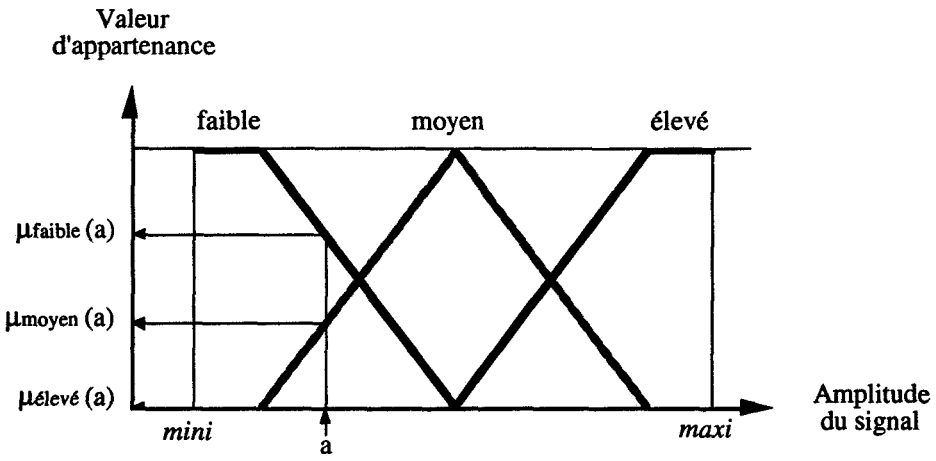


Figure V.7 : Principe du découpage de la plage de variation d'une variable quantitative en 3 modalités "floues" ($\mu_{faible}(a)$ = valeur d'appartenance de la grandeur "a" à la modalité "faible", ...).

Un tel codage est, par exemple, particulièrement adapté à l'indice de charge de travail instantanée. En effet, plus qu'une valeur exacte, c'est plutôt l'ordre de grandeur et également les grosses variations de charge qui nous intéressent. Dans ce cas, trois modalités peuvent suffire, correspondant à des niveaux de charge "faible", "moyen" et "élevé". Pour chaque valeur de l'indice de charge (calculé avec la méthode temporelle) compris entre 0 ("mini" sur la figure) et 0,5 s/s ("maxi"), la figure V.7 indique comment obtenir les valeurs d'appartenance aux trois modalités floues.

Maintenant qu'un système de codage commun est défini, il faut l'appliquer à l'ensemble des variables participant à l'analyse :

• *Variables "qualitatives" (d'origine) :*

- Les variables correspondant à l'acquittement des deux tâches discrètes (D1 & D2) possèdent deux modalités : "0" en l'absence d'action et "1" lors de l'appui sur le bouton poussoir d'acquittement.

- Les actions sur les tâches de régulation (R1 & R2) sont codées selon sept modalités, correspondant chacune à une valeur d'action correctrice (entier appartenant à l'intervalle [-3 ; +3]).

- La variable associée à l'activité oculaire (O) comprend six modalités : une pour chaque tâche, plus une sixième pour les fixations "inclassables" (i.e. n'appartenant à aucune des cinq tâches).

• *Variables "quantitatives" (avant transformation) :*

- Les trois variables à contrôler (t, r1 & r2) sont codées sur le principe de la figure V.7, c'est à dire selon trois modalités floues. En quelque sorte, ces trois modalités correspondent à des performances instantanées "mauvaises", "moyennes" et "bonnes".

- De même, l'action sur le joystick (T) est codée en trois modalités (correction "faible", "moyenne" et "énergique"), ainsi que la variable de charge de travail (W).

• *Variables "mixtes" :*

Il s'agit uniquement des variables caractérisant l'état des tâches discrètes. Elles sont les plus délicates à coder. En première approche, et par souci de simplification, seules quatre modalités ont été retenues. La première correspond à l'état "inactif" de la tâche (absence d'événement à acquitter). Les trois autres modalités concernent l'état "actif" (occurrence d'un événement) et correspondent chacune à un tiers du temps maximal alloué pour acquitter l'événement.

En sortie du processus de codage des 12 variables, on obtient les valeurs d'appartenance aux 47 modalités qui viennent d'être recensées. Pour chaque sujet, les données se présentent donc sous la forme d'un tableau de 3000 lignes (5 minutes divisées par 100 ms) et 47 colonnes.

L'étape suivante consiste à réaliser l'analyse statistique du tableau.

IV.2 Méthode d'analyse statistique

Dans ce paragraphe, on se propose de mettre en relation entre-elles l'ensemble des variables temporelles. Il faut pour cela disposer d'une "mesure d'association" entre variables, mesure compatible avec les échelles qualitatives.

Le principe de l'association de deux variables est exposé avec la figure V.8 :

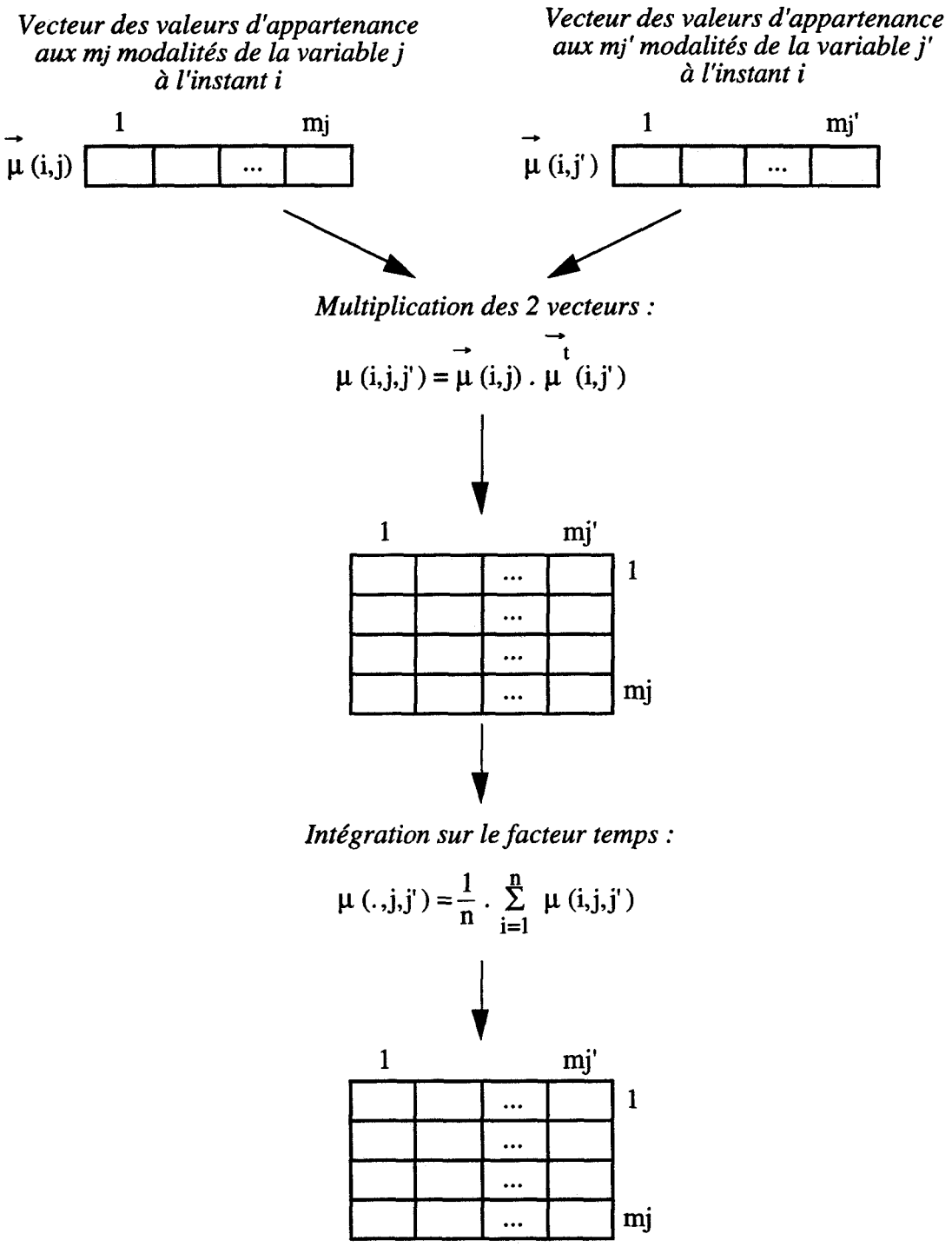


Figure V.8 : Principe de la construction d'un tableau de contingence à partir du croisement de deux variables qualitatives.

Les vecteurs contenant, pour chacune des deux variables, les valeurs d'appartenance aux différentes modalités sont multipliés. Une intégration sur le facteur temps permet alors d'obtenir un tableau symétrique, donnant la probabilité Pkk' d'avoir simultanément les deux modalités k et k'. Un tel tableau peut être construit sur la totalité d'un expérience, pour chacun des deux niveaux de difficulté, ou encore sur plusieurs tranches de temps.

De même que pour les matrices de transition (chapitre IV, § IV.3.1), l'intensité de la liaison entre deux variables (variable j à mj modalités et variable j' à mj' modalités) peut être obtenue par mesure de l'écart à l'indépendance statistique, cette dernière étant évaluée par

$P'_{kk'} = P_k \cdot P_{k'}$ (P_k et $P_{k'}$ étant les probabilités marginales, i.e. respectivement la somme sur les lignes et les colonnes des probabilités conjointes $P_{kk'}$). Dans ce cas, la mesure la plus souvent utilisée est la distance du Khi-deux :

$$\text{Khi-deux} = \sum_{k=1}^{mj} \sum_{k'=1}^{mj'} \frac{(p_{kk'} - p'_{kk'})^2}{p'_{kk'}}$$

Le calcul est généralisé à toutes les paires de variables possibles, le principe étant le même que celui de la construction d'un tableau de contingence multiple (sauf qu'en général, le tableau de base est construit à partir de valeurs d'appartenance binaires).

Le tableau "initial" (tableau des valeurs d'appartenance, croisant les 3000 échantillons et les 47 modalités) ou le tableau de contingence multiple (croisant les 47 modalités entre-elles) peuvent ensuite faire l'objet d'une analyse factorielle des correspondances /ROUANET et al., 87//LOSLEVER, 88/.

IV.3 Applications

IV.3.1 Mise en relation des variables

L'objectif premier d'une telle technique est donc de mettre en relation entre-elles l'ensemble des variables. On doit pouvoir ainsi, par exemple, étudier le "lien" entre l'indice de charge et les consultations oculaires (pour mettre en évidence, par exemple, qu'une tâche particulière contribue plus que les autres aux niveaux élevés de charge).

On peut également étudier le lien entre la charge de travail et la performance (en augmentant le nombre de modalités, on peut notamment rechercher une hypothétique chute de performance à partir d'un certain niveau de charge), ou encore entre la charge et l'activité manuelle, ...

Une telle technique s'avère donc particulièrement intéressante, non seulement pour décrire l'activité de l'opérateur mais surtout pour tenter d'expliquer certains comportements.

IV.3.2 Etude des décalages entre variables

La technique proposée au paragraphe précédent suppose, a priori, que les évolutions des variables sont "synchrones". Or, à la vue de certains résultats expérimentaux (notamment concernant la fréquence des fixations), la question reste ouverte. On peut notamment émettre l'hypothèse que les pics de charge n'ont pas une influence instantanée sur le comportement oculaire.

L'évaluation des décalages temporels entre deux variables revient à considérer la notion de "fonction d'inter corrélation". Dans le cas de l'utilisation de la métrique du Khi-deux pour quantifier le lien entre deux variables, la méthode proposée pour étudier de tels "déphasages" consiste à décaler verticalement les colonnes de certaines variables dans le tableau "initial" (tableau de valeurs d'appartenance).

En raison du nombre élevé de variables et des plages de décalage possibles, la "combinatoire" des tableaux à étudier est importante. Une telle étude, même si elle est fastidieuse à réaliser, paraît suffisamment prometteuse pour être entreprise.

V. CONCLUSION

• La première partie du chapitre est consacrée à la description des résultats expérimentaux obtenus. Pour cela, les modèles proposés par KOSSLYN et al. /90/ et ACIER /90/ sont adaptés à notre contexte expérimental. Le schéma fonctionnel qui en résulte permet de rendre compte des différents comportements observés, à défaut de réellement les expliquer.

La "validation" de ce modèle constitue une première perspective de recherche. En effet, des hypothèses peuvent maintenant être formulées, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles expérimentations.

• Dans la seconde partie, des éléments sont rassemblés en vue de mettre en œuvre une classification des opérateurs à partir de leurs chemins oculaires. Les résultats expérimentaux obtenus nous encouragent en effet dans cette voie.

Des perspectives de recherche sont proposées concernant l'utilisation d'algorithmes de traitement de chaînes de caractères. Ces derniers utilisent généralement, pour calculer la distance entre deux chaînes, la notion de "coût d'édition". Dans le contexte de la supervision, nous proposons le recours aux fonctions d'anormalités, ce qui revient à prendre en compte le coût subjectif des opérateurs de la "non-consultation" d'une variable en défaut.

Toujours concernant les chaînes de caractères, la modélisation de l'activité oculaire à l'aide de grammaires semble une perspective également intéressante.

L'avantage d'un codage "flou" est ensuite mis en évidence. De même que pour le codage en caractères, le problème de la détermination d'un critère de distance se pose. Un tel codage s'avère particulièrement intéressant lors d'études "sur le terrain", en situation réelle de travail.

• Dans la troisième partie, une technique est proposée en vue de mettre en relation entre elles toutes les grandeurs recueillies ou calculées à chaque expérimentation. Le but est toujours d'étudier le lien entre le niveau de charge et l'activité oculaire, les variables "secondaires" participant essentiellement à l'interprétation des résultats. Les "déphasages" éventuels entre les différentes variables peuvent aussi être étudiés.

Cette technique doit également permettre d'étudier le lien entre la prise d'informations visuelles et l'activité manuelle de l'opérateur, en vue d'une intégration éventuelle de cette dernière dans le modèle proposé dans la première partie.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'automatisation et l'informatisation des moyens de production industriels ont profondément modifié la nature du travail de l'opérateur. En effet, si la plupart du temps son travail se réduit à de la surveillance, l'opérateur n'en demeure pas moins le garant ultime de la sécurité de l'installation et de la continuité de la production lors des phases de dysfonctionnement. Aussi, comme nous l'avons souligné dans le premier chapitre, les concepteurs d'un système homme-machine complexe doivent-ils veiller à l'intégration optimale de l'opérateur au sein du système technologique.

Dans cette optique, nous avons focalisé sur deux aspects primordiaux du travail de supervision et qui constituent le thème de cette étude :

- ***La charge de travail*** : elle doit absolument être maintenue dans une plage "acceptable", pour éviter les problèmes d'hypovigilance et également prévenir toute saturation de l'opérateur.

- ***La prise d'information visuelle*** : les tâches de l'opérateur sont désormais essentiellement cognitives et donc particulièrement difficiles à étudier. Etant donnée la prépondérance du canal visuel, l'activité oculaire de l'opérateur constitue une trace directement observable de son activité mentale.

L'étude bibliographique du premier chapitre a mis en évidence qu'aucune méthode d'évaluation de la charge de travail n'est réellement satisfaisante. Notamment, aucune n'est vraiment apte à rendre compte des fluctuations de la charge au cours du travail de l'opérateur. C'est pourquoi, dans la suite de ce travail, nous tentons d'établir une corrélation entre l'activité oculaire de l'opérateur et sa charge de travail. Le but ultime est, bien évidemment, l'évaluation "dynamique" des systèmes hommes-machines.

Dans le second chapitre, une étude bibliographique des principaux travaux consacrés à l'influence de la difficulté de la tâche ou de la charge de travail sur le "fonctionnement" du système visuel a permis de les classer en plusieurs familles, selon la nature des "indices" sélectionnés :

- indices physiologiques : ils n'ont pas été retenus dans notre étude car ils paraissent peu réalistes "sur le terrain".

- indices liés aux saccades, c'est à dire aux mouvements oculaires proprement dits : de par l'instrumentation mise en œuvre (fréquence d'échantillonnage de 60 Hz), seule la longueur des saccades a été étudiée.

- indices liés aux fixations et aux consultations, c'est à dire à la prise d'information : la durée et la fréquence des fixations ont été étudiées, de même que le nombre de fixations par consultation.

- enfin, indices liés aux "stratégies visuelles", c'est à dire à l'organisation générale de la prise d'information : l'étude a porté sur les matrices de transitions ainsi que sur les séquences de consultations.

Le troisième chapitre décrit l'expérimentation mise en œuvre pour tester ces différents "indices de charge" potentiels.

Le contexte expérimental a été déterminé en fonction des contraintes de mise en œuvre de la *méthode temporelle* d'estimation de la charge proposée par MILLOT. Le choix s'est donc porté sur un ensemble de cinq tâches sensori-motrices, contexte dans lequel la méthode a déjà été validée.

Le quatrième chapitre décrit les résultats expérimentaux obtenus.

Concernant les caractéristiques des fixations, aucune influence systématique et significative de la charge de travail n'a pu être mise en évidence. La durée des fixations semble liée essentiellement à la nature de l'information prélevée, et donc indirectement à la nature de la tâche. De plus, les tâches retenues pour nos expériences étant faiblement cognitives, les temps de traitement susceptibles de faire varier la durée des fixations sont faibles et relativement constants.

De même, aucune corrélation n'a pu être établie entre l'évolution de la fréquence des fixations (fréquence moyenne sur des intervalles de dix secondes) et l'évolution de l'indice de charge calculé avec la méthode temporelle.

Les résultats concernant les consultations sont plus intéressants. On observe en effet une influence du niveau de charge sur la distribution du nombre de fixations par consultation. Cette influence est variable (accroissement ou diminution) en fonction de la nature de la tâche, ce qui semble pouvoir s'expliquer par la nature des informations prélevées, et également par la mise en œuvre de stratégies "économiques" en termes de fixations.

Les résultats les plus intéressants concernent les transitions entre tâches ainsi que les séquences de consultations. En effet, pour l'ensemble des sujets, les résultats montrent une "structuration" du comportement oculaire lorsque la charge de travail augmente. Cette structuration se manifeste sous la forme d'une structuration spatiale plus grande et d'une plus grande répétitivité d'un nombre restreint de chemins oculaires privilégiés. Deux tendances de comportements semblent se dégager : certains opérateurs semblent particulièrement sensibles à la nature des tâches, tandis que d'autres semblent surtout sensibles à leur localisation. Là aussi, une explication possible est l'adoption par l'opérateur de stratégies "économiques" lorsque la charge de travail augmente : il s'affranchit de divers "coups d'œil" de vérification, coups d'œil contribuant au "désordre oculaire" apparent qui caractérise les périodes de faible charge.

Ces résultats ont été obtenus sur un nombre restreint de sujets et en utilisant une seule configuration de tâches. Il faut donc les considérer avec prudence et se garder de tenter toute généralisation. Néanmoins, ils sont cohérents avec certains résultats obtenus dans des contextes très différents et s'avèrent suffisamment prometteurs pour persévérer dans cette direction.

Le cinquième chapitre est consacré aux développements et perspectives.

Un schéma fonctionnel est proposé en vue de décrire les différents comportements oculaires observés lors des expérimentations. Ce schéma s'inspire fortement de travaux issus des neurosciences et semble constituer une base intéressante pour l'élaboration d'un modèle plus complet de la prise d'information en supervision. La mise à l'épreuve et la validation de ce modèle constituent une perspective de recherche particulièrement intéressante, d'autant plus qu'il semble possible d'y introduire les actions manuelles de l'opérateur.

Les résultats expérimentaux ont été obtenus suite à une étude qualitative des graphes de liaisons entre tâches et une étude statistique des séquences de consultations. La seconde partie de ce chapitre recense les "éléments" nécessaires pour une étude similaire mais qualitative. Le but ultime est de réaliser une classification la plus automatique possible des opérateurs à partir de leur activité oculaire. Dans cette optique, l'utilisation des chaînes de caractères pour décrire les chemins oculaires s'avère intéressante, mais pose des problèmes lorsqu'il s'agit d'élaborer un critère de distance entre deux chemins. Nous proposons d'utiliser la notion d'anormalité pour déterminer les "coûts d'édition" intervenant dans les algorithmes de calcul de distance. Un codage "flou" est lui aussi très intéressant, surtout en situation réelle de travail, mais pose les mêmes problèmes de calcul de distance qu'avec les chaînes de caractères. Ces différentes propositions constituent autant de perspectives de recherche.

Enfin, la troisième partie du chapitre propose une technique permettant de mettre en relation entre elles toutes les variables recueillies à chaque expérience. Cette technique vise bien sûr à étudier le lien entre charge de travail et activité oculaire, mais en tenant compte de critères de performance, des actions manuelles, ... Elle permet également d'étudier les déphasages éventuels entre ces différentes grandeurs. Cette technique ouvre des perspectives de recherche

pour l'étude proprement dite, c'est à dire pour l'estimation de la charge, mais également pour la modélisation de l'activité de l'opérateur. Notamment, elle devrait aider à prendre en compte les actions manuelles de l'opérateur dans le modèle proposé en début de chapitre.

En résumé, cette étude confirme l'intérêt de l'analyse de l'activité oculaire de l'opérateur en vue d'estimer son état de charge. Les résultats ont été obtenus dans un cadre expérimental assez restrictif et nécessitent donc des travaux supplémentaires. Néanmoins, ils sont d'ores et déjà suffisamment encourageants pour envisager des expérimentations en situation réelle de travail. De plus, un travail de supervision plus réaliste que celui de nos expérimentations, et donc plus cognitif également, sera plus favorable pour certains indices (ceux liés aux caractéristiques des fixations, notamment). De telles expérimentations, mettant en œuvre les techniques proposées dans le cinquième chapitre, ouvrent des perspectives de recherche particulièrement intéressantes et très réalistes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABE K. and SUGITA N., 82
Distances Between Strings of Symbols - Review and Remarks.
ICPR6, Munich, 1982.

ABED M., 90
Contribution à la modélisation de la tâche par des outils de spécification exploitant les mouvements oculaires. Application à la conception et à l'évaluation des interfaces homme-machine.
Thèse de Doctorat en Automatique Industrielle et Humaine, Valenciennes, septembre 1990.

ABED M., BERNARD J.M. and ANGUE J.C., 91
Methodology of analysis and modelization of man-machine interaction with specification tools.
Tenth European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, Liège, Belgium, 11-13 November, 1991.

ACIER B., 90
Contribution à la conception et à l'évaluation d'interfaces hommes-machines par l'analyse du comportement visuel d'un superviseur humain.
Thèse de Doctorat en Automatique Industrielle et Humaine, Valenciennes, janvier 1990.

AMALBERTI R., BATEJAT D., BATAILLE M., MENU J.C.et SANTUCCI G., 86
Charge de travail mental, validation en France d'une technique d'évaluation subjective américaine : SWAT.
Rev. Méd. Aéro. Spat., t. XXV, n° 98, pages 158-163, 1986.

ASL, 89
Eye tracking systems handbook.
Applied Science Laboratories, 1989.

BAINBRIDGE L., 82
Ironies of Automation.
IFAC Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems, Baden-Baden, Federal Republic of Germany, 1982.

BAINBRIDGE L., 88
Multiple representations or 'good' models.
In : Training, Human Decision Making and Control, J. Patrick and D.K. Duncan (Editors), Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), 1988.

BEATTY J., 76
Pupillometric Measurement of Cognitive Workload.
Proceedings of the 12th Annual NASA-University Conference on Manual Control, University of Illinois, May, 135-143, NASA TMX-73 70, 1976.

BEATTY J., 81
Pupillometric Measurement of Operator Workload.
Proc. Ann. Conf. Manual Control, JPL 81-95, Pasadena, USA, 1-6, 1981.

BERGERT T., RIERA B., ANGUE J-C. and MILLOT P., 89
Real Time Assessment of Human Operator Workload Placed in a Simulated Multitask Context of a Monitoring and Supervising Process.
ESA Workshop "Human Factors Engineering : a Task-Oriented Approach", nov. 21-23, 1989.

BERGER T., 92
Contribution à l'étude de l'activité cognitive de l'opérateur et à l'évaluation de sa charge de travail.
Thèse de Doctorat en Automatique Industrielle et Humaine, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, mars 1992.

BERNARD J.M., 94
Exploitation des mesures oculométriques dans la modélisation de la tâche prescrite et de l'activité réelle de l'opérateur par réseaux de Pétri.
Thèse de Doctorat en Automatique Industrielle et Humaine, Valenciennes, février 1994.

BITTNER A.C., 92
Robust Testing and Evaluation of Systems : Framework, Approaches, and Illustrative Tools.
Human Factors, 34(4), 477-484, 1992.

BOY G. et BERNARD C., 81
Etude de la charge de travail dans une cabine de pilotage - Etude bibliographique.
Rapport CERT DERA / Airbus Industrie n° 1/7275, mars 1981.

CARBONELL J.R., 66
A Queueing Model of Many-Instrument Visual Sampling.
IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, Vol. HFE-7, N° 4, Dec. 1966.

CARBONEL J.R., WARD J.L., and SENDERS J.W., 68
A Queueing Model of Visual Sampling. Experimental Validation.
IEEE Transactions on Man-Machine Systems, Vol. MMS-9, N° 3, Sept. 1968.

CHAMMAM M., 87
Contribution à la conception et à la réalisation d'un oculomètre pour la mesure et le traitement automatique de la direction absolue du regard d'un opérateur humain au travail.
Thèse de Doctorat en Automatique Industrielle et Humaine, Valenciennes, décembre 1987.

COËFFE C. - Groupe Regard, 85
Two ways of improving saccade accuracy.
Paper accepted at ECEM3, September 1985.

DAVEZIES Ph. et PROST G., 85
L'analyse de la charge mentale par le médecin du travail.
Arch. mal. prof., 46, n° 1, 15-22, 1985.

DEBERNARD S., 93
Contribution à la répartition dynamique de tâches entre opérateur et système automatisé : Application au contrôle du trafic aérien.
Thèse de Doctorat en Automatique Industrielle et Humaine, Valenciennes, janvier 1993.

DERRICK W.L., 88
Dimensions of Operator Workload.
Human Factors, 30(1), 95-110, 1988.

DICK A.O., 80
Instrument scanning and controlling: using eye movement data to understand pilot behavior and strategies.
NASA CR 3306, September, 1980.

DORNIC S.M., 86
Traitement de l'information, stress et différences interindividuelles.
Le Travail Humain, Tome 49, n° 1, 1986.

DUBOIS-POULSEN A., 77
Importance du champ visuel dans le travail.
Le Travail Humain, tome 40, n° I, pp. 1-14, 1977.

ELLIS S.R. and STARK L., 86
Statistical Dependency in Visual Scanning.
Human Factors, 28(4), 421-438, 1986.

FRANCOIS E., 85
La fatigue visuelle : physiologie et méthodes d'évaluation.
Mémoire pour le C.E.S. de Médecine de travail, Lille, 1985.

FRANCOIS M. et LIEVIN D., 92
Charge perceptive et fatigue visuelle dans le contrôle qualité : étude méthodologique dans un atelier d'embouteillage.
Projet de publication n° 1792 dans les Cahiers de Notes Documentaires de l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité), Février 1992.

GALLÖIN J.-F., 88
Transfert de connaissances. Systèmes experts : techniques et méthodes.
Eyrolles, 1988.

GOLDBERG R.A. and STEWART M.R., 80
Memory Overload or Expectancy Effect ? 'Hysteresis' Revisited.
Ergonomics, Vol. 23, N° 12, 1173-1178, 1980.

GRAF W., SIGL F., VAN DER HEIDEN G. and KRUEGER H., 87
The applicability of eye movement analysis in the ergonomic evaluation of human-computer interaction.
Proceeding of Work with Display Units 86, Stockholm, pp. 803-808, 1987.

HACHETTE, 88
Le dictionnaire de notre temps.
Hachette, 1988.

HACISALIHZADE S.S., STARK L.W., and ALLEN J.S., 92
Visual Perception and Sequences of Eye Movement Fixations : A Stochastic Modeling Approach.
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 22, NO. 3, May/June 1992.

HALL P.A.V. and DOWLING G.R., 80
Approximate String Matching.
Computing Surveys, Vol. 12, No. 4, December 1980.

HANCOCK P.A. and MESHKATI N. (Eds), 88
Human Mental Workload.
NORTH-HOLLAND, Advances in psychology, 1988.

HARRIS R.L., TOLE J.R., EPHRATH A.R.and STEPHENS A.T., 82
How a New Instrument Affects Pilot's Mental Worload.
Proceedings of the Human Factors Society - 26th annual meeting - 1982.

HARRIS R.L., GLOVER B.J., and SPADY A.A., 86
Analytical Techniques of Pilot Scanning Behavior and Their Applications.
NASA technical paper 2525, 1986.

HART S.G., 86
Theory and Measurement of Human Workload.
In : J. Zeidner (Ed.), Human Productivity Enhancement : Training and Human Factors in Systems Design, I, New-York. Praeger, 396-456, 1986.

HART S. G., and STAVELAND L. E., 88
Development of NASA-TLX (task load index): results of empirical and theoretical research..
In P. A. HANCOCK and N. MESHKATI (Eds), Human mental workload, North-Holland, advances in psychology, p. 139-184, 1988.

HELLA F., 83
Contribution de l'étude du champ visuel à la connaissance de l'espace de travail.
Le Travail Humain, vol.46, n° 1, pages 11 à 32, 1983.

HELLA F., 87
Is the analysis of eye movement recording sufficient criterion for evaluating automobile instrument panel design ?
In : Eye Movements : From Physiology to Cognition, J.K. O'Regan and A. Lévy-Schoen editors, North Holland, 1987.

HER C.C. and HWANG S.L., 89
Application of queueing theory to quantify information workload in supervisory control systems.
International Journal of Industrial Ergonomics, 4, 51-60, 1989.

HILL S.G., IAVECCHIA H.P., BYERS J.C., BITTNER A.C., ZAKLAD A.L. and CHRIST R.E., 92
Comparison of Four Subjective Workload Rating Scales.
Human Factors, 34(4), 429-439, 1992.

HOCKEY G.R.J., BRINER R.B., TATTERSALL A.J. and WIETHOFF M., 89
Assessing the impact of computer workload on operator stress : the role of system controllability.
Ergonomics, Vol. 32, N° 11, 1401-1418, 1989.

ITOH Y., HAYASHI Y., TSUKUI I. and SAITO S., 90
The Ergonomic Evaluation of Eye Movement and Mental Workload in Aircraft Pilots.
Ergonomics, vol.33, n° 6, 719-733, 1990.

JEANNEROD M., GERIN P. et PERNIER J., 68
Déplacements et fixations du regard dans l'exploration libre d'une scène visuelle.
Vision Res., Vol. 8, pp. 81-97, 1968.

JOHANNSEN G., 79
Workload and Workload Measurement.
In : /MORAY, 79/.

JOHANNSEN G., MORAY N., PEW R., RASMUSSEN J., SANDERS A. and WICKENS C., 79
Final report of experimental psychology group.
In : /MORAY, 79/.

JOHANNSEN G., LEVIS A.H. and STASSEN H.G., 92
Theoretical Problems in Man-Machine Systems and their Experimental Validation.
5th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems, The Hague, The Netherlands, 9-11 June 1992.

KALSBEEK J.W.H., 65
Mesure objective de la surcharge mentale. Nouvelles applications de la méthode des doubles tâches.
Le Travail Humain, XXVIIIème année, Nos 1-2, janvier-juin 1965.

KETSCHER L. and HANSEN J.P., 90
Mental Workload and Decision Making.
Ninth european annual conference on Human Decision Making and Manual Control, Ispra, Italy, September 10-12, 1990.

KIMURA K., OSUMI Y. and NAGAI Y., 90
CRT display visibility in automobiles.
Ergonomics, vol. 33, n°6, 707-718, 1990.

KOPP U. and NOWACKI P., 89
Workload Evaluation During Simulator Flights.
Proceedings at Eight European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, Tech. Univ. of Denmark, 2-13, 1989.

KOSSLYN S.M., FLYNN R.A., AMSTERDAM J.B., and WANG G., 90
Components of high-level vision : A cognitive neuroscience analysis and accounts of neurological syndromes.
Cognition, 34 (1990) 203-277.

KREBS M.J., WINGERT J.W. and CUNNINGHAM T., 77
Exploration of an Oculometer-Based Model of Pilot Workload.
Washington, D.C. : National Aeronautics and Space Administration, NASA CR-145153, march, 1977.

LEERMAKERS M., 91
The effects of correlations between signals on sampling behavior in a four instrument monitoring task.
Tenth European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, Liège, Belgium, 11-13 November, 1991.

LEJON J-C., 91
L'évolution de la conduite sur S.N.C.C.
L'ergonomie des systèmes numériques de contrôle-commande.
Collection Points de repère, Editions de l'ANACT, 1991.

LEPLAT J., 78
Factors Determinig Work-load.
Ergonomics, Vol. 21, N° 3, 143-149, 1978.

LEPLAT J., 82
Les questions méthodologiques de base applicables à tous les types de tâches. Perspectives méthodologiques pour l'étude des activités mentales.
Le Travail Humain, tome 45, n° 2/1982.

LEVY-SCHOEN A., 69
L'étude des mouvements oculaires - Revue des techniques et des connaissances.
DUNOD, Paris, 1969.

LEVY-SCHOEN A., 72
Rapports entre mouvements des yeux et perception. Quelques données sur le comportement oculomoteur de l'adulte normal.
Dans : Neuropsychologie de la perception visuelle, Henry Hécaen, Masson & Cie, éditeurs, 1972.

LEVY-SCHOEN A., 76
Exploration et connaissance de l'espace visuel sans vision périphérique.
Le Travail Humain, vol. 39, n° 1, pages 63 à 72, 1976.

LEVY-SCHOEN A., 82
Perception, Exploration and Eye Displacements.
Cognition and Eye Movements, edited by R. Groner and P. Fraisse, North-Holland, 1982.

LEVY-SCHOEN A., 83
Mesurer les mouvements des yeux: pour quoi faire ?
Le Travail Humain, vol.46, n° 1, pages 3 à 9, 1983.

LOFTUS G.R. and MACKWORTH N.H., 78
Cognitive Determinants of Fixation Location During Picture Viewing.
Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, Vol. 4, No. 4, 565-572, 1978.

LOFTUS G.R., 81
Tachistoscopic Simulations of Eye Fixations on Pictures.
Journal of Experimental Psychology : Human Learning and Memory, Vol. 7, No. 5, 369-376, 1981.

LOSLEVER P., 88
Etude ergonomique du poste bureautique : Approche par les méthodes multidimensionnelles d'analyse de données.
Thèse de Doctorat en Automatique Industrielle et Humaine, Valenciennes, juin 1988.

MACKWORTH N.H., 76
Stimulus density limits the useful field of view.
Eye movements and psychological processes, Monty et Senders éditeurs, Hilldales, Erlbaum, pages 307 à 321, 1976.

MATTHEWS M.L., 86
The Influence of Visual Workload History on Visual Performance.
Human Factors, 28(6), 623-632, 1986.

MAY J.G., KENNEDY R.S., WILLIAMS M.C., DUNLAP W.P. and BRANNAN J.R., 86
Eye movements as an Index of Mental Workload.
NASA STAR Technical Report Issue 04, NTIS HC A02/MF A01, p. 538, 1986.

MILLOT P., 87
Coopération Homme-Machine dans les tâches de supervision des procédés Automatisés.
Thèse de Doctorat d'Etat en Automatique Industrielle et Humaine, Valenciennes, septembre 1987.

MILLOT P., 88a
Supervision des procédés automatisés et ergonomie.
Editions Hermés - Paris, 1988.

MILLOT P., TABORIN V., KAMOUN A., and WILLAEYS D., 88b
Effects of the dynamic allocation of supervision tasks between man and computer on the performance of automated processes.

"Training, Human Decision Making and Control", J. Patrick and D.K. DUNCAN (Editors), Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), 1988.

MOLNAR F., 81
About the role of visual exploration in aesthetics.
Edited by Hy I. Day, Plenum Publishing Corporation, 1981.

MORAY N. (Ed), 79
Mental Workload, its Theory and Measurement.
NATO conference series : III, human factors, Vol. 8, PLENUM PRESS, New York, 1979.

MORAY N., 86
Monitoring Behavior and Supervisory Control.
In : BOFF K.R., KAUFMAN L. & THOMAS J.P. (Eds), Handbook of perception and human performance, Vol. 2, Cognitive processes and performance, JOHN WILEY and SONS, 1986, Chap. 40, pp. 1-51.

MORAY N.P. and LIAO J., 88
A quantitative model of excess workload, subjective workload estimation, and performance degradation.
A Report on Research Funded by NASA Grant NAGW-427, 1988.

MORAY N. and ROTENBERG I., 89
Fault Management in Process Control: Eye Movements and Action.
Ergonomics, Vol.32, No.11, 1319-1342, 1989.

MORAY N., SABADOSH N., and KIJOWSKI B., 92
STRESSFWL : An Experimental Environment for the Study of Strategic Behaviour.
In : Proceedings of the 11th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, Valenciennes (France), 17-18-19 November 1992.

NAUREILS P., 79
Apport de l'étude de la direction du regard en ergonomie aéronautique.
Thèse de médecine, Bordeaux II, 1979.

NEBOIT M., 80
L'exploration visuelle dans l'apprentissage de tâches complexes. L'exemple de la conduite automobile.
Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université R. Descartes, décembre 1980.

NEBOIT M., 83
Evolution de l'exploration visuelle avec l'apprentissage et avec l'expérience professionnelle.
Le Travail Humain, vol.46, n° 1, pages 49 à 63, 1983.

O'DONNEL R.D. and EGGEMEIER F.T., 86
Workload assessment methodology.
In K.R. Boff, L. Kaufman and J.P. Thomas (Eds), Handbook of perception and human performance, Vol. 2, Cognitive processes and performance, John Wiley and Sons, Chapter 42, p. 42.1-42.49, 1986.

OGDEN G.D., LEVINE J.M. and EISNER E.J., 79
Measurement of workload by secondary tasks.
Human Factors, 1979, 21(5), pp. 529-548.

PAPIN J.P., 82
Application de l'oculomètre à l'amélioration de l'instruction des équipages d'aéronefs.
Rapport CERMA n° 82-15 (LCBA), Août 1982.

PAPIN J.P., METGES P.J. et HERNANDEZ C., 83
L'exploration visuelle en radiologie pulmonaire.
Le Travail Humain, tome 46, n° 1 / 1983.

PARDON N., 77
Les méthodes d'approche de la charge mentale.
Cahiers de médecine professionnelle, n° 65, p. 19-38, 1977.

POTTIER A., 93
Traitement informatif visuel à l'intérieur de l'habitacle d'un véhicule routier.
Rapport INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité), juin 1993.

RASMUSSEN J., 83
Skills, Rules, and Knowledges ; Signals, Signs, and Symbols, and other Distinctions in Human Performance Models.
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-13, may/june 1983.

REID G. B. and NYGREN T. E., 88
The subjective workload assessment technique: a scaling procedure for measuring mental workload.
In P. A. HANCOCK and N. MESHKATI (Eds), Human mental workload, North-Holland, advances in psychology, p. 185- 218, 1988.

RIERA B., SIMON P., VANDWALE P., MILLOT P.and ANGUE J.C., 90
Activity Modelling and Workload Assessment of a Car Driver.
Ninth European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, Ispra, Italy, sept.10-12, 1990.

RIERA B., 93
Méthodologie d'évaluation des interfaces homme-véhicule automobile.
Thèse de Doctorat en Automatique Industrielle et Humaine, Valenciennes, janvier 1993.

ROUANET H., LE ROUX B. et BERT M-C., 87
Statistique en sciences humaines : procédures naturelles.
Editions Dunod, 1987.

ROUSE W.B., 77
Human-Computer Interaction in Multitask Situations.
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-7, N° 5, May 1977.

ROUSE W.B., 79
Approaches to Mental Workload.
In /MORAY, 79/.

ROUSE W.B., 83
Models of human problem solving : detection, diagnosis, and compensation for system failures.
Automatica, Vol. 19, N° 6, pp. 613-625, November 1983.

ROUSSEAU F., ACIER B.et ANGUE J.C., 89
Méthodes et moyens d'acquisition et de traitement des mouvements oculaires dans les transports.
Prise d'information visuelle et ergonomie dans les transports, journée spécialisée INRETS du 23 nov. 1989, actes INRETS n° 27, pp. 46-63, 1990.

ROUSSEAU F. et LOSLEVER P., 93a
Recherche de séquences temporelles dans les signaux multidimensionnels : Application aux données oculométriques.
Note interne non publiée.

ROUSSEAU F., LOSLEVER P. et ANGUE J-C., 93b
Utilisation de l'oculométrie pour l'analyse d'images publicitaires : comparaison d'images de voitures de luxe.
Communication et Langages, n° 94, 1993.

SAITO S., 92
Does fatigue exist in a quantitative measurement of eye movements ?
Ergonomics, Vol. 35, Nos 5/6, 607-615, 1992.

SANDERS A.F., 91
Simulation as a tool in the measurement of human performance.
Ergonomics, Vol. 34, N° 8, 995-1025, 1991.

SANTUCCI G., 87
Mises au point de Médecine Aéronautique - Evaluation de la charge de travail en Aéronautique.
Médecine Aéronautique et Spatiale, tome XXVI, n° 102, 1987.

SHERIDAN T.B. and STASSEN H., 79
Definitions, Models and Measures of Human Workload.
In : /MORAY, 79/.

SIMON P., 89
Etude du système oculo-moteur perturbé par un bouclage visuel artificiel.
Rapport de DEA, Université de Valenciennes, Juin 1989.

SIMON P., BERGER T., BERNARD J.M. and ANGUE J.C., 91
Towards Instantaneous Workload Assessment by means of Eye Scanning Movements.
Tenth European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, Liège, Belgium, 11-13 November, 1991.

SIMON P., BERGER T., et ANGUE J-C., 93a
Is Quantitative Analysis of Eye Scanning Movement Relevant of Operator's Mental Workload ?
Présentée à : International Industrial Ergonomics and Safety Conference'93, Copenhague, Danemark, 8-10 juin 1993.

SIMON P., ROUSSEAU F., et ANGUE J-C., 93b
Quantitative Analysis of Mental Workload Influence on Eye Scanning Movements.
International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Le Touquet, France, 17-20 octobre 1993.

SKIPPER J.H., RIEGER C.A. and WIERWILLE W.W., 86
Evaluation of decision-tree rating scales for mental workload estimation.
Ergonomics, Vol. 29, N° 4, 585-599, 1986.

SPADY A.A. and HARRIS R.L. Jr and Sr., 83a
Summary of NASA Langley's Pilot Scanning Research.
Second Aerospace Behavioral Engineering Technology Conference Proceedings, Society of Automative Engineers, 1983.

SPADY A.A., HARRIS R.L. and COMSTOCK R., 83b
Flight versus simulator scan behavior.
Proceedings of the 2nd symposium on aviation psychology, pp. 123-130, april 1983.

SPERANDIO J.C., 72
Charge de travail et régulation des processus opératoires .
Le Travail Humain, 35/1, 1972.

SPERANDIO J.C., 77
La régulation des modes opératoires en fonction de la charge de travail chez les contrôleurs de trafic aérien.
Le Travail Humain, tome 40, n° 2, pages 249 à 256, 1977.

SPERANDIO J-C. et BOUJU F., 83
L'exploration visuelle de données numériques présentées sur écran cathodique.
Le Travail Humain, tome 46, n° 1 / 1983.

SPERANDIO J.C., 88
L'ergonomie du travail mental.
Masson, 2ème édition, 1988.

SPERANDIO J-C., 91
La Recherche en Psychologie (Domaines et méthodes).
Chapitre 6 : Les méthodes d'analyse du travail en Psychologie ergonomique, pp. 199-262, Editions DUNOD, 1991.

STASSEN H.G., JOHANNSEN G. and MORAY N., 90
Internal Representation, Internal Model, Human Performance Model, and Mental Workload.
Automatica, Vol.26, No.4, pp.811-820, 1990.

SZEKELY J., 75
L'évaluation de la charge mentale dans le cadre de l'étude et de l'aménagement des conditions de travail - Théorie, mesure, application.
INRS, rapport n°521/RE, janvier 1975.

TESSIER C., 84
MESSAGE : un outil d'analyse ergonomique de la gestion de vol.
Thèse de docteur ingénieur, ENSAE, Toulouse, décembre 1984.

THORNTON D. C., 85
An investigation of the "Von Restorff" phenomenon in post-test workload ratings.
Proceedings of the Human Factors Society, 29th Annual Meeting, p. 760- 764, 1985.

TOLE J.R., STEPHENS A.T., HARRIS R.L. and EPHRATH A., 82
Visual Scanning Behavior and Mental Workload in Aircraft Pilots.
Aviation, Space and Environmental Medicine, 53(1):54-61, Jan., 1982.

TOLE J.R., STEPHENS A.T., VIVAUDOU M.,EPHRATH A., and YOUNG L.R., 83
Visual Scanning Behavior and Pilot Workload.
NASA CR-3717, 1983.

TULGA M.K. and SHERIDAN T.B., 80
Dynamic Decisions and Workload in Multitask Supervisory Control.
IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-10, n° 5, may 1980.

UNEMA P. and RÖTTING M., 88
Differences in eye movements and mental workload between experienced and inexperienced motor-vehicle drivers.
Proceedings of the First International Conference on Visual Search, University of Durham, England, Sept. 5-9, 1988. Edited by David Brogan, Taylor & Francis.

VIVIANI P., 90
Eye movements in visual search : cognitive, perceptual and motor control aspects.
In : Eye movements and their role in visual and cognitive processes, E. Kowler, Editor. Elsevier Science Publishers BV (Biomedical Division), 1990.

VOSS M., 81
Narrowing of the Visual Fields as Indicator of Mental Workload ?
In Moraal, D.J., Kraiss, K.-F. (eds), "Manned Systems Design : Methods, Equipment, and Application", NATO Conference Series, Serie III : "Human Factors", Vol. 17, New York and London, Plenum Press, 1981.

WAGNER R.A. and FISCHER M.J., 74
The String-to-String Correction Problem.
Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 21, No. 1, pp. 168-173, January 1974.

WANNER J.C., 87
Facteur Humain et Sécurité.
Ecole Nationale de l'Aviation Civile. Erreurs humaines et automatisation - Séminaire des 19 et 20 mai 1987.

WIENER E.L., CURRY R.E. and FAUSTINA M.L., 84
Vigilance and Task Load : In Search of the Inverted U.
Human Factors, 26(2), 215-222, 1984.

WIERWILLE W.W., 79
Physiological Measures of Aircrew Mental Workload.
Human Factors, 21(5), 575-593, 1979.

WIERWILLE W.W., 81
Instantaneous mental workload : concept and potential methods for measurement.
Proceeding of the International Conference on Cybernetica and Society IEEE, Atlanta, Georgia, 1981.

WIERWILLE and CASALI., 83
A validated rating scale for global mental workload measurement application.
Proceedings of the Human Factors Society - 27th annual meeting - 1983.

WIERWILE W.W., CASALI J.G., CONNOR S.A. and RAHIMI M., 85
Evaluation of the Sensitivity and Intrusion of Mental Workload Estimation Techniques.
Advances in man-machine systems research, vol.2, pp.51-127, by JAI Press Inc, 1985.

WIERWILLE W.W., 88
Important remaining issues in mental workload estimation.
In : /HANCOCK and MESHKATI, 88/.

WILLIAMS L.J., 85
Tunnel Vision Induced by a Foveal Load Manipulation.
Human Factors, 27(2), 221-227, 1985.

WILSON G.F. and O'DONNEL R.D., 88
Measurement of operator workload with the neuropsychological workload test battery.
In : /HANCOCK and MESHKATI, 88/.

YEH Y.Y. and WICKENS C.D., 85
The nature of subjective workload.
Trends in Ergonomics / Human Factors II, 1985.

INDEX DES FIGURES ET TABLEAUX

Chapitre I :

Figure I.1 : Architecture typique des systèmes de supervision de procédés fortement automatisés /SHERIDAN, 85/ 15

Figure I.2 : Relation entre les tâches de l'opérateur, son comportement cognitif et son interprétation des informations /STASSEN, 90//JOHANNSEN, 92/ 17

Figure I.3 : Phase descendante de la démarche de conception des systèmes homme-machine /DEBERNARD, 93/ 18

Figure I.4 : Phase ascendante d'évaluation d'un système homme-machine /DEBERNARD, 93/ 20

Figure I.5 : Performance et effort de l'opérateur en fonction de la difficulté de sa tâche /DORNIC, 86/ 21

Figure I.6 : Relation hypothétique entre la performance de l'opérateur et sa charge de travail /JOHANNSEN, 79/ 22

Figure I.7 : Performance de l'opérateur en fonction de sa charge de travail et de son expérience /TOLE et al., 82/. 25

Figure I.8 : Synthèse des principaux facteurs influant sur la performance et sur la charge de travail /DEBERNARD, 93/ 27

Figure I.9 : Synthèse des principales méthodes d'estimation de la charge de travail et de leurs propriétés, d'après /O'DONNEL et al., 86//STASSEN et al., 90//HILL et al., 92/ 32

Figure I.10 : Principales propriétés des cônes et des bâtonnets (i.e. des visions centrale et périphérique). 35

Figure I.11 : Acuité visuelle en fonction de la distance angulaire par rapport à la fovéa et pour une distance d'observation de 70 cm. 36

Figure I.12 : Schéma général du comportement oculaire d'un opérateur de supervision sur écran graphique /ACIER, 90/. 42

Figure I.13 : Schéma de principe d'un modèle du comportement oculaire à base de file d'attente 43

Chapitre II :

Figure II.1 : Pourcentage de détection périphérique en fonction de l'excentricité des stimuli et de la difficulté de la tâche centrale /WILLIAMS, 85/. 51

Figure II.2 : Acquisition et codage des données oculométriques 54

Figure II.3 : Latence saccadique en fonction de la difficulté de la tâche de comptage de tonalités /MAY et al., 86/ 56

Figure II.4 : Durée moyenne de fixation, en fonction du type de tâche et du niveau d'expérience /UNEMA et al., 88/ 59

Figure II.5 : Distribution des durées de fixation en fonction du type de tâche /UNEMA et al., 88/ 60

Tableau II.6 : Nombre de fixations par consultation du "Flight Director", avec et sans turbulences /HARRIS et al., 86/ 61

Figure II.7a : Pourcentage de saccades à l'intérieur des instruments en fonction du niveau de difficulté (toutes phases du vol confondues) /KREBS et al., 77/ 62

Figure II.7b : Pourcentage de saccades à l'intérieur des instruments en fonction de la phase de vol (tous niveaux de difficulté confondus) /KREBS et al., 77/ 62

Figure II.8 : Répartition de l'attention des opérateurs sur les quatre sous-systèmes i.e. sur les quatre réservoirs d'eau /MORAY et al., 89/ 63

Figure II.9a : Régulation de la charge de travail par la mise en oeuvre de stratégies successives plus économiques /SPERANDIO, 77/..... 64
Figure II.9b : Double processus de régulation opératoire /BAINBRIDGE, 88//SPERANDIO, 91/. 65
Figure II.10 : Exemple de graphe de transition /HARRIS et al., 86/..... 67
Figure II.11 : Pourcentage d'occurrence des 10 séquences les plus fréquentes (séquences de 4 consultations), pour 6 pilotes, en fonction de la difficulté de la tâche mentale ajoutée /TOLE et al., 83/..... 70
Figure II.12 : Synthèse des principaux travaux concernant l'influence de la charge de travail sur les caractéristiques de l'exploration visuelle..... 72

Chapitre III :

Figure III.1 : Évaluation de la charge de travail à l'aide d'un modèle observateur /BERGER, 92/. 76
Figure III.2 : Tâche de tracking..... 78
Figure III.3 : Tâche de régulation..... 79
Figure III.4 : Tâche d'acquittement d'événement..... 79
Figure III.5 : Disposition des 5 tâches. 81
Figure III.6 : Architecture matérielle du simulateur..... 82
Figure III.7 : L'oculomètre ASL /ASL, 89/. 84
Figure III.8 : Mesure de la direction absolue du regard, à l'aide du système automatique développé au LAIH..... 85
Figure III.9 : Précision du système "tout-auto" du LAIH /BERNARD, 94/..... 86
Figure III.10 : Schéma coté des trois types de tâches..... 87
Figure III.11 : Agrégation des échantillons ASL en fixations /BERNARD, 94/..... 89
Figure III.12 : Chronogrammes de l'activité de l'opérateur..... 90
Figure III.13 : Charge de travail globale, pour l'ensemble des sujets et pour les trois scénarios..... 92
Figure III.14 : Mise en correspondance de l'activité manuelle avec l'activité oculaire (pour les 4 sujets)..... 92
Figure III.15 : Activité oculaire et indice de charge de travail instantanée (méthode temporelle)..... 93
Figure III.16 : Valeurs des paramètres des 5 tâches, pour les 2 niveaux difficulté. 94

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Données mesurées ou calculées à chaque expérience..... 98
Figure IV.2 : Nuage de points de fixation obtenu pour un même sujet, durant les 5 mn du scénario de test..... 99
Figure IV.3 : Répartition spatiale des fixations pour les 6 sujets..... 100
Figure IV.4 : Nombre total de fixations et de consultations pour les 6 sujets..... 101
Figure IV.5 : Distribution des durées de fixation sur les 5 tâches, tous sujets confondus..... 103
Figure IV.6 : Évolution de la charge de travail moyenne (calculée sur des intervalles de 10 s.) en fonction du niveau de difficulté..... 104
Figure IV.7 : Distribution des durées de fixation pour les 6 sujets, toutes tâches confondues..... 106

Figure IV.8 : Distribution des durées de fixation pour les 5 tâches, tous sujets confondus.....107
Figure IV.9 : Distribution des durées d'acquittement des tâches discrètes, tous sujets confondus.....109
Figure IV.10 : Fréquence moyenne de fixation des 5 tâches.....110
Figure IV.11 : Evolution de la fréquence des fixations et de la charge de travail (calculées sur des intervalles de 10 s.) pendant les 5 mn du scénario de test.....109
Figure IV.12 : Taux de consultation des 5 tâches.....112
Figure IV.13 : Distribution du nombre de fixations par consultation pour les 6 sujets (toutes tâches confondues).....113
Figure IV.14 : Distribution du nombre de fixations par consultation pour les 5 tâches (tous sujets confondus).....114
Figure IV.15 : Distribution des longueurs de saccades, pour les 6 sujets.....115
Figure IV.16 : Effectifs des termes diagonaux, pour les 6 sujets et les 2 niveaux de difficulté.....117
Figure IV.17 : Echanges entre tâches.....118
Figure IV.18 : Graphes des attractions, pour les 6 sujets.....121
Figure IV.19 : Évolutions du "désordre oculaire" et de l'indice de charge de travail.....123
Figure IV.20 : Distribution du nombre de fixations par consultation (tous sujets confondus).....124
Figure IV.21 : Proportion des séquences utilisées par l'ensemble des sujets, par rapport aux séquences possibles.....125
Figure IV.22 : Principe de détection de l'influence du niveau de difficulté sur les séquences de consultations d'une longueur donnée (la courbe concerne les séquences de longueur 3 obtenues pour l'ensemble des sujets).....126
Figure IV.23 : Extraction des principales séquences de consultations.....126

Chapitre V :

Figure V.1 : Schéma fonctionnel de la prise d'information visuelle en supervision de procédé /ACIER, 90/.....130
Figure V.2 : Organisation fonctionnelle de la perception visuelle /KOSSLYN et al., 90/.....132
Figure V.3 : Différents sous-systèmes intervenant dans la perception visuelle /KOSSLYN et al., 90/.....133
Figure V.4 : Schéma fonctionnel de la prise d'information visuelle en supervision.....136
Figure V.5 : Exemple de fonction d'anormalité (pour les deux tâches de régulation, tous sujets confondus).....140
Figure V.6 : Principe du découpage d'une image en zones "floues" /ROUSSEAU et al., 93/.....141
Figure V.7 : Principe du découpage de la plage de variation d'une variable quantitative en 3 modalités "floues".....144
Figure V.8 : Principe de la construction d'un tableau de contingence à partir du croisement de deux variables qualitatives.....146

Bibliotheque..Universitaire..de..Valenciennes
00904308