

50376  
1973  
No d'ordre : 276 52

50376  
1973  
52

# THÈSE

présentée à

**L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE**

pour l'obtention du titre de

**DOCTEUR ÈS-SCIENCES**

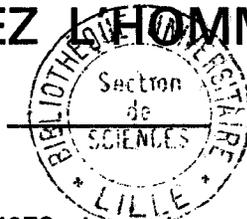
par

**Noël MALVACHE**

Ingénieur E.S.E.O.

Titre de la thèse :

**ANALYSE ET IDENTIFICATION DES SYSTÈMES  
VISUEL ET MANUEL  
EN VISION FRONTALE ET PÉRIPHÉRIQUE  
CHEZ L'HOMME**



Soutenue le 27 Avril 1973, devant la commission d'examen :

Messieurs : P. VIDAL, Président et rapporteur  
J. LAGASSE, Examineur  
J.M. TOULOTTE, Examineur

M. MORIAMEZ, Invité  
G. MILBLED, Invité  
S. PAYEMENT, Invité



A ma femme

A mes enfants

## P L A N

Introduction -----	1
<u>Chapitre I : Système de Mesure et protocole expérimental</u> -----	10
I.1 - <u>La cabine expérimentale</u> -----	11
I.1.1 - Système de présentation des stimulus - points objet et suiveur -----	12
I.1.2 - Fixation du regard et détection visuelle -----	16
I.1.3 - Dispositif manuel et réaction "motrice" -----	17
I.2 - <u>La production des signaux - Stimulus</u> -----	20
I.3 - <u>Les systèmes d'enregistrement des données et de contrôle ex-             périmental</u> -----	22
I.3.1 - Enregistrement des données -----	23
I.3.2 - Mesure du temps de détection -----	25
I.4 - <u>Le protocole d'expérience réalisée par l'opérateur humain</u> -----	27
I.4.1 - Protocole expérimental de l'analyse du système oeil main en vision frontale -----	27
I.4.2 - Protocole expérimental de l'analyse d'une poursuite en vision extra-fovéale -----	29
I.4.3 - Protocole expérimental de l'analyse du champ de détec- tion en vision latérale lors d'un travail situé en vision frontale -----	30
I.4.4 - Remarques générales sur le choix, la succession et la durée des stimulus -----	31
Conclusion -----	31
<u>Chapitre II : Analyse du champ de détection visuelle lors d'un comportement                 dynamique de l'homme</u> -----	33
II.1 - <u>Méthode d'analyse des résultats</u> -----	33
II.2 - <u>Analyse du champ visuel de détection en fonction de l'angle             d'apparition du mobile</u> -----	34
Conclusions -----	36
II.3 - <u>Etude de l'influence de la vitesse et de l'orientation du mobi-             le dans le champ visuel</u> -----	37

Conclusions -----	39
II.4 - <u>Détermination du champ de détection en fonction de la luminosité du mobile</u> -----	39
résumé -----	41
II.5 - <u>Analyse de l'influence de la tâche principale de travail</u> ---	41
Conséquences -----	41
II.6 - <u>Synthèse et abaque du champ visuel de détection</u> -----	44
II.7 - <u>Difficultés rencontrées</u> -----	45
II.7.1 - Mesure des paramètres -----	45
II.7.2 - Le système humain -----	46
Conclusions -----	48
<u>Chapitre III : Analyse des réponses dynamiques de l'homme</u> -----	49
III.1 - <u>Analyse des réponses de l'opérateur humain à un stimulus présenté en vision frontale</u> -----	49
III.1.1 - Réactions d'un sujet à un stimulus en échelon de position -----	49
III.1.1.1 - Entrée échelon de position "lumineux" -- Conclusion -----	52
III.1.1.2 - Entrée en échelon de position "lumineux" et sonore" - Conclusion -----	55
III.1.1.3 - Conclusions sur les réponses observées chez l'opérateur humain -----	56
III.1.2 - Analyses des réponses de l'opérateur à un stimulus continu -----	57
III.1.2.1 - Réactions de l'opérateur à des stimulus sinusoïdaux -----	58
Conclusion -----	58
III.1.2.2 - Réponses du sujet à des stimulus en dents de scie -----	59
Conclusion -----	60
III.1.2.3 - Conséquences fondamentales -----	60
III.2 - <u>Analyse des réponse de l'opérateur humain à un stimulus présenté en vision périphérique et effectuant une tâche en vision frontale</u> -----	60
III.2.1 - Détermination des réactions de l'opérateur humain à un stimulus en échelon de position -----	61
Résumé -----	62

III.2.2 - Analyse des réponses de l'opérateur humain à des stimulus en échelon de position répétitif -----	63
Conclusion -----	67
III.2.3 - Etude des trajectoires manuelles du sujet excité par des stimulus sinusoïdaux et en dents de scie -----	67
Conséquences -----	68
III.3 - <u>Conclusions générales sur le comportement dynamique de l'opérateur</u> -----	68
Résumé -----	69
<u>Chapitre IV : Identification et élaboration d'un modèle mathématique de l'opérateur humain</u> -----	70
IV.1 - <u>Méthode d'identification</u> -----	70
IV.2 - <u>Structure du modèle de l'opérateur</u> -----	72
IV.3 - <u>Caractérisation de la perception des stimulus</u> -----	73
a) la détection -----	75
b) les entrées possibles -----	76
c) la perception -----	77
IV.4 - <u>Echantillonnage des informations</u> -----	78
Conclusion -----	79
IV.5 - <u>Poursuite manuelle en "boucle ouverte", introduction d'un gain variable</u> -----	79
Conséquences -----	79
IV.6 - <u>Le système oculo-moteur</u> -----	81
IV.6.1 - Mouvement de "va et vient" de l'oeil -----	81
Conclusion -----	83
IV.6.2 - Capteur visuel -----	83
Conclusion -----	83
IV.6.3 - Système oculo-moteur en boucle fermée -----	84
Conséquence -----	85
IV.6.4 - Conclusions -----	85
IV.7 - <u>Action du système auditif sur le comportement de l'opérateur</u> -----	87
Conséquence -----	88
IV.8 - <u>Caractérisation de l'excentricité de l'image stimulus sur la rétine</u> -----	89
IV.9 - <u>Synthèse et conclusions</u> -----	90
Conclusions -----	90

## Chapitre V : Modèles adaptatifs de l'opérateur humain

V.1 - <u>Aspects prédictifs de la réponse de l'opérateur et caractéristique de l'échantillonneur</u> -----	94
Conclusion -----	96
V.2 <u>Fonction "floue"</u> -----	96
Conséquence -----	98
V.3 - <u>Pondération des tâches</u> -----	98
Résumé -----	99
V.4 - <u>Algorithme d'apprentissage de l'opérateur humain en vision périphérique</u> -----	101
V.4.1 - <u>Modèle adaptatif du sujet (inf. visuelles floues)</u> ----	102
V.4.2 - <u>Comparaison opérateur - modèle</u> -----	102
Conclusion -----	104
V.5.- <u>Modèle d'opérateur lors d'un régime d'apprentissage en vision fovéale</u> -----	104
V.5.1 - <u>Etat adapté de l'opérateur</u> -----	104
V.5.2 - <u>Modèle de l'opérateur et comparaison homme-modèle</u> ---	106
Conclusions -----	109
<u>Chapitre VI : Essai de synthèse des modèles de l'opérateur</u> -----	110
VI.1 - <u>Difficulté d'une formulation rigoureuse</u> -----	111
VI.2 - <u>Information appréhendée par l'homme</u> -----	111
VI.3 - <u>Concept des systèmes hiérarchisés appliqué à l'opérateur humain</u> -----	111
VI.3.1 - <u>"Critère" de commande interne du système humain</u> ----	112
VI.3.2 - <u>Proposition d'un modèle hiérarchisé de l'opérateur</u> ---	114
VI.4 - <u>Conclusions</u> -----	115
Conclusions générales -----	116
Bibliographie -----	118

### Annexe A.1

Fixation du regard -----	124
Caractéristiques du transducteur électro-mécanique -----	125
Séquence d'apparition des cibles dans le champ visuel et intervalle de temps approximatif séparant deux pressions manuelles -----	126

## Annexe A.II

Enregistrement (influence de la vitesse du déplacement du mobile- $x(t)$ )	128
Dispersion des mesures et attention du sujet à sa tâche principale	- 130

## Annexe A.III.1

Analyse des principaux paramètres des réponses visuelles et manuelles à des stimulus visuels	----- 132
Temps de réaction et retard pur	----- 135
Réponses de l'opérateur à des stimulus en échelon de position lumineux et sonore	----- 135
Réactions de l'opérateur humain à des stimulus continus	----- 136

## Annexe A.III.2

Analyse des réponses de l'opérateur en vision latérale	----- 140
--	-----------

## Annexe A.IV.1

Structure du système humain	----- 143
Détection des stimulus	----- 143
Echantillonnage des informations	----- 144

## Annexe A.IV.2

Transmittance et gain variable dans la fonction de transfert de l'opérateur humain	----- 147
Le système visuel et ses non linéarités	----- 149
Point de fixation visuelle	----- 150
Caractérisation de l'influence de la vitesse du mobile-objet dans le modèle de l'opérateur	----- 150
Interaction du système auditif lors d'une tâche de poursuite manuelle	----- 152

## Annexe A.V

Enregistrements	----- 153
Schéma de simulation du système visuel	----- 157
Schéma de simulation du système manuel	----- 158
Schéma de simulation de la "visée" adaptative du sujet	----- 159
Systèmes hiérarchisés	----- 160

## AVANT - PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Centre d'Automatique de l'Université des Sciences et Techniques et au Laboratoire de Physiologie de l'Université du Droit et de Santé de Lille.

Nous tenons à adresser notre plus grande reconnaissance à Monsieur le Professeur Pierre VIDAL qui par ses qualités humaines, ses dons pédagogiques et son grand dynamisme nous a formés, aidés et dirigés dans l'élaboration de ce travail. Ses nombreux conseils ont été à la source des orientations de ce mémoire, et l'admiration que lui portent ses chercheurs amène à le considérer comme un exemple et à être très fier de travailler sous sa direction.

Nous remercions Monsieur le Professeur J. LAGASSE pour l'honneur qu'il nous fait de juger ce travail qu'il a vu progresser. Maintes fois, nous avons pu apprécier son dynamisme enthousiasmant et la sagesse de ses jugements dans ses différentes activités. Qu'il trouve ici l'expression de nos plus grands remerciements et notre plus vive gratitude.

Nous adressons à Monsieur J.M. TOULOTTE, Maître de Conférences, notre reconnaissance pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail. Nous avons pu bénéficier de ses conseils et de son expérience très précieuse. Nous exprimons notre attachement et nos remerciements pour l'aide qu'il nous a apportée dans l'élaboration de ce mémoire.

Monsieur le Professeur M. MORIAMEZ nous a grandement honorés en acceptant de juger ce travail et par l'intérêt constant qu'il a bien voulu nous témoigner. Ses nombreuses qualités humaines et pédagogiques ont toujours été pour nous un sujet d'admiration. Nous tenons aujourd'hui à lui dire combien nous sommes fiers d'être sous sa direction dans nos activités universitaires permettant d'apprécier son esprit novateur ainsi que son entrain permanent à rénover, à créer dans le but de progresser constamment.

Nous présentons à Monsieur le Professeur G. MILBLED notre plus grand attachement. Nous avons eu l'honneur de bénéficier de ses nombreux conseils de spécialiste qui nous ont permis de progresser dans ce mémoire et pour lequel il n'a jamais épargné son temps. Ses qualités humaines, sa sympathie envers les hommes de Sciences, sa rigueur scientifique et son souci constant de perfection ont été à la base des orientations de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de nos plus grands remerciements pour avoir accepté de nous guider et d'effectuer nos recherches dans son laboratoire de Physiologie.

Nous tenons à remercier tout particulièrement le Commandant S. PAYEMENT pour l'aide qu'il nous a apportée dans la réalisation de ce travail. Ses nombreux conseils ont été déterminant dans les différentes orientations de ce mémoire. Nous avons eu l'honneur d'apprécier la qualité de ses jugements et le haut degré de sa spécialisation en Ergonomie où son expérience et sa compétence sont bien connues. Qu'il trouve ici l'expression de notre respectueux attachement et nos plus grands remerciements pour l'exécution de ce travail.

Nous ne saurions terminer cet avant-propos sans exprimer toute notre reconnaissance à Monsieur le Professeur P. NAYRAC, Monsieur le Professeur VANLERENBERGHE et à Monsieur le Professeur FRANCOIS pour l'intérêt constant et l'aide très précieuse qu'ils nous ont donnés en favorisant l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à rendre hommage à Messieurs G. DHEDIN, J.C. HACHE, F. DUPAS, J.M. JACQUESSON, B. POISSONNIER, J.P. CORNIL, qui par leur formation médicale et scientifique ont fortement contribué à notre travail.

Enfin, qu'il nous soit permis d'exprimer nos plus vifs remerciements à tout le personnel des deux laboratoires de Physiologie et d'Automatique, en particulier à ceux qui nous ont prêté leur concours ainsi qu'à tous nos collègues chercheurs.

## INTRODUCTION

Le développement et la complexité des systèmes qu'ils soient industriels, économiques, cybernétiques ... ont donné depuis plusieurs années à l'Automatique un essor croissant dans divers domaines, d'une part par l'emploi grandissant des calculateurs, d'autre part grâce à l'extension des fonctions de commande d'algorithme et la volonté de mettre en évidence la structure et les propriétés des phénomènes observés.

Parallèlement à ces recherches, les problèmes du dialogue entre l'homme et les systèmes et des interventions humaines sur ceux-ci - un exemple est donné dans les derniers vols spatiaux - ont montré la nécessité de considérer l'être humain en tant qu'élément supérieur au sens hiérarchique et d'analyser les réactions de l'homme lors de diverses activités (pilotage, surveillance, détection d'un objet en vol basse altitude de cible militaire) afin d'identifier et d'élaborer un modèle du comportement humain. En d'autres termes, ce que nous appelons Automatique humaine a vu ces dernières dizaines d'années un développement ayant pour but d'intégrer l'homme dans le complexe de l'étude des systèmes.

La juxtaposition des disciplines de l'Automatique et de la physiologie permet d'introduire dans ces recherches des méthodes présentant l'intérêt d'interpréter davantage certains phénomènes, d'identifier des modèles d'opérateur humain et de découvrir - objectif très alléchant, mais combien complexe compte tenu de la nature de l'être humain lui-même - certains processus ou comportements illustrés par des algorithmes pouvant avoir une portée non seulement dans le domaine de l'application, mais encore dans ces deux domaines.

### Historique de l'étude

Ceci amène bien entendu à envisager les différents rôles et phénomènes mis en jeu dans diverses fonctions physiologiques - fonction du regard, champs de visions frontale et périphérique, réaction des mouvements résultants d'un stimulus, détection, sélection et évaluation des informations visuelles d'une image, fonction auditive, habileté de l'homme, adaptation au travail, étude et analyse des organes - qui ont fait l'objet de nombreux travaux, entrepris depuis quelques dizaines d'années.

Ne citons pour l'instant que ceux de Mc RUER /1/, KRENDEL /2/, TUSTIN /3/, YOUNG /4/ STARK /5/, SHERIDAN /6/ relatifs à l'analyse des systèmes visuel et manuel mettant en évidence le comportement de l'opérateur humain effectuant les tâches de poursuite ou de surveillance.

Les premiers travaux dans ce domaine de recherche se sont orientés bien souvent vers des objectifs non désintéressés - amélioration des performances de l'homme dans des tâches militaires - et se sont transplantés au cours des années dans le domaine de l'Ergonomie en général, concrétisés par des études approfondies et l'élaboration de modèles représentatifs de l'opérateur humain réalisant certaines tâches. Parmi ceux-ci, dont certains sont explicités dans la suite, étant les plus intéressants à notre sens, les principaux auteurs ont analysé l'homme dans une tâche manuelle de commande d'engin Figure 0.1 - travaux de RAOULT /7/, SOUKHODOLSKI /8/, WILDE et WESTCOTT /9/, FIRLA et MOROWSKI /10/, lorsque le détecteur visuel voit d'une part les déplacements du but E et du système commandé X (tests de poursuite) d'autre part l'erreur  $\epsilon$  entre ces deux derniers déplacements (tests de compensation) expériences réalisées en vision frontale, la direction du regard suivant selon les propriétés du système oculo-moteur, le déplacement de l'objet.

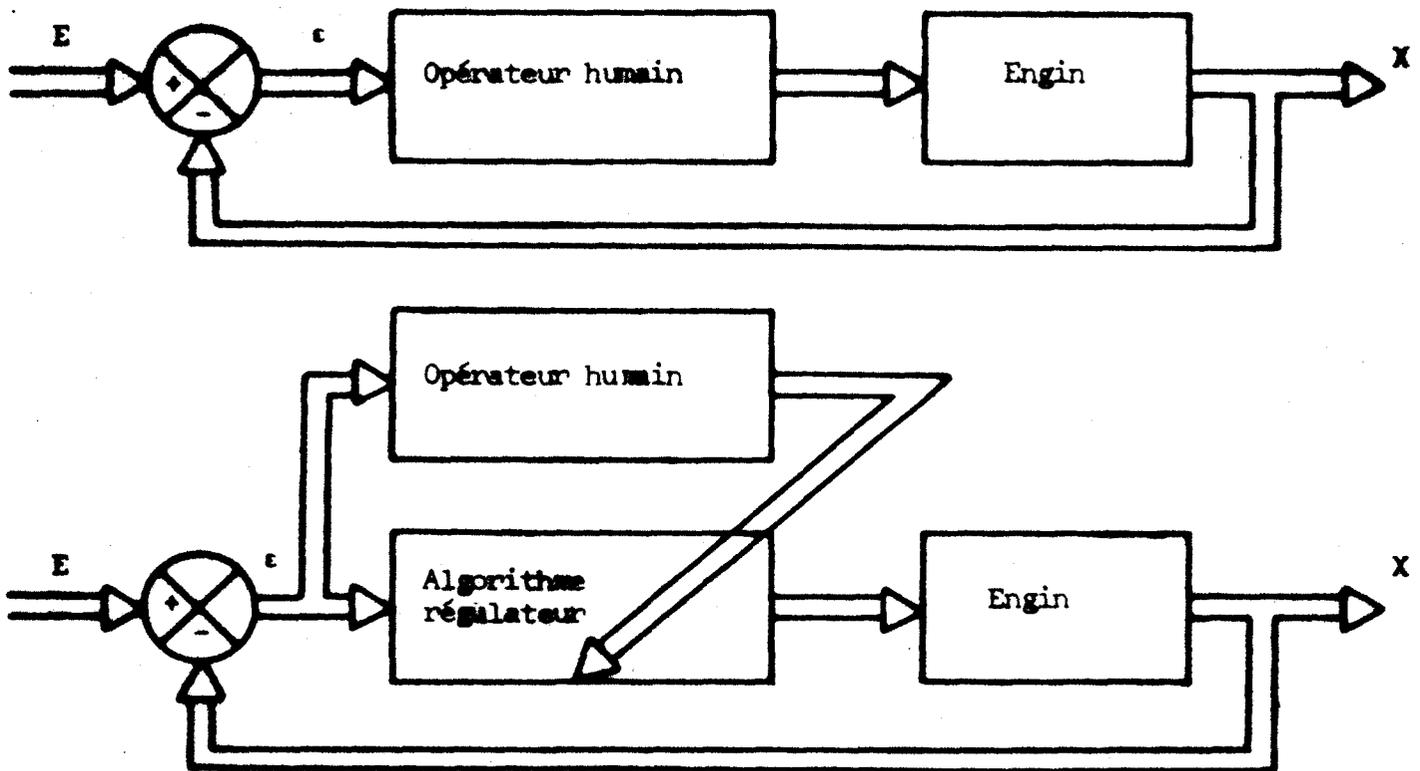


Figure 0.1 : L'opérateur humain dans une boucle de commande

Dans cette commande d'engin l'homme doit amener ou contrôler par son intervention la trajectoire de celui-ci initialement à  $X_0$  à l'instant  $t_0$  vers un but situé à  $X_1$  et réalisé au temps  $t_1$ . Ce système fait intervenir les notions de fonction de transfert, de retard à l'information, de boucles interne et externe, rapide et lente de l'opérateur humain. Les modèles proposés ont une transmittance souvent du second ordre, non-linéaires mais ils sont très fréquemment ramenés à un système linéaire dans le cas particulier d'un stimulus donné. Les facultés adaptatives à l'engin commandé, la structure variable du système humain et le caractère échantillonné des informations sont mentionnés dans la plupart de ces travaux. Présentons ci-dessous quelques exemples de modèle d'opérateur humain proposés par certains auteurs.

Le modèle proposé par Mc RUER /1/ figure 0.2, analysant un opérateur lors de tests en "compensation" révèle un comportement non-linéaire de l'opérateur humain en fonction des caractéristiques du signal d'entrée - signaux échelons de position, sinusoïdaux ou aléatoires - .

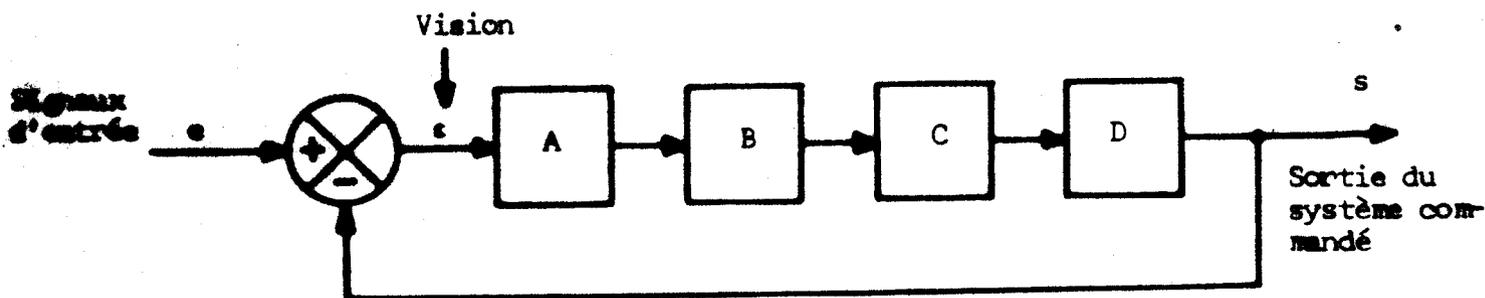


Figure 0.2 : Modèle de Mc RUER

$e$  = erreur entre l'entrée et la sortie de l'engin commandé, visualisée sur un écran

A = Estimation et échantillonnage des observations

B = Ensemble de décision, prédiction, sélection, quantification associé à la mémoire

C = Effecteur moteur : reconstitution des ordres et cinématique du bras

D = Cinématique du système commandé.

Toutefois pour un signal donné il souligne que l'opérateur se comporte comme un système linéaire de transmittance :

$$H(p) = K \frac{1 + T_1 p}{(1 + T_2 p)(1 + T_3 p)} e^{-\tau p}$$

$\tau$  = Temps de réaction variant de 0,2 à 0,5 seconde

$T_3$  = Constante de temps musculaire

$\frac{1 + T_1 p}{1 + T_2 p}$  = fonction de transfert introduite par l'opérateur.

RAOULT /7/ étudiant le comportement de l'opérateur humain effectuant une tâche manuelle en régime de poursuite et de compensation met en évidence les facultés d'adaptation du sujet au système commandé, les différences des états adapté et transitoire, et le phénomène échantillonné des informations reçues. Ses travaux précisent qu'un opérateur adapté est assimilable à un système linéaire possédant un retard pur mais dont la transmittance se modifie en fonction de la dynamique du système commandé  $S(p)$ , et RAOULT souligne que le comportement du sujet est optimal lorsque  $S(p)$  est une constante. Les signaux d'entrée utilisés sont des "sinusoïdes aléatoires" et des échelons de position. Le modèle proposé par RAOULT est représenté figure 0.3.

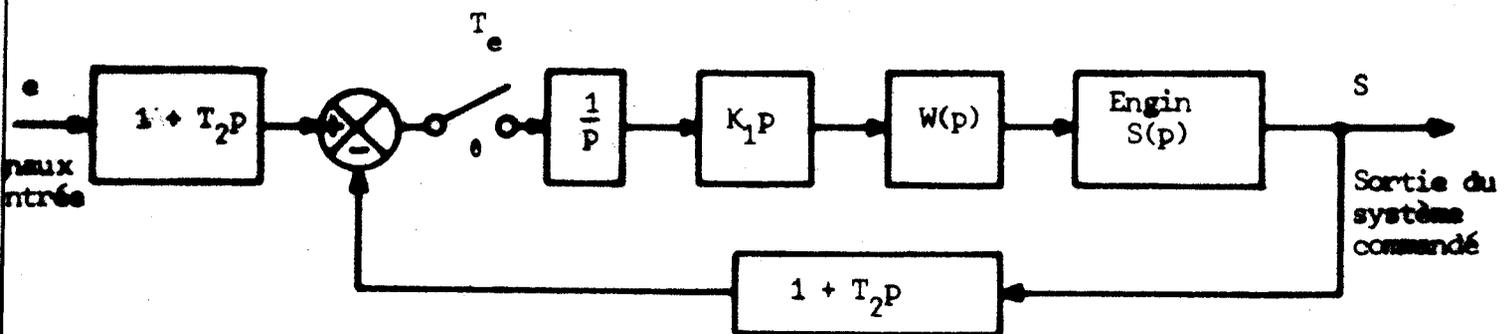


Figure 0.3 : Modèle de RAOULT.

$1 + T_2 p$  = représente les afférences oculaires de l'opérateur.

$T_e, \theta$  = échantillonneur de période  $T_e = 0,4$  seconde et de durée de prise d'information  $\theta = \frac{T_e}{5}$

$\frac{1}{p}$  = joue le rôle de bloqueur.

$h_1 p$  = rend compte de l'adaptation de l'homme à sa machine.

$W(p)$  = correspond à la transmission de l'influx nerveux et à l'ensemble bras - avant bras.

$$W(p) = \frac{1}{1 + \alpha^2 h^2 p^2 + \alpha^3 h^2 p^2 + \alpha^3 h^3 p^3 + \alpha^2 h^4 p^4 + h^5 p^5}$$

$$\alpha = 1,9 \quad \text{et} \quad h = \frac{1}{2^3}$$

$S(p)$  = engin effectuant une opération de proportionnalité ou d'intégration simple associé à l'homme.

Les travaux de SOUKHODOLSKI /8/ s'orientent davantage vers l'étude de l'homme dans une tâche de surveillance et montrent une amélioration progressive de ses réactions. SOUKHODOLSKI propose un modèle issu d'une analyse expérimentale du comportement de l'opérateur chargé de suivre à l'aide d'un viseur une cible mobile dont la vitesse varie de 2,5 à 50 mm/sec. Il suppose des circuits afférents séparés ayant une sortie commune et range le système de surveillance du sujet parmi les asservissements oscillatoires à structure variable pouvant contenir des mécanismes d'anticipation, d'accélération et de recherche.

Soulignons les travaux de LEVISON (11) et ELKIND (12) particulièrement intéressants qui mettent en évidence le comportement de l'opérateur à partir d'un contrôle manuel à deux variables. Celui-ci doit contrôler lors de tests de compensation les deux erreurs présentées sur les deux voies d'un écran oscilloscope à l'aide de leviers solidaires l'un de la main droite, l'autre de la main gauche. LEVISON et ELKIND ont proposé dans leurs travaux l'approximation suivante de la transmittance de l'opérateur :

$$H(p) = K \frac{1 + T_1 p}{1 + T_2 p} e^{-\tau p}$$

$K$  = gain statique

$\tau$  = retard pur - 0,15 à 0,2 seconde.

$T_1$  = 0,1 à 0,125 seconde

$T_2$  = 0,25 seconde

Lors de ces expériences, le mouvement de l'oeil est déterminé par l'enregistrement des potentiels biologiques produits par les muscles oculaires.

Mentionnons aussi les travaux intéressants de JOHANNSEN /13/ proposant un modèle non-linéaire où les voies de transfert de l'information sont en partie "série" et en partie "parallèle" (figure 0.4). JOHANNSEN distingue principalement dans le modèle multi-paramètres de l'opérateur humain.

- (I) - un système de perception des informations pouvant contenir un multiplexeur et un convertisseur analogique digital.
- (II) - un élément non-linéaire à seuil situé dans le système nerveux central de l'homme où les différentes entrées peuvent être pondérées, et la sortie est comparée à un seuil fonction d'une décision.

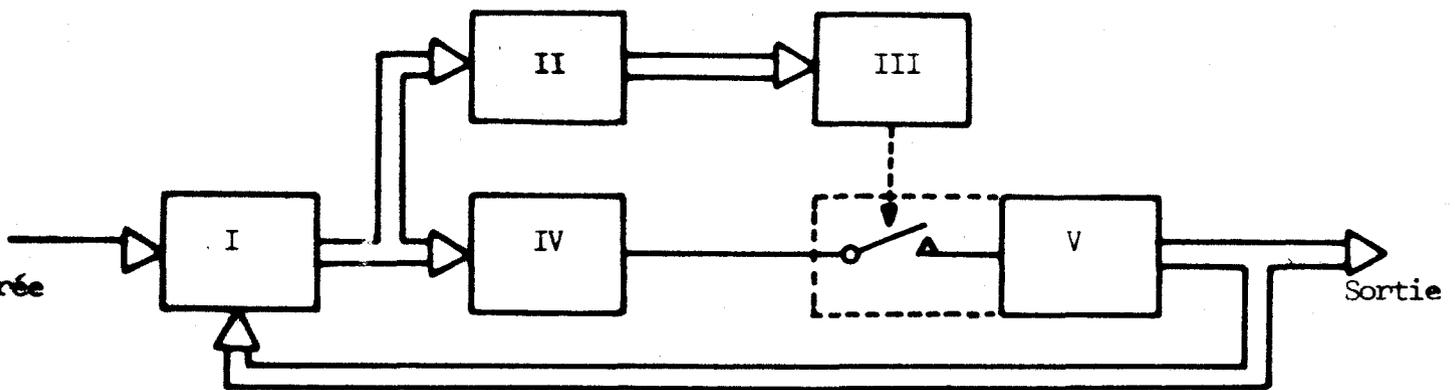


Figure 0.4 : Modèle de JOHANNSEN

- (III) - un algorithme de décision du comportement de l'opérateur, élaboré dans le système nerveux central.
- (IV) - un élément de génération des commandes, et
- (V) - un système de synthèse, et la sortie.

Le dispositif à contrôler par l'opérateur est de différentes fonctions de transfert, les tests utilisés sont de poursuite ou de compensation entraînant une modification de la structure du modèle.

Citons pour terminer, divers exemples de modèle du système oculo-moteur, étant donné que la fonction visuelle a une grande importance dans notre exposé. En effet sa contribution caractérise essentiellement le comportement de l'homme réalisant un travail.

VOSSIUS /14/ et WERNER /15/ distinguent dans le système visuel un régulateur à deux voies parallèles représentatives des comportements "continu" (automatique) et "saccadé" (volontaire) du mouvement de l'oeil. Le fait significatif de leurs travaux consiste à considérer deux boucles de contrôle : l'une interne l'autre externe (figure 0.5). La boucle interne est constituée par le chemin du retour des informations des muscles oculaires. La seconde boucle externe relie le mouvement de l'oeil au déplacement de l'objet-suiveur dans laquelle VOSSIUS et WERNER introduisent un gain  $K_r$ .

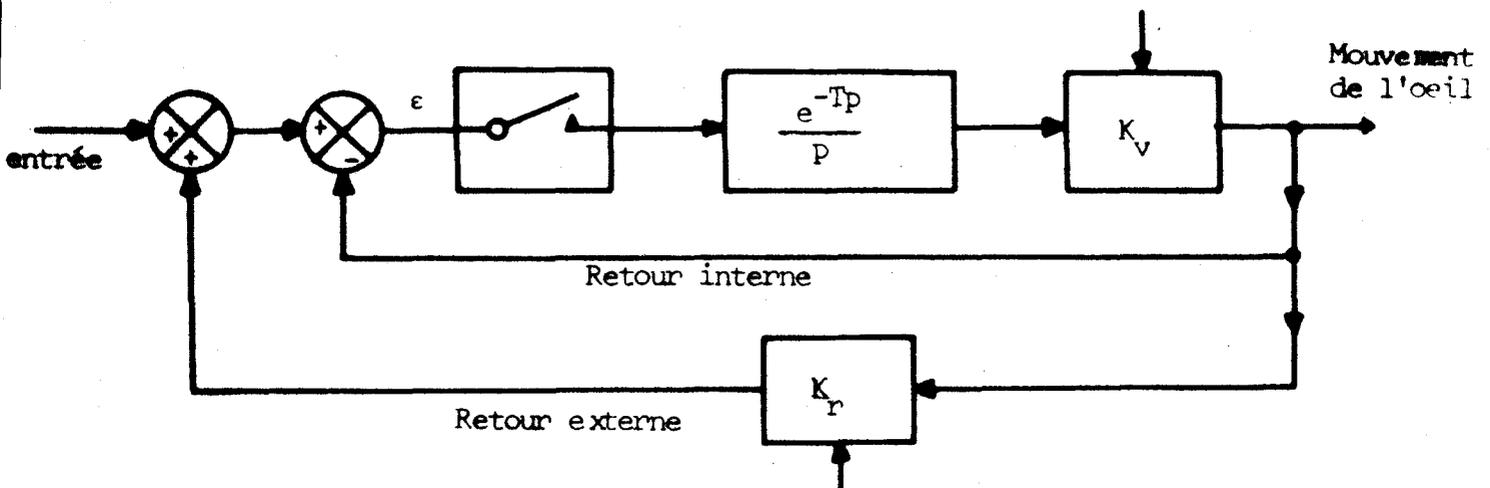


Figure 0.5 : Modèle de VOSSIUS et WERNER

Les tests de poursuite visuelle permettent de mettre en évidence les facultés adaptatives du système recherchant une valeur optimum du gain "interne"  $K_v$  pour une valeur  $K_r$  donnée.

Ces travaux soulignent que la prédiction de l'opérateur dépend de la structure du signal et du temps de présentation du stimulus.

Signalons encore qu'à partir des travaux de RASHBASS /16/, YOUNG /4/, STARK /5/ et JOHNSON /17/ proposent deux modèles échantillonnés dans lesquels les deux types de mouvements continu et saccadé de l'oeil sont engendrés par un asservissement comportant dans sa chaîne directe deux mécanismes différents représentatifs de ces modes de fonctionnement et ne possédant pratiquement aucune interaction.

DALLOS /18/ indique que le retard pur s'introduisant dans la fonction de transfert du système oculo-moteur est fonction de la fréquence du signal d'entrée et que les résultats enregistrés pour des entrées aléatoires ou sinusoïdales sont différents.

Ces quelques exemples relevés parmi les nombreux résultats de recherche suscitent néanmoins quelques commentaires permettant d'introduire notre contribution à l'analyse de l'opérateur humain.

- . Les tests soumis à l'opérateur sont presque exclusivement présentés en vision frontale et la vision périphérique est même rarement mentionnée.
- . L'analyse des mouvements de l'oeil et de la main n'est pas toujours entreprise d'une manière simultanée en temps réel pour aboutir à une étude corrélative entre les systèmes visuel et manuel. Les liaisons oeil-main n'ont pas encore été exploitées au maximum.
- . L'aspect non-linéaire du système humain est très fréquemment rencontré mais il est rarement mis en évidence et résolu dans le modèle.
- . Les modèles proposés sont bien souvent fondés sur une "forme" bien précise de l'entrée entraînant un comportement linéaire de l'opérateur.
- . L'aspect physiologique du modèle est parfois négligé ou exclusivement réservé à l'élaboration de celui-ci sans analyses expérimentales.
- . Les phénomènes auto-adaptatifs et l'aspect multivariable du système humain sont peu introduits et souvent mal définis.
- . L'analyse globale du système manuel répondant aux tests de forme aléatoire et de forme identique est rarement entreprise d'une manière simultanée.
- . L'activité corticale est souvent mise en évidence mais n'est pas explicitée réellement dans les modèles .
- . L'étude du comportement de l'homme est rarement effectuée à l'aide de stimulus de nature différente - stimulus visuel et auditif -
- . Les mouvements de l'opérateur sont très souvent unidirectionnels.
- . Les stimulus présentés à l'opérateur ont dans la majorité des cas une faible amplitude entraînant une petite excentricité de l'image rétinienne vis à vis de la fovéa correspondant au centre du champ visuel.

L'énoncé de ces quelques remarques permet d'illustrer l'étendue des problèmes non encore résolus et le vaste champ de recherche d'études complémentaires. Nous nous proposons d'apporter notre contribution en ce qui concerne l'étude du régulateur humain en vision frontale et en vision périphérique.

Notre travail consiste plus particulièrement à élaborer un modèle de l'opérateur humain effectuant une tâche de travail pouvant être située en vision frontale, en vision périphérique ou simultanément, dans le cas de plusieurs tâches. Notre but consiste à proposer un modèle unique compte tenu des différentes formes des entrées et positions de celles-ci dans le champ latéral de vision. Cette étude est basée sur une analyse des systèmes visuel et manuel, des différentes réponses observées chez l'homme en fonction de la localisation du travail et des informations visuelle et auditive fournies, ainsi que du champ de détection d'un mobile se déplaçant dans le champ latéral de vision lors d'une tâche de l'opérateur. Nous introduisons les notions d'apprentissage et les facultés adaptatives du sujet et nous tentons de formuler le comportement de l'opérateur humain en faisant intervenir le concept d'actions hiérarchisées.

#### Conclusions :

Nous avons voulu montrer dans cette introduction l'aspect actuel de cette recherche et notre contribution à l'analyse de l'opérateur humain en considérant le champ visuel de perception possible.

Notre but concerne la formulation d'un modèle unique à structure variable du comportement de l'opérateur humain compte tenu de l'excentricité de l'image rétinienne par rapport à la fovéa correspondant au centre du champ visuel et d'une étude paramétrique de la détection d'un objet.

Nous présentons dans ce qui suit un dispositif de mesure et un protocole expérimental capable de mettre en évidence les données essentielles qui caractérisent les réactions de l'homme réalisant une charge de travail.

Chapitre I

*SYSTEME de MESURE et PROTOCOLE EXPERIMENTAL*

Dans ce premier chapitre nous décrivons l'ensemble du dispositif de mesure dont nous disposons et les différentes tâches effectuées par l'opérateur permettant d'élaborer le modèle correspondant.

Le dispositif est composé essentiellement de quatre parties (figure 1.1).

- I.1 - La cabine expérimentale
- I.2 - La production des signaux-stimulus
- I.3 - Les systèmes d'enregistrement des données et de contrôle expérimental.
- I.4 - Le protocole d'expérience réalisée par l'opérateur humain.

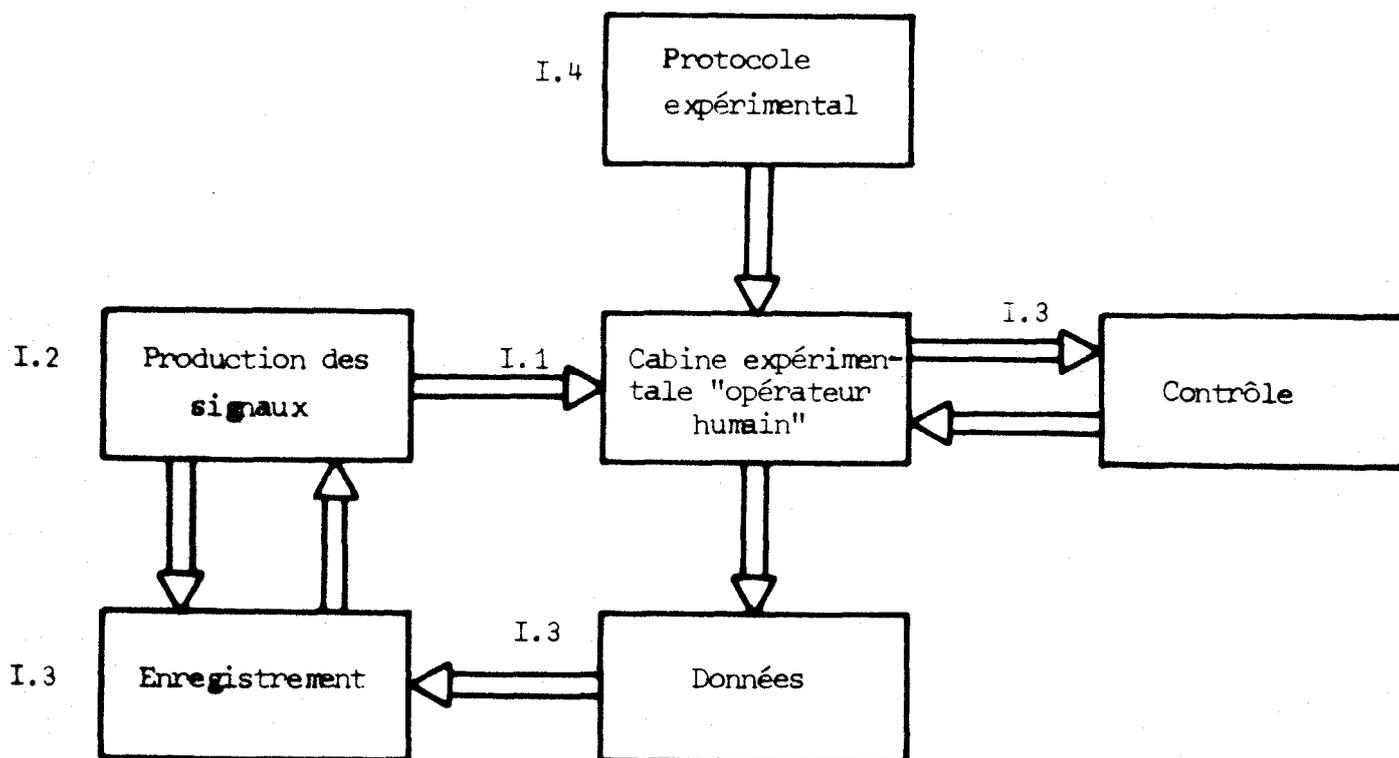


Figure 1.1 : Dispositif de mesure et protocole expérimental.

### I.1 - La cabine expérimentale

L'observateur humain se trouve dans une cabine expérimentale obscure et est sollicité à effectuer, dans la majorité des cas, un travail de *poursuite visuelle* et manuelle/19/. Afin de permettre l'analyse des réactions de l'homme en visions frontale et périphérique la cabine est constituée essentiellement de plusieurs oscilloscopes solidaires d'un système mécanique facilitant la rotation d'un de ceux-ci par rapport aux autres, d'une série de lampes disposées dans le plan horizontal et dans l'espace, d'un dispositif sonore permettant de combiner un stimulus auditif, d'un capteur manuel (manche à balai) utilisé pour les différents travaux de pistage, de positionnement et de détection, d'un capteur visuel bidirectionnel des mouvements oculaires /20/ et d'un système de "fixation" de l'opérateur humain. C'est cet ensemble de "stimulus" et de "détecteurs" que nous allons examiner succinctement figure 1.2 .

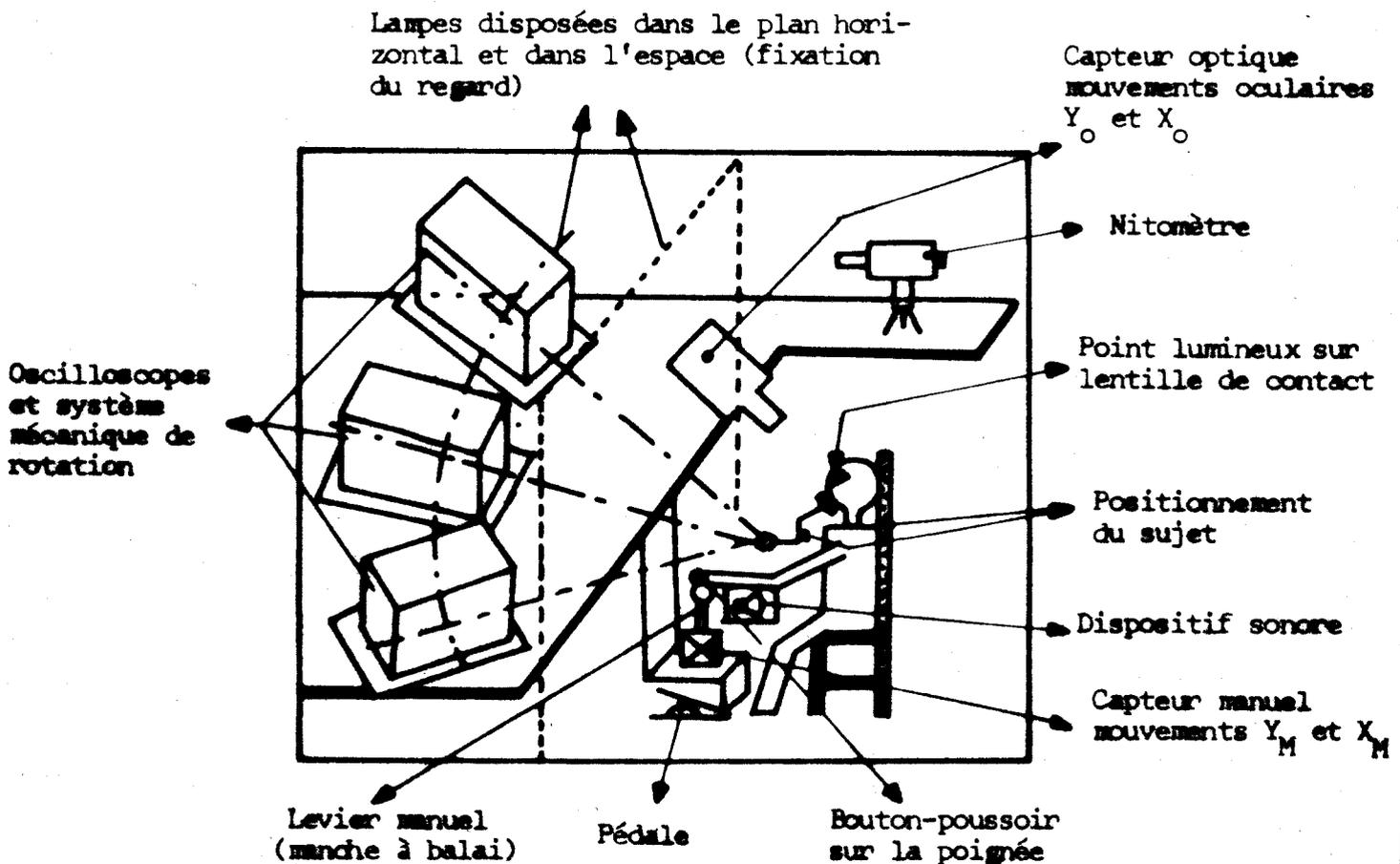


Figure 1.2 : Présentation d'ensemble de la cabine expérimentale

I.1.1 - Système de présentation des stimulus - points objet et  
suiveur

La présentation de la cible-objet et du point suiveur est réalisée par l'intermédiaire d'écrans d'oscilloscopes cathodiques placés sur une circonférence d'un mètre de rayon centrée sur l'opérateur humain. La ou les cibles-objets sont des points lumineux dont les divers déplacements sont commandés par des signaux électriques extérieurs, indépendants de l'opérateur et appliqués aux plaques de déviation d'un ou des oscilloscopes. On appelle point suiveur le "spot" dont le déplacement est commandé par les tensions représentatives des composantes du mouvement manuel solidaire du levier "manche à balai" tenu par la main du sujet. Ces tensions appliquées aux plaques de déviation de l'oscilloscope donnent à l'opérateur la possibilité de connaître à tout instant l'erreur existant entre les "spots" cible-objet et suiveur.

Afin de faciliter le travail de l'opérateur dans un test de poursuite - le sujet devant réaliser le plus correctement possible la coïncidence des deux points objet et suiveur - on distingue les deux spots par leur couleur à l'aide de plaques semi-réfléchissantes. Il est alors aisé de superposer des points de formes identiques ou différentes (rond, croix, point) et de couleurs diverses (bleu ou verte) /21/.

Dans le cas de travaux difficiles nous avons toujours choisi des couleurs différentes pour distinguer les stimulus visuels. Toutefois pour certaines tâches principales "faciles" nous avons préféré utiliser la même couleur. Nous présentons figure 1.3 les apparitions des divers stimulus à l'aide de la convention suivante :

- flèche indiquant la direction du regard
- petits traits indiquant la perception visuelle
- .- traits indiquant les réactions manuelles de l'opérateur
- ampoule électrique - stimulus de position fixe.

L'utilisation de couleurs différentes a pour unique objet de faciliter la tâche du sujet et de diminuer l'influence de la fatigue. Les représentations a) et b) (figure 1.3) illustrent le protocole utilisé lors de l'analyse du comportement de l'opérateur effectuant une tâche de poursuite /22/ ou de compensation en vision frontale ; le système oculo-moteur est "libre" et la direction du regard suit selon les caractéristiques du système visuel /23/ le déplacement de l'objet (le but) en même temps que celui du point suiveur. Ces expériences ont été réalisées à l'aide d'un point objet vert et d'un point suiveur bleu.

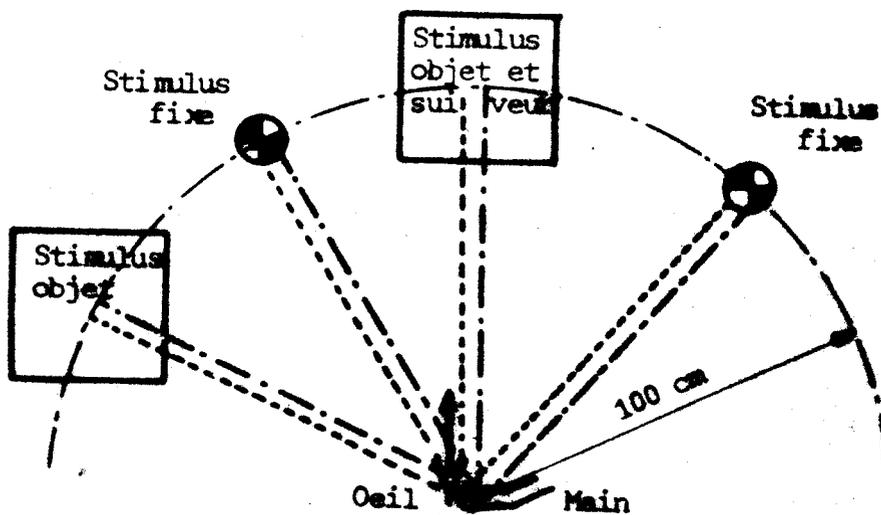
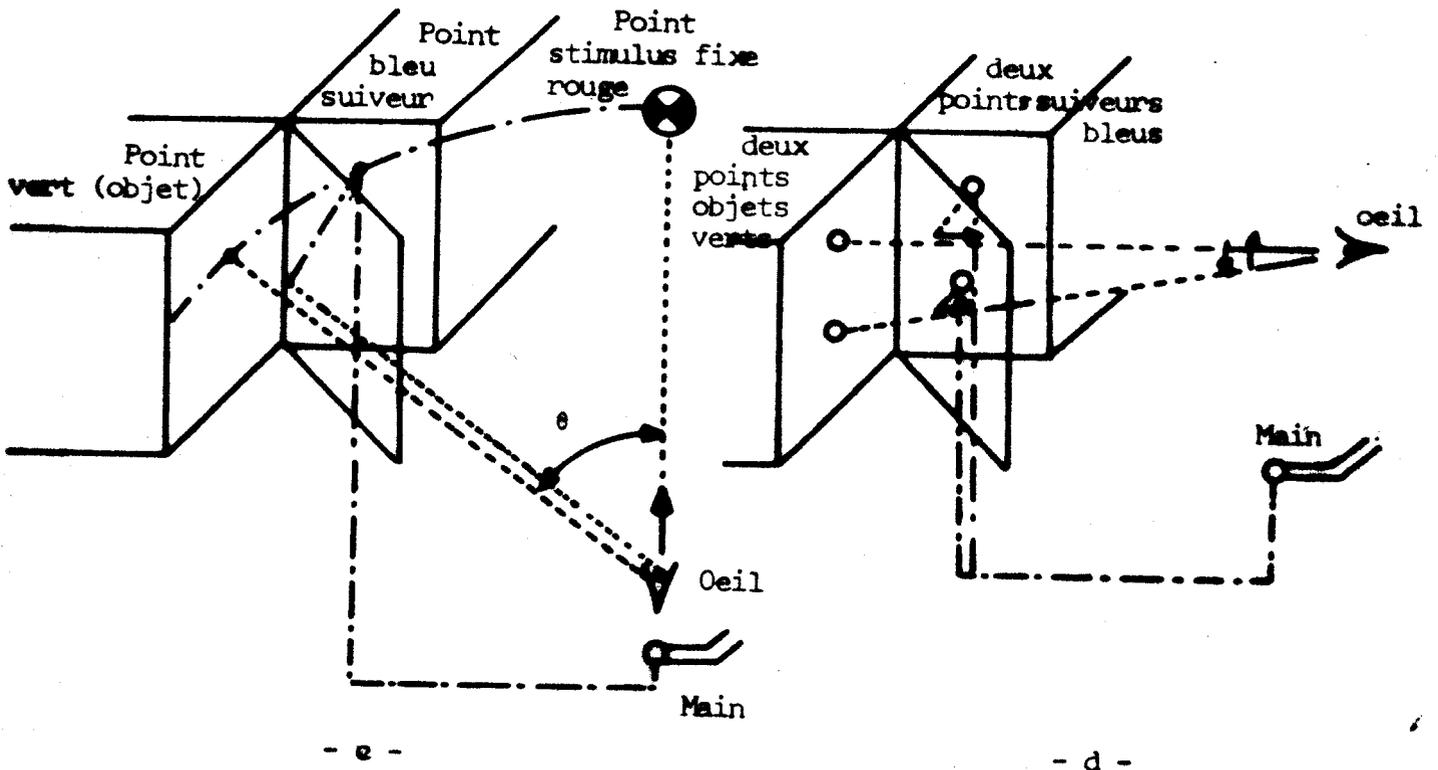
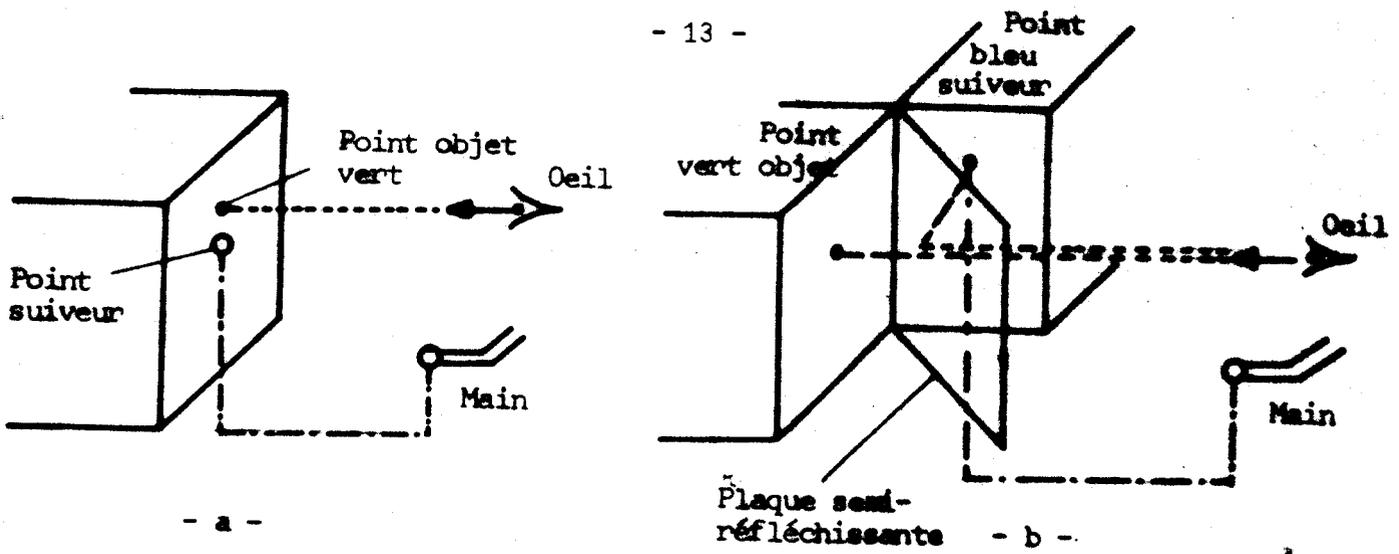


Figure 1.3 : Différentes présentations des points objet et suiveur par rapport à la position de l'opérateur humain.

Le cas c) illustré figure 1.3 est représentatif d'une tâche de **poursuite** mais en vision extra-fovéale. La direction du regard est volontairement fixée vers un "repère" - ampoule électrique de couleur rouge - et les déplacements des points objet (vert) et suiveur (bleu) apparaissent toujours à une distance d'un mètre du sujet, mais dans une autre région que celle de l'axe du regard. Un angle latéral  $\theta$  sépare ces deux directions et se modifie en déplaçant la position du repère autour du sujet.

Ceci nous amène à préciser le langage utilisé dans cet exposé : on appelle "tâche principale" celle qui correspond à la direction du regard et "tâche secondaire" celle qui est perçue dans une autre direction du champ visuel que celle de l'axe de vision. Autrement dit, au cas c), la tâche principale est constituée par le maintien de la direction du regard vers le repère lumineux - travail de surveillance - et la tâche secondaire est destinée à réaliser la coïncidence des points objet et suiveur situés à un angle latéral  $\theta$  par rapport à la direction du regard. Cette terminologie vient du fait que la direction du regard s'oriente davantage vers une région privilégiée de l'espace visuel où se déroule par exemple "un fait extérieur principal".

La représentation e) figure 1.3 tend à généraliser le cas précédent lorsqu'on demande à l'opérateur humain une "réaction motrice" par rapport à la charge globale de travail. Le sujet doit d'une part exécuter son travail principal en vision fovéale - pistage, positionnement, surveillance - d'autre part réaliser un travail secondaire demandé en vision latérale périphérique - détection, appui manuel sur un bouton-poussoir.

Le cas d) figure 1.3 est particulier par le fait que le système visuel est "libre" de choisir en vision fovéale l'une des deux tâches. En utilisant la terminologie précédente l'un des travaux est tantôt principal tantôt secondaire et vice versa.

Soulignons que toutes ces expériences ont été réalisées les deux yeux ouverts et précisons que la tâche principale de positionnement consiste pour l'opérateur à maintenir le point suiveur représentatif de sa position manuelle dans une région déterminée, limitée par des repères. S'il s'en écarte, la tâche du sujet consiste à ramener le point suiveur dans le secteur autorisé.

L'essentiel du dispositif de présentation des stimulus visuels étant cité, il convient maintenant de préciser celui des stimulus sonores. Schématisons figure 1.4 le dispositif utilisé lors de signaux visuel et auditif.

Les tests de travail conformes aux précédents peuvent se combiner dans une tâche où l'opérateur humain est renseigné par des informations visuelle et auditive. Cette dernière information peut être aussi donnée seule et correspond à un pistage auditif.

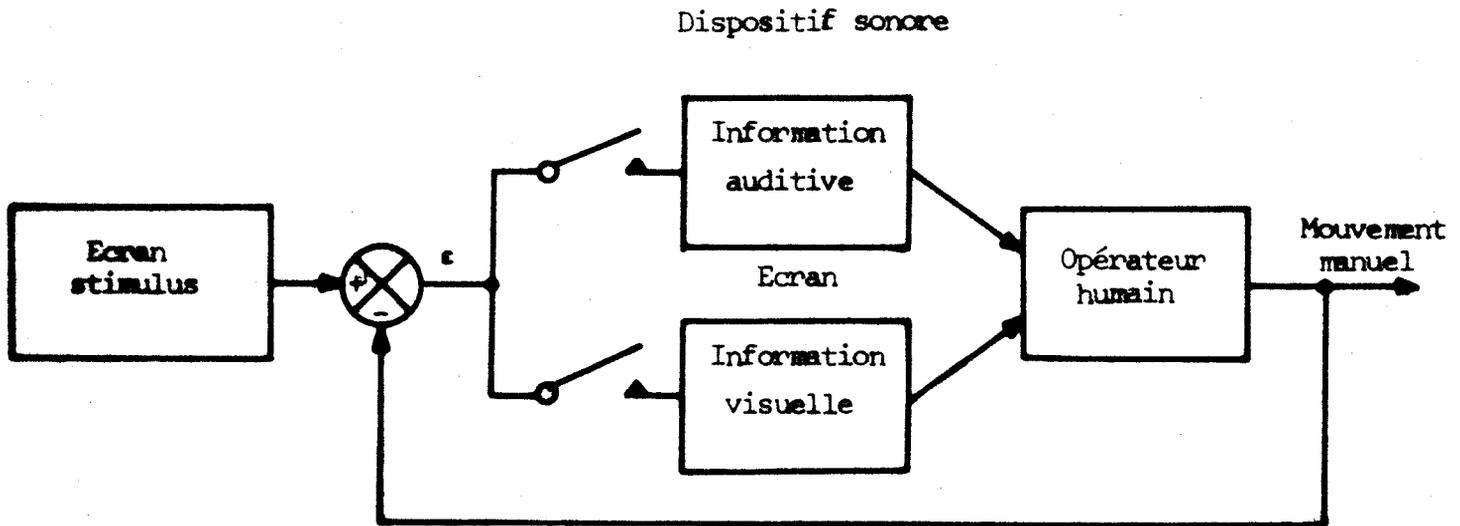


Figure 1.4 : Dispositif utilisé pour les tests de signaux visuel et auditif.

Dans le cas de la simultanéité des informations visuelle et auditive relatives à un stimulus d'entrée, l'oeil perçoit les déplacements des points objet et suiveur et l'oreille est en outre renseignée par un stimulus sonore dont l'intensité est par exemple, proportionnelle à l'erreur manuelle commise  $\epsilon$  ou n'existe que durant un intervalle de temps relativement court - inférieur ou égal au temps de latence manuel - correspondant à des impulsions sonores.

Quelques analyses expérimentales ont été effectuées lors d'un pistage manuel avec information auditive en compensation. L'oeil ne voit ni la cible ni son mouvement manuel et le sujet doit réaliser le pistage à l'aide d'une information auditive d'intensité sonore proportionnelle à l'amplitude de son erreur manuelle  $\epsilon$  (figure 1.4). Soulignons que la fréquence du stimulus sonore est de 1000 hertz lorsque l'erreur manuelle est positive, elle est de 800 hertz lorsque l'erreur est négative. Ceci a pour but d'alléger la difficulté du pistage, d'éviter l'influence de la fatigue et surtout de donner à l'opérateur le sens de la correction à apporter lors d'une erreur.

### I.1.2 - Fixation du regard et détection visuelle

La méthode d'enregistrement des mouvements oculaires /24/ présentée antérieurement permet l'étude du système visuel dans les tests de poursuite et de compensation. Par ailleurs il possède l'avantage de pouvoir analyser le système "oeil machine". Le principe de la mesure est décrit en détail dans les mémoires de LECLERCQ /25/ et de DHEDIN /26/. Soulignons que le dispositif de détection des mouvements de l'oeil est aussi envisagé vers des applications cliniques /27/ et permet d'enregistrer de très faibles mouvements (nystagmus) et des déplacements d'amplitude normale.

Précisons que la méthode utilise un verre de contact placé sur la cornée de l'opérateur. Sur la lentille cornéenne de 8,5 mm de diamètre est placée une source lumineuse (matière luminescente de 1 mm<sup>2</sup>) éclairée par une source de rayons ultra-violets. Un filtre sélectif, un système optique et un système de photo-multiplieurs sont chargés de transformer les déplacements de la source oculaire, solidaire de l'oeil par effet de ventouse, en variations électriques permettant l'enregistrement des mouvements de l'oeil selon leurs deux composantes  $X_0$  (horizontale) et  $Y_0$  (verticale) figure 1.2. L'appareil est performant pour les mouvements oculaires d'amplitude normale (buts cliniques) mais présente l'inconvénient d'exiger l'obscurité de la cabine et de ne permettre qu'un temps limité d'expérimentation voisin de 15 minutes au maximum (risque de détérioration de la cornée).

C'est pourquoi nous avons été amenés à utiliser la méthode d'enregistrement des potentiels biologiques produits par les muscles oculaires lors de leurs contractions pour les expériences d'assez longue durée exigeant le contrôle de la fixation du regard.

Les points de fixation du regard sont placés sur une circonférence (rayon un mètre) horizontale centrée sur les yeux de l'opérateur et sur deux bâtis rectangulaires verticaux. Le point de fixation est constitué par une petite ampoule électrique, un dispositif permet l'allumage et l'extinction d'une ampoule déterminée et les diverses directions du regard peuvent être définies à l'avance suivant un programme séquentiel établi. L'annexe A.1 complète les problèmes liés à la fixation visuelle et au positionnement de la direction du regard par rapport à celui de la tête.

Précisons qu'un dispositif /28/ est en cours d'achèvement permettant la localisation précise d'un stimulus en un point de la rétine quelle que soit la position de l'oeil dans une région déterminée.

Ce procédé permettra de s'affranchir des déviations du regard au cours d'une fixation d'un stimulus. Par ailleurs soulignons que DUPAS /29/ a proposé un système binoculaire de mesure permettant la détection simultanée des mouvements des deux yeux et un temps d'enregistrement de longue durée (aucun repère matériel sur l'oeil).

Ayant voulu conserver une homogénéité dans l'ensemble du dispositif de mesure, caractère à considérer avec importance dans toute mesure chez l'homme, nous nous sommes limités à utiliser les premiers dispositifs d'analyse pour l'enregistrement des mouvements oculaire et le contrôle de la direction du regard.

### I.1.3 - Dispositif manuel et réaction "motrice"

Diverses méthodes d'enregistrement des mouvements de la main ont déjà été proposées /21/, et nous nous limitons à ne présenter que les motifs de notre choix : système électro-mécanique basé sur le principe du levier d'un pilote d'avion, appelé souvent "manche à balai". Il est constitué figure 1.5 d'un levier par lequel la main transmet le mouvement  $M(t)$  et un système mécanique permettant la décomposition de  $M(t)$  suivant deux axes de coordonnées  $x(t)$  et  $y(t)$  tel que :

$$M(t) = \vec{i} x(t) + \vec{j} y(t) \quad ;$$

$\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ , vecteurs unités perpendiculaires

Les caractéristiques de ce transducteur électro-mécanique sont données en annexe A 1 et permettant d'écrire :

$$\begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \end{bmatrix} = \frac{1}{S} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \frac{E}{S\pi} \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix} = \frac{E}{S\pi R} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \end{bmatrix} = \frac{E}{S\pi r} \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix}$$

$r$  = rayon du curseur des potentiomètres (incorporés dans le système mécanique)

$C$  = déplacement du curseur

$R$  = longueur du levier (36 cm)

$\theta$  = angle de déviation du manche à balai par rapport à l'axe vertical correspondant à un mouvement manuel  $R\theta$

$E$  = tension d'alimentation des potentiomètres

$V$  = tension commandant le point suiveur sur l'écran

$\Delta$  = déplacement du point suiveur sur l'écran

$S$  = sensibilité des voies de l'oscilloscope  $S_x = S_y$

La linéarité du système, fonction de la direction du déplacement manuel  $M(t)$ , peut être supposée dans nos conditions expérimentales à 1,5 % près.

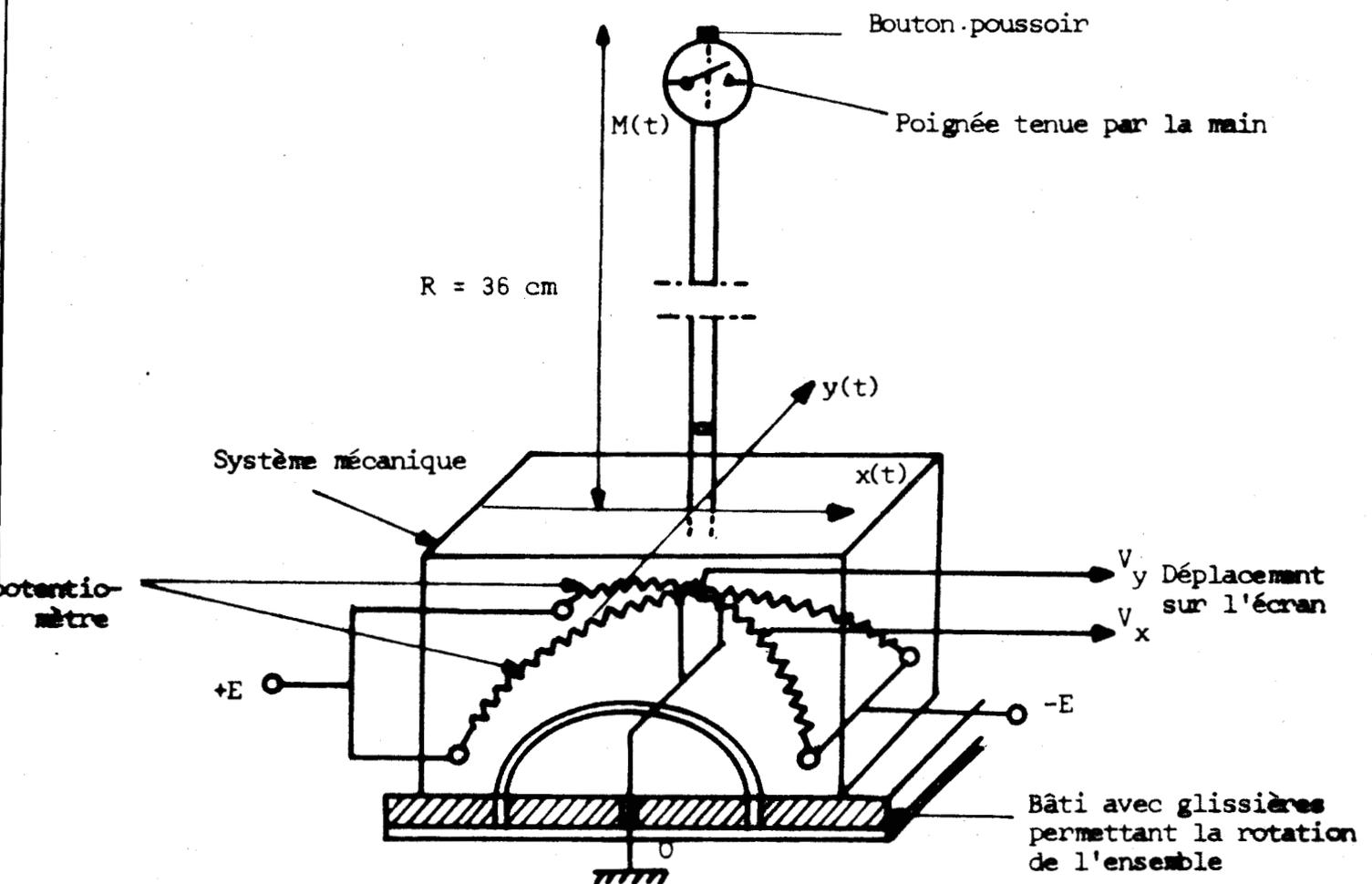


Figure 1.5 : Dispositif réalisé pour la détection des mouvements manuels.

Soulignons que JACQUESSON /30/ a incorporé dans ce dispositif un accéléromètre permettant de déceler les composantes initiales du déplacement manuel.

Ce transducteur utilisé figure 1.5 a été choisi pour les raisons suivantes :

- Souplesse de commande
- Commodité d'une étude pour différentes positions du levier
- Faible inertie, frottements et élasticité négligeables.
- Facilité de l'obtention de deux degrés de liberté et possibilité d'en ajouter d'autres - vertical, rotation (pistage de plusieurs cibles).
- Faible encombrement permettant la rotation de l'ensemble lors d'une modification du positionnement de l'opérateur et celui du regard vers la tâche principale (bâti avec glissières figure 1.5).
- Aisance d'incorporer au système de petits dispositifs tels que relais, repères, bouton-poussoir.

Cette dernière raison nous amène à préciser le dispositif utilisé lors d'une tâche de détection /31/ de stimulus visuels dans le champ latéral de vision de l'opérateur, celui-ci effectuant une tâche principale en vision frontale (cas e) figure 1.3).

Parmi les possibilités envisagées - mouvements du pied (pédale), des yeux, de la main gauche (pour un droitier), de la main motrice elle-même; réaction vocale électroencéphalogramme ... - nous avons opté pour une réaction manuelle (appui du pouce) de la main motrice elle-même pour les raisons suivantes : (figure 1.6)

- la différence de comportement entre les mains droite et gauche amenant des résultats non comparables
- la difficulté de comparaison entre les résultats déjà acquis concernant la main et un autre effecteur tel que le pied.
- la "perte" d'information visuelle par rapport à la tâche principale de travail si un mouvement de recherche visuelle du stimulus - tâche secondaire est demandé pour la mesure du temps de détection
- la perturbation de la position de la tête lors d'une réaction vocale, la tête étant maintenue (Annexe A 1)
- la modification (interaction) du mouvement manuel relatif à la tâche principale si un déplacement de la main est demandé à l'apparition du mobile à détecter.
- la difficulté de mesure par les méthodes relatives aux activités corticales /32/

Charge de travail principale

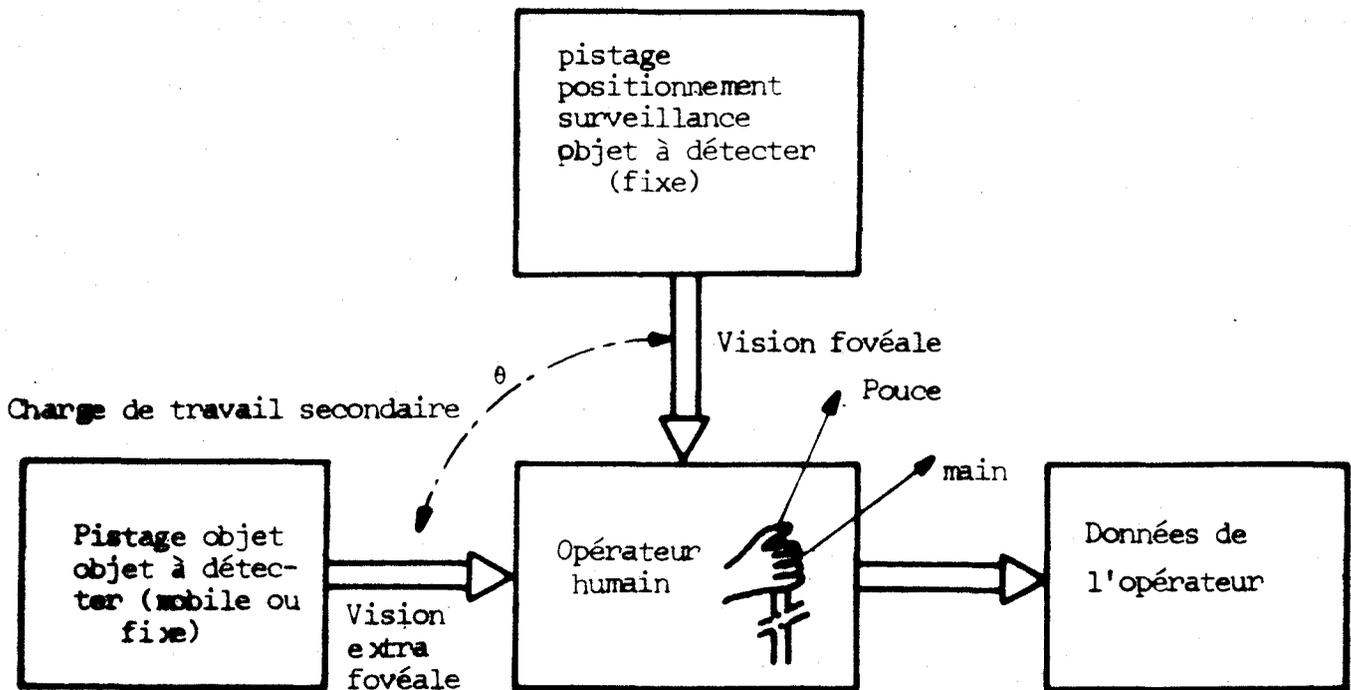


Figure 1.6: Protocole et dispositif utilisé lors de la détection stimulus+secondaire.

En conséquence, la valeur du temps de détection considérée dans cette étude est constituée par l'intervalle de temps séparant l'instant d'apparition de la cible-objet à un angle latéral donné et l'instant d'appui manuel de l'opérateur humain sur le bouton-poussoir (figure 1.5) de la poignée du manche à balai. Nous la différencions de la valeur du temps de réaction car elle sous-entend dans nos travaux la réaction manuelle d'un opérateur à un stimulus fixe en vision fovéale.

Cette solution permet avec une bonne approximation de comparer les résultats obtenus dans diverses recherches /33/ et de minimiser l'influence de cette réaction sur le comportement des systèmes visuel et manuel relatif à la tâche principale de travail.

En résumé, le sujet réalisant une tâche principale doit outre cette dernière appuyer sur le bouton-poussoir de la poignée du levier lors de l'apparition, dans le champ latéral de vision, d'un objet mobile ou fixe.

I.2 - La production des signaux-stimulus

La génération des signaux-stimulus est réalisée essentiellement à partir d'une calculatrice analogique produisant les fonctions nécessaires à l'expérience

et d'un enregistreur magnétique à huit pistes permettant l'obtention de signaux stimulus identiques pour tous les opérateurs afin d'effectuer ultérieurement une analyse statistique. Celui-ci est également utilisé pour l'enregistrement des réponses de l'opérateur et du modèle élaboré sur ordinateur.

Les signaux-stimulus utilisés pour la tâche secondaire de détection consistant à appuyer sur le bouton-poussoir lorsque l'opérateur perçoit le mobile  $x(t)$  animé d'une certaine vitesse  $V$  et les ampoules électriques de position fixe, doivent être précisés car ils peuvent caractériser le comportement du sujet. En effet, le mobile-objet  $x(t)$  est défini outre par sa position dans le champ latéral du sujet par sa vitesse  $V$ , son orientation dans le champ visuel - dirigée vers la périphérie du champ ou vers son centre -, sa luminosité et son contraste. Un dispositif simple (figure 1.7) simulé sur ordinateur analogique permet d'élaborer la loi du déplacement linéaire de  $x(t)$  avec des vitesses différentes en amplitude et en signe tout en modulant la luminosité et le contraste du mobile en envoyant des signaux appropriés à l'oscilloscope "détection".

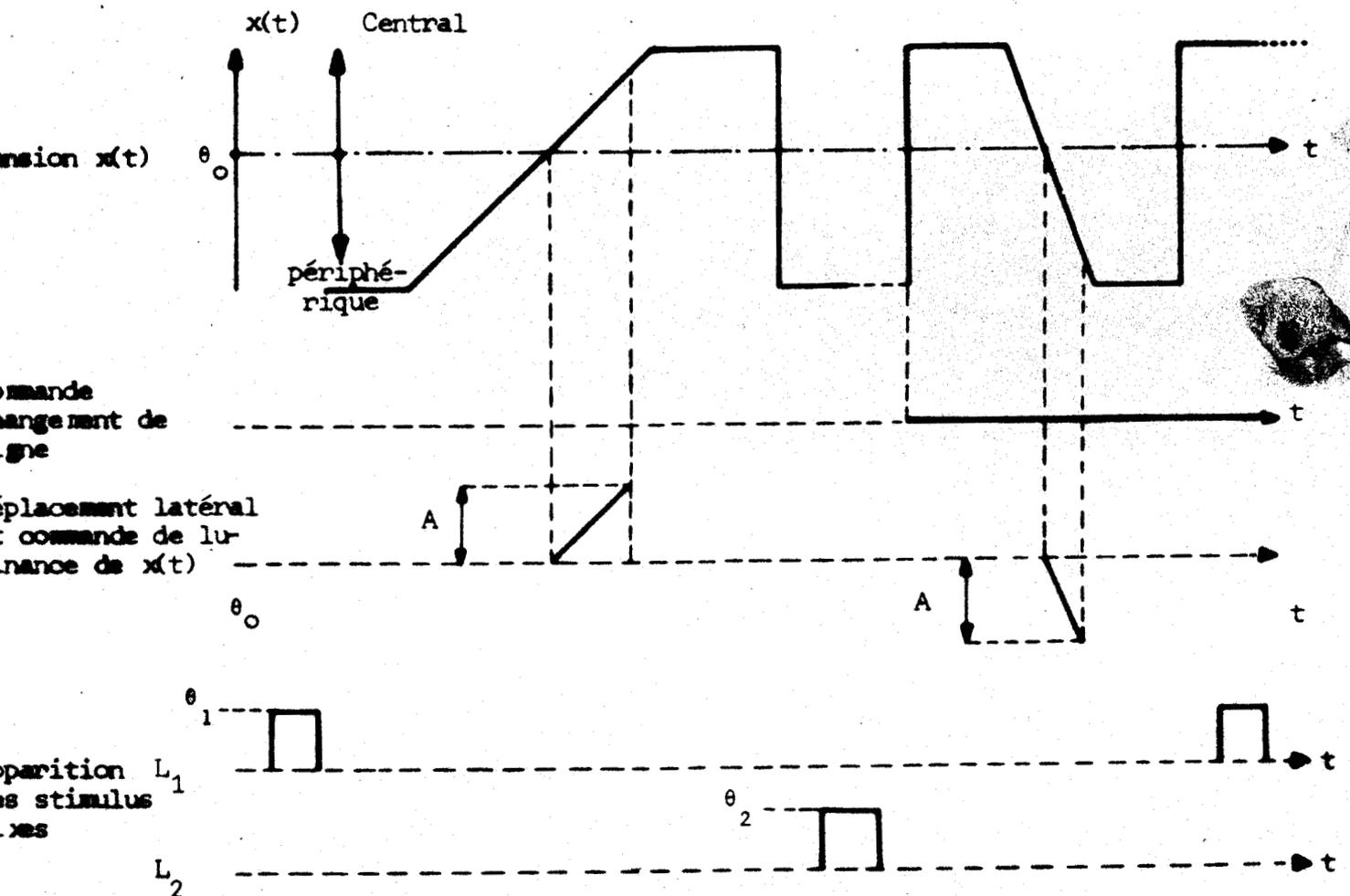


Figure 1.7 : Apparition des cibles à détecter (appui manuel - tâche secondaire)

Soulignons que l'amplitude  $A$  du déplacement latéral  $x(t)$  peut être rendue variable mais nous l'avons fixée à 5 cm quelle que soit l'orientation afin de mettre en évidence l'influence de la vitesse du mobile.

Compte tenu de l'importance de la séquence d'apparition du mobile  $x(t)$  et des stimulus fixes présentés afin d'éviter un comportement adaptatif /34/ du sujet relatif à la localisation du mobile à détecter, nous présentons en annexe A 1, la séquence d'apparition des cibles et l'intervalle de temps approximatif en seconde séparant deux pressions manuelles sur le bouton-poussoir.

Par convention :

$C^{\pm V}$  indique : mobile  $x(t)$  animé d'une vitesse  $\pm V$  cm/sec

signe + : déplacement de  $x(t)$  vers le centre (c) du champ visuel

signe - : déplacement de  $x(t)$  vers la périphérie (p) du champ visuel

chiffre 1 et 2 : allumage des lampes  $L_1$  et  $L_2$

La séquence d'apparition des cibles ainsi que le temps de présentation des stimulus fixes sont pseudo-aléatoires. Dans la majorité de nos expériences précisons que  $L_1$  est situé dans l'axe du regard dans le but d'analyser le temps de réaction durant un travail de l'opérateur en vision fovéale et que  $L_2$  est situé dans le champ latéral opposé à celui du mobile à  $40^\circ$  par rapport à l'axe du regard dans la majorité des cas. Ces données peuvent être modifiées, mais elles seront précisées au cours de l'analyse expérimentale.  $L_1$  et  $L_2$  ne sont présentés que pendant l'intervalle de temps séparant deux apparitions de la cible mobile (figure 1.7).

Le paragraphe suivant, lié à celui-ci, illustre le dispositif d'enregistrement des données de l'opérateur et la synchronisation de celles-ci avec les signaux stimulus, en particulier avec celui du mobile à détecter dans le champ latéral de vision.

### I.3 - Les systèmes d'enregistrement des données et de contrôle expérimental

L'ensemble du système de mesure est représenté figure 1.8 où nous remarquons l'enregistreur magnétique "signaux-stimulus" précédent, le recueil des données analogique et numérique de l'opérateur et les instruments de contrôle expérimental.

### I.3.1 - Enregistrement des données

L'état de l'opérateur est analysé à partir des enregistrements suivants :

- les signaux-stimulus représentatifs des composantes du déplacement, X horizontal, Y vertical de la tâche principale de travail en vision frontale.
- les signaux-stimulus représentatifs des composantes du déplacement de la tâche secondaire de travail en vision extra-fovéale.
- les signaux-stimulus logiques représentatifs de l'allumage et de l'extinction des ampoules électriques fixes en vision frontale ou latérale
- le signal de synchronisation des mesures du temps de détection aux cibles (vision frontale ou périphérique) utilisé pour des raisons techniques du compteur et de l'imprimante.
- les réponses du système visuel - les deux composantes du mouvement -
- les réponses du système manuel - les deux composantes du déplacement -
- les valeurs analogique et numérique du temps de détection des cibles en vision frontale et périphérique.

Il est bien entendu qu'avec le matériel dont nous disposons nous avons été amenés à sélectionner certains de ces signaux ou à superposer sur la même piste d'enregistrement plusieurs informations lors d'une expérience donnée ne demandant pas la totalité de ces réponses. L'analyse corrélative des systèmes visuel et manuel, en vision frontale, n'utilise que deux fois trois pistes - l'entrée, l'oeil et la main.

A chaque protocole expérimental nous essayons de caractériser au maximum le comportement de l'opérateur humain à l'aide :

- des pistes éventuellement non utilisées pour les signaux-stimulus de l'enregistreur magnétique (huit pistes).
- d'un enregistrement sur papier de huit pistes
- du calculateur analogique
- de l'imprimante et du compteur "temps de détection"
- d'un calculateur numérique pour le traitement des signaux
- d'un calculateur hybride pour la simulation du modèle représentatif de l'opérateur.

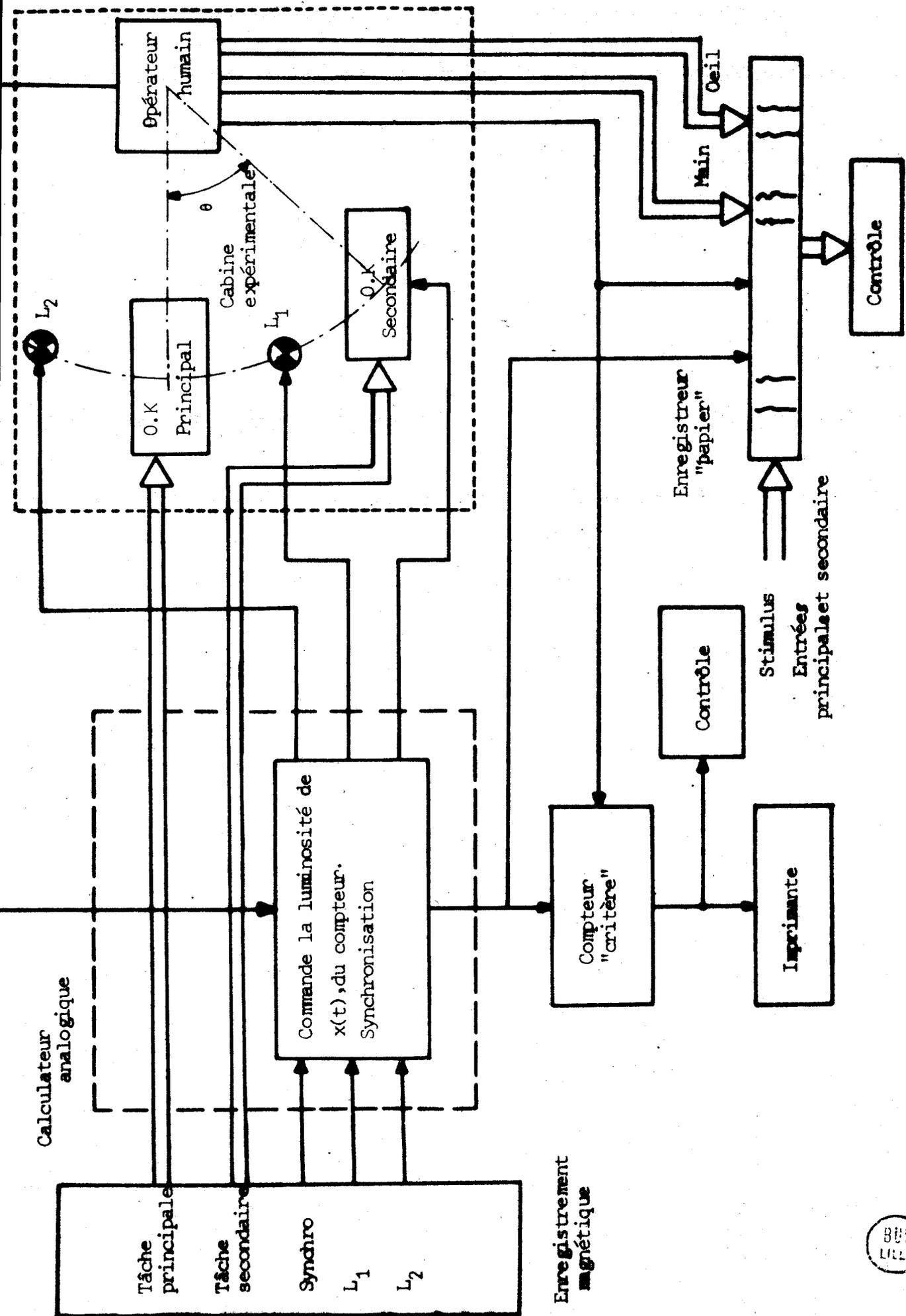


Figure 1.8 - Ensemble du dispositif de mesure



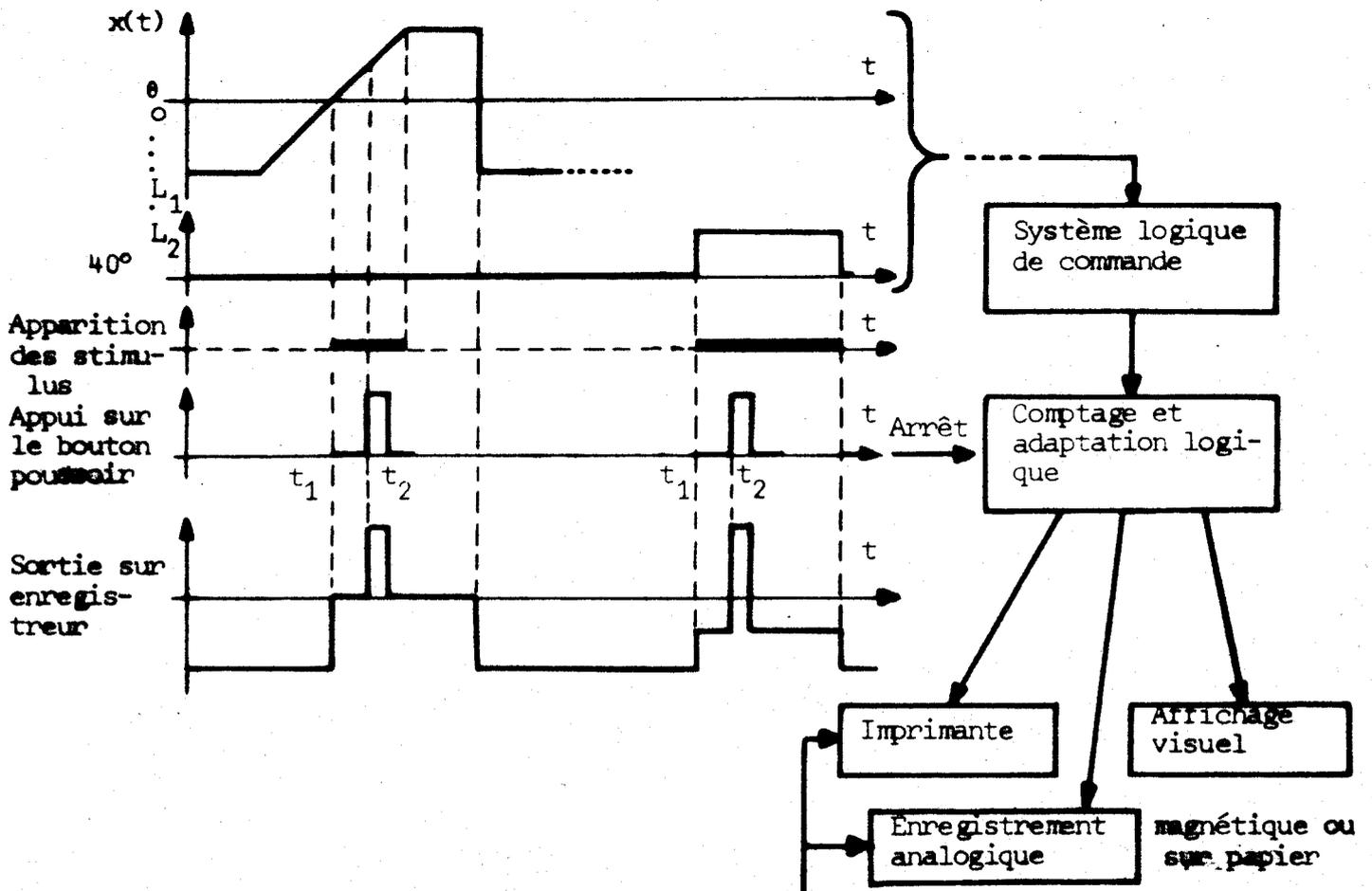
et de contrôler l'"état" du sujet pour la validité des mesures, principalement par :

- un affichage visuel de la valeur du temps de détection
- un ou plusieurs oscilloscopes de contrôle des apparitions des cibles, de la luminosité ...

Nous précisons au paragraphe suivant la mesure du temps de détection.

### I.3.2 - Mesure du temps de détection

La mesure du temps de détection est réalisée à l'aide d'un compteur binaire contenant une horloge de fréquence 1000 Hertz et pouvant compter jusqu'à 10 secondes. Le départ du comptage est commandé automatiquement à partir du calculateur analogique lorsqu'une cible apparaît dans le champ visuel. L'arrêt est actionné par l'appui manuel sur le bouton-poussoir situé sur la poignée du manche à balai. Un système logique simulé sur le calculateur permet les différentes mesures du temps de détection (figure 1.9).



Identification  
du test et du sujet

Figure 1.9 : Mesure automatique du temps de détection de l'opérateur

$$t_2 - t_1 = T_D = \text{temps de détection}$$

Nous devons préciser maintenant une difficulté importante qui sera reprise par la suite, relative au non-appui manuel sur le bouton-poussoir quand une cible apparaît. En effet la présentation d'une cible-objet dans le champ visuel ne provoque pas systématiquement la réaction manuelle demandée /35/. Comme l'apparition des stimulus est pseudo-aléatoire, nous sommes amenés à choisir un critère permettant l'identification des "non-appuis" manuels lors de l'analyse des résultats. Des essais préliminaires et compte tenu de notre domaine de mesure, nous ont permis de limiter le temps de détection à 1,5 seconde. En conséquence, si le temps  $t_2 - t_1$  (figure 1.9) devient égal (ou supérieur) à 1,5 seconde, l'adaptation logique commande l'imprimante qui enregistre le chiffre 1,500. Comme nous le verrons dans l'analyse des résultats, ce critère néanmoins arbitraire nous a permis d'identifier quelques aspects de non-détection possible avec l'aide de l'expérimentateur.

Par ailleurs une remarque importante doit être signalée relative au léger bruit sonore de l'imprimante enregistrant le résultat lors d'un appui manuel correspondant à une détection. En effet, ce bruit peut être entendu par l'opérateur dans la cabine. Celui-ci sait alors que son résultat a été réellement enregistré et ce signal extérieur lui indique qu'il manipule correctement. La "boucle" détection est en quelque sorte "fermée" (figure 1.10).

Au lieu d'éliminer ce bruit pouvant être à priori un inconvénient, nous l'avons conservé pour les raisons suivantes :

- identification des "défauts technologiques" éventuels de la transmission de l'information. L'opérateur sait que le bruit est conséquent à son appui manuel et si celui-ci ne s'effectue que très légèrement (cas rares en réalité) le "contact" reste ouvert et l'imprimante n'affiche pas de résultat.
- signalisation à l'opérateur qu'une cible est apparue si celui-ci n'a pas détecté le stimulus.
- sécurité du comportement du sujet vis à vis de la tâche secondaire. Il peut savoir en effet s'il manipule correctement.
- avantage d'informer l'opérateur qui peut dans un cas "anormal" expliquer sa réaction.

Cette dernière possibilité sera exploitée lors de l'analyse expérimentale et de la simulation des phénomènes sur ordinateur.

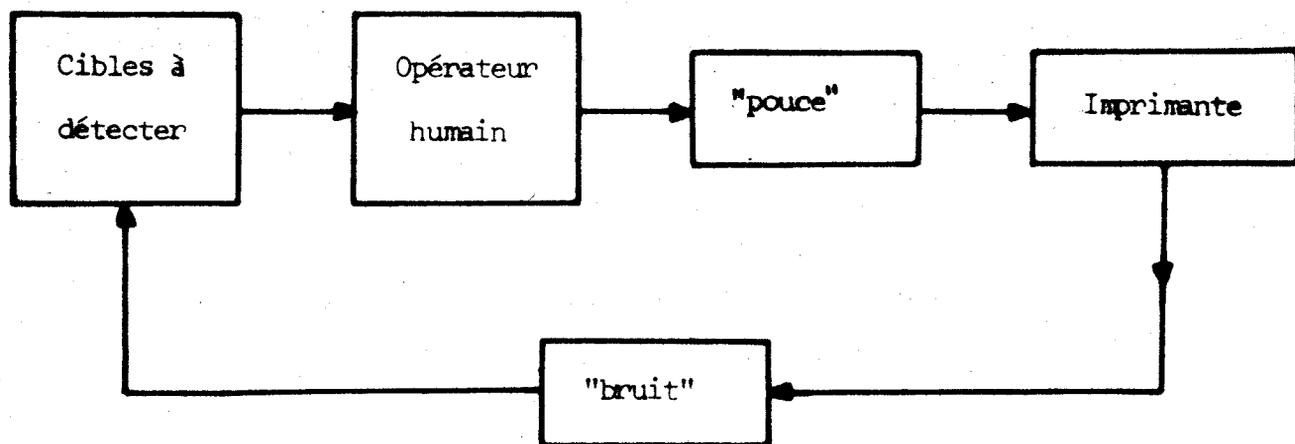


Figure 1.10 : Mesure du temps de détection : le sujet sachant que son résultat est enregistré par l'imprimante.

#### I.4 - Le protocole d'expérience réalisée par l'opérateur humain

L'analyse expérimentale des chapitres suivants expose les faits significatifs caractérisant le comportement de l'opérateur humain à des stimulus visuels situés en vision frontale et périphérique et dans certains cas, associés à des stimulus auditifs. On comprend que le protocole expérimental est différent pour l'une ou l'autre expérience, les buts recherchés étant différents. Dans cet esprit nous présentons dans ce qui suit les principaux protocoles expérimentaux proposés aux opérateurs, les cas particuliers étant précisés lors de l'analyse expérimentale.

##### I.4.1 - Protocole expérimental de l'analyse du système œil-main en vision frontale

Selon notre technologie le travail est ici principal étant donné que les informations présentées se localisent en vision fovéale entraînant une réception "optimale" de celles-ci. Les stimulus utilisés sont de nature visuelle, auditive ou une combinaison de celles-ci.

Les sujets ont été soumis aux tests suivants :

- mesure des rayons de courbure de la cornée afin de déterminer le verre de contact à utiliser
- mesure du temps de réaction manuel en présentant au sujet une petite ampoule électrique à éteindre le plus rapidement possible à l'aide d'un bouton-poussoir tenu dans la main droite. Le temps indiqué dans nos résultats est constitué par la valeur moyenne de vingt essais successifs. Le même appareil est utilisé pour la mesure du temps de réaction manuel à un stimulus auditif /36/.

- insensibilisation de l'oeil à l'aide de quelques gouttes d'un anesthésique de contact.
- un temps d'accoutumance à l'expérience afin de préciser le travail demandé, d'éviter des effets de surprise et d'adapter l'opérateur à l'obscurité de la cabine.
- pose de l'écarteur de paupière, du verre de contact sur la cornée, réglages des capteurs et positionnement de l'opérateur utilisant le support de la tête mobile dans les trois directions de l'espace.
- présentation des signaux ; le temps d'expérimentation est de l'ordre de 10 minutes, (éventuellement 15 minutes), afin d'éviter une fatigue et une détérioration éventuelle de la cornée.
- fin de l'expérience ; dépose de l'écarteur de paupière et du verre de contact, instillation d'un collyre aseptisant destiné à prévenir tout risque d'infection de l'oeil.

#### Population étudiée

Stimulus visuels : L'étude est basée sur une analyse de 60 sujets sains - 20 féminins, 40 masculins - moyenne d'âge 26 ans.

Stimulus auditifs : Etude basée sur 15 sujets masculins de moyenne d'âge 25 ans.

#### Caractérisation des stimulus

Tout en tenant compte des remarques générales présentées à la fin du chapitre (§ 1.4.4) ces expériences ont pour but une caractérisation "dynamique" du comportement de l'opérateur humain. Les luminosités du point objet (vert) et du point suiveur (bleu) sont réglées à la demande du sujet lors de son positionnement dans la cabine obscure, afin de le mettre dans l'état le plus favorable possible. Précisons néanmoins que les valeurs de luminances sont voisines de un candela/mètre carré. De même, lors des essais préliminaires avec des stimulus auditifs, nous procédons au réglage de l'intensité sonore maximum correspondant par exemple à l'erreur commise pendant le temps de latence à un stimulus échelon de position. Ces précautions évitent des facteurs de gêne et de fatigue.

Les déplacements des stimulus sont engendrés à partir de signaux en échelons de position et de vitesse, en sinusoïdes, aléatoires en amplitude et dans le temps, et répartis géométriquement suivant des trajectoires verticales, horizontales, obliques ou aléatoires. Rappelons que le travail demandé est constitué par la coïncidence des points objet et suiveur.

#### I.4.2 - Protocole expérimental de l'analyse d'une poursuite en vision extra-fovéale (Figure 1.3 - cas c et d)

Le protocole ne diffère pas du précédent, mais il est particularisé dans le cas c figure 1.3 par :

- une tâche principale de surveillance d'une lampe allumée afin de fixer la direction du regard.
- une tâche secondaire de pistage manuel, le travail demandé est encore une coïncidence des points objet et suiveur, mais en vision extra-fovéale.

La complexité de cette analyse ne nous a pas permis d'explorer d'une manière systématique tous les phénomènes de la vision mis en jeu lors de ce test et un "compromis expérimental" a été choisi. Nous ne présentons dans cette étude que l'analyse du comportement de l'opérateur lorsque le centre de la région des déplacements des points objet et suiveur et le repère lumineux en vision frontale se trouvent dans le plan horizontal passant par les yeux du sujet. Par ailleurs bien que l'angle latéral  $\theta$  séparant les deux directions du repère lumineux et de la cible puisse être rendu variable, nous ne retiendrons dans cet exposé que les expériences où l'angle  $\theta$  est voisin de 35 à 45°.

En effet, comme on peut le penser, ce test exige une grande coopération de la part de l'opérateur et entraîne des comportements différents selon les individus.

#### Population étudiée

L'étude est basée sur une analyse de 20 sujets sains, masculins, de moyenne d'âge 25 ans.

#### Caractérisation des stimulus

Tout en tenant compte des remarques générales du paragraphe I.4.4, ces expériences ont encore pour but une caractérisation "dynamique" du comportement de l'opérateur humain. Les luminosités du repère lumineux (rouge), du point objet (vert) et du point suiveur (bleu) sont réglées à la demande du sujet pour les mêmes raisons précédentes.

Les déplacements utilisés sont engendrés à partir de signaux en échelons de position et de vitesse aléatoires en amplitude et dans le temps répartis géométriquement suivant l'axe vertical uniquement afin de ne pas modifier l'angle  $\theta$  séparant les deux directions des tâches principale et secondaire.

Le protocole expérimental - cas d figure 1.3 - correspondant à la poursuite visuelle et manuelle de deux cibles-objets est identique à celui du paragraphe I.4.1, mais chacune des cibles n'a qu'une seule composante, soit verticale, soit horizontale. Les résultats relatifs à ces expériences sont extrêmement intéressants du point de vue "fonctionnel" mais très difficiles à exploiter du point de vue "modèle". Néanmoins ils révéleront le comportement adaptatif de l'opérateur humain lors d'une tâche "compliquée".

I.4.3 - Protocole expérimental de l'analyse du champ de détection en vision latérale lors d'un travail situé en vision frontale :  
(cas e - figure 1.3)

Le protocole expérimental découle des précédents, mais en diffère par les points suivants :

- le but recherché consiste en l'analyse paramétrique de la détection visuelle latérale faisant intervenir non seulement la charge de travail principal en vision frontale (§ I.4.1) mais aussi la luminosité et le contraste, la vitesse de déplacement du mobile et l'angle latéral d'apparition relatifs à la charge de travail secondaire.
- le temps d'expérimentation est de 30 minutes. En conséquence, l'appareil de mesure des mouvements oculaires précédent ne peut plus être utilisé et nous avons eu recours à la méthode de l'enregistrement des potentiels biologiques produits par les muscles lors de leur mouvement. De plus l'éclairement de l'oeil par la source fausserait nos différentes mesures étant donné que nous intégrons le paramètre luminosité. Toutefois, étant donné que la méthode par verre de contact est beaucoup plus précise nous l'avons utilisée en temps différé : les mêmes sujets ont été soumis à des expériences n'ayant pour but que le contrôle de la validité de l'angle latéral  $\theta$  séparant les deux tâches dans le champ visuel (maintien du regard).
- le temps d'adaptation à l'obscurité de la cabine est au minimum 15 minutes.

Population étudiée

L'étude n'a été effectuée que sur 5 sujets sains masculins - 20, 21, 26, 27, 29 ans - étant donné la nécessité de réaliser un grand nombre d'expériences sur un même sujet. Chaque opérateur a été sollicité à effectuer un nombre voisin de 30 expériences correspondant à plus de 6.000 mesures. Cette étude est donc basée sur plus de 30.000 appuis manuels.

### Caractérisation des stimulus

- . tâche principale : Surveillance d'une lampe allumée, positionnement manuel entre deux repères distants de 8 mm, **poursuite** d'une cible-objet ayant un déplacement vertical composé d'échelons de position, de sinusoides d'amplitude 5 cm sur l'écran et de période 20 secondes.
- . Tâche secondaire : Détection par l'intermédiaire de l'appui-manuel de plusieurs cibles-objets immobiles et d'un objet mobile de déplacement horizontal 5 cm sur l'écran, dirigé vers la périphérie du champ visuel ou vers son centre, de vitesse variable 1 à 100 cm/sec, de luminosité variable 0,18 à 3,5 cd/m<sup>2</sup> et d'angle d'apparition 20 à 95°. La séquence d'apparition est aléatoire et a été précisée antérieurement.

#### I.4.4 - Remarques générales sur le choix, la succession et la durée des stimulus

L'objet principal de notre recherche consiste en l'élaboration d'un modèle d'opérateur humain considéré dans les tâches présentées. Afin d'effectuer cette identification nous avons choisi des stimulus de forme simple - échelons de position et de vitesse, sinusoides - car facilement exploitables.

En ce qui concerne la durée et la répétition de chaque stimulus nous étions devant le compromis suivant :

- réaliser un nombre de tests suffisants pour s'assurer que le comportement de l'opérateur n'est plus en régime "transitoire" (nous verrons que dans le "pistage extra-fovéal" ce nombre peut être important)
- éviter quand il ne fait pas l'objet de l'expérience l'effet de mémoire de l'opérateur.

Nous verrons que ce compromis doit être ajusté à chaque protocole expérimental, mais signalons que l'effet adaptatif apparaît très vite (3 ou 4 stimulus identiques) lors du protocole I.4.1 (vision frontale) et très lentement (10 stimulus et plus) lors du protocole I.4.2 (vision extra-fovéale).

### CONCLUSION

Nous venons de présenter dans ce premier chapitre la cabine expérimentale de l'opérateur, l'élaboration des signaux-stimulus et leurs caractéristiques, les systèmes d'enregistrement des données et de contrôle expérimental, ainsi que les divers protocoles expérimentaux permettant de mettre en évidence le comportement de l'opérateur dans ses activités.

Retenons que la tâche essentielle du régulateur humain consiste en une poursuite d'un objet situé soit en vision frontale soit en vision périphérique et que l'analyse du champ de détection visuelle fait intervenir la charge principale de travail en vision frontale, la luminosité et le contraste du mobile-objet, sa vitesse, ainsi que son angle latéral d'apparition dans le plan horizontal passant par les yeux du sujet. L'objectif essentiel de ce dispositif de mesure est l'exploration fonctionnelle du système humain dans son champ visuel.

Il est évident que l'appareillage présenté nous limite dans nos différentes expérimentations et qu'un dispositif de calcul en temps réel (liaison par voie hertzienne par exemple entre les centres d'expérimentation et de calcul) aurait permis une plus ample exploration des paramètres et par là une intervention directe sur l'opérateur humain effectuant un travail.

Etant donné que l'étude du champ visuel de détection et de ses caractéristiques peut être considérée en quelque sorte comme les conditions initiales des réponses dynamiques de l'homme, le chapitre suivant expose ces premiers résultats et les difficultés d'expérimentation rencontrées.

Chapitre II

*ANALYSE du CHAMP de DETECTION VISUELLE lors d'un  
COMPORTEMENT DYNAMIQUE de l'HOMME*

Le procédé de détection d'un objet en mouvement dans le champ visuel de l'opérateur humain (envisagé ici comme la première "séquence" du processus global de reconnaissance d'une image) fait intervenir un grand nombre de paramètres dont certains sont analysés dans ce chapitre.

II.1 - Méthode d'analyse des résultats

Le nombre important de paramètres à explorer ne nous permet pas si l'on désire avoir un compromis entre la fatigue de l'opérateur en expérimentation et le domaine d'exploration des paramètres, d'effectuer une grande série de mesures sur un sujet. De plus le nombre limité d'opérateurs n'autorise pas l'application des méthodes statistiques classiques étant donné qu'un même phénomène physiologique peut être différent selon les individus, (un même travail peut entraîner des différences considérables selon l'aptitude de l'opérateur).

Dans ces conditions, nous avons été amenés à rechercher un maximum de probabilité de "bonnes mesures" représentatives du phénomène tout en minimisant le nombre de celles-ci. La méthode consiste à attribuer le maximum de probabilité aux valeurs groupées  $T_i$  des mesures du temps de détection  $T_D$  en tenant compte de certains critères physiologiques.

$$T_D = \sum_{i=1}^n T_i P_i(T_i) \quad (1)$$

$P_i(T_i)$  : probabilité fonction de la distance entre deux  $T_i$  voisins.

Si les  $T_i$  forment deux groupes séparés nous les considérons isolément et la courbe (exemple figure 2.1) est tracée selon des critères physiologiques définissant l'allure probable du phénomène. Il convient en effet de ne pas oublier que les expériences sur l'homme sont difficiles, sujettes à la compréhension de l'opérateur... et qu'un compromis entre des élucubrations fantaisistes et

l'application des théories des statistiques est nécessaire afin de cerner le problème avec quelque chance de résultat.

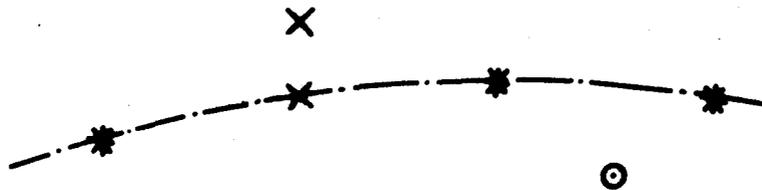


Figure 2.1 : Tracé probable reliant les points de mesure

\* : point considéré bon (valeurs groupées)

X : point formant deux groupes séparés

⊙ : point considéré comme mauvais (valeurs dispersées)

## II.2 - Analyse du champ visuel de détection en fonction de l'angle d'apparition du mobile

L'observation des enregistrements met en évidence la dispersion des mesures obligeant à séparer les cinq sujets en deux groupes A (3 sujets) et B (2 sujets), l'enregistrement de la figure 2.2 est représentatif d'un opérateur du groupe A. Le groupe B d'âge plus jeune présente une aptitude à déceler la cible : le temps de détection  $T_D$  est plus faible. La variation de  $T_D$  en fonction de l'angle initial d'apparition du mobile  $x(t)$  (figure 2.3) indique que les modifications de  $T_D$  deviennent importantes aux angles  $\theta$  élevés à partir d'environ  $70^\circ$ . L'expression analytique de  $T_D$  en fonction de l'excentricité de l'image - stimulus par rapport à la position de la fovéa /37/ - peut être formulée de diverses manières selon les objectifs que l'on veut y voir apparaître. Notre choix a été orienté dans le but de :

- garder une symétrie du champ visuel par rapport à l'axe du regard
- simuler les limites du champ de vision
- obtenir dans l'expression  $T_D = f(\theta)$  une fonction  $K_1(\theta)$  image dans une certaine mesure de la décroissance de la densité des récepteurs rétiniens en fonction de l'angle  $\theta$
- rendre variable une quantité  $K_2(\theta)$  afin d'interpréter d'une part les phénomènes de diffraction dans l'oeil pour les angles  $\theta$  élevés, d'autre part les propriétés reliant l'"attention" de l'opérateur à sa tâche principale.

Angle latéral du mobile  $\theta = 20^\circ$   
 Vitesse  $V$  du déplacement = 50 cm/sec  
 sens : central - amplitude : 5cm  
 luminosité  $L = 0,18 \text{ cd/m}^2$   
 de la cible

Cible principale  
 Cible fovéale

Déplacement sinusoïdal  
 Amplitude 5cm  
 période : 20 secondes

BECKMAN INSTRUMENTS INC., SCHILLER PARK, ILL.

1 seconde

Cible secondaire  $x(t)$

Tâche principale  $y(t)$

$\theta = 0^\circ$

Réponse principale  $y(t)$

1  
5  
1

Beckman

$P(t)$  réponse secondaire

(mobile  $x(t)$  et lampes  $L_1, L_2$ )

Tâche secondaire  $x(t)$

$\theta = 20^\circ$

opérateur du mobile

opérateur du mobile

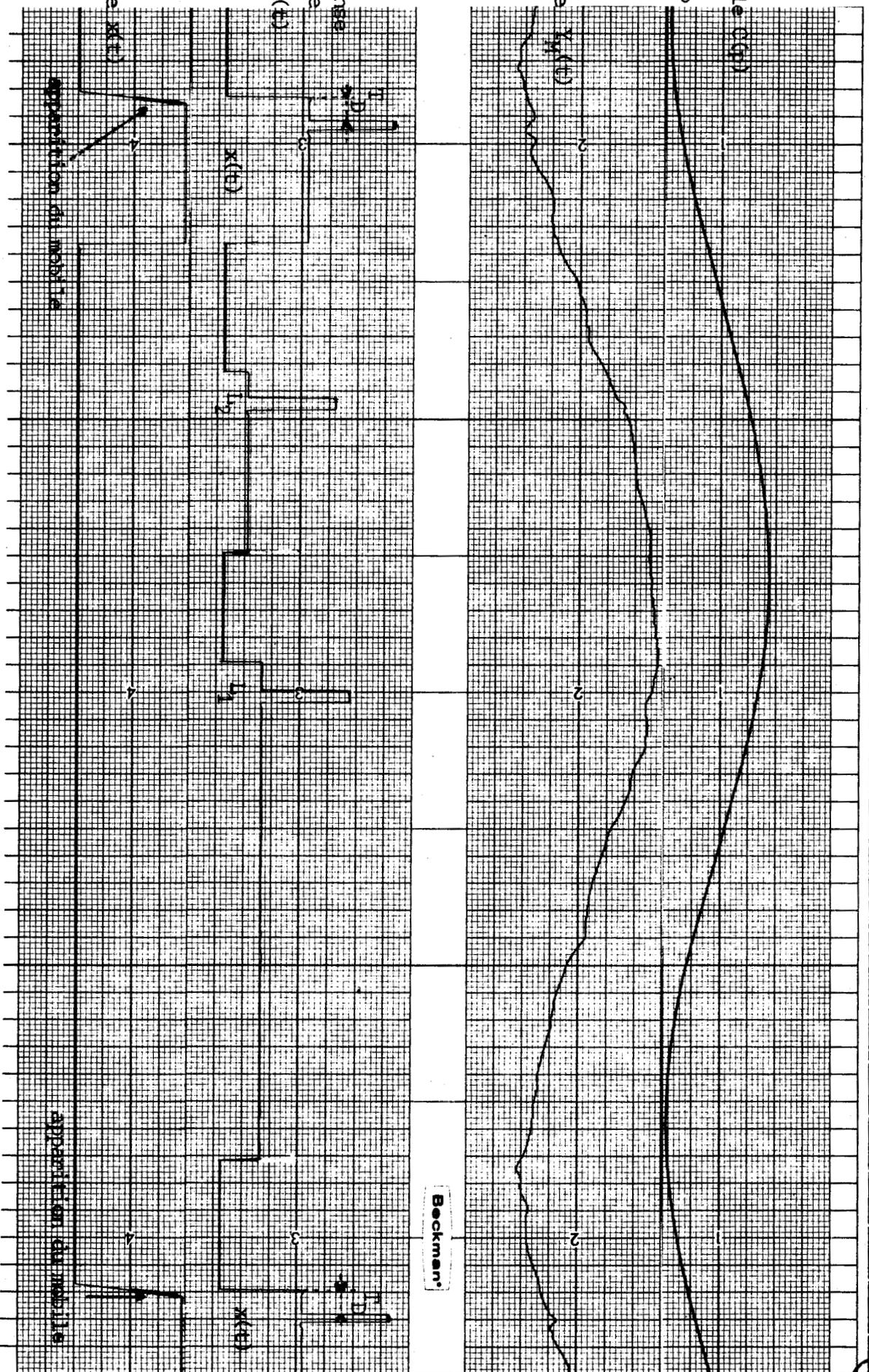


Figure 2.2 : Enregistrement des réponses principale  $Y(t)$  et secondaire  $P(t)$  de l'opérateur humain (sujet du groupe A)

En conclusion, l'expression choisie du temps de détection en fonction du domaine d'angle exploré ( $20^\circ$ ,  $95^\circ$ ) est supposée de la forme :

$$T_D = \frac{K_1(\theta)}{K_2^2(\theta) - \theta^2} ; T_D > 0 \text{ et } |\theta| < K_2$$

Nous verrons que  $K_1$  est aussi fonction de la luminosité et de la vitesse du point, et  $K_2$  des limites du champ visuel, ceci sera repris lors de l'identification du modèle de l'opérateur.

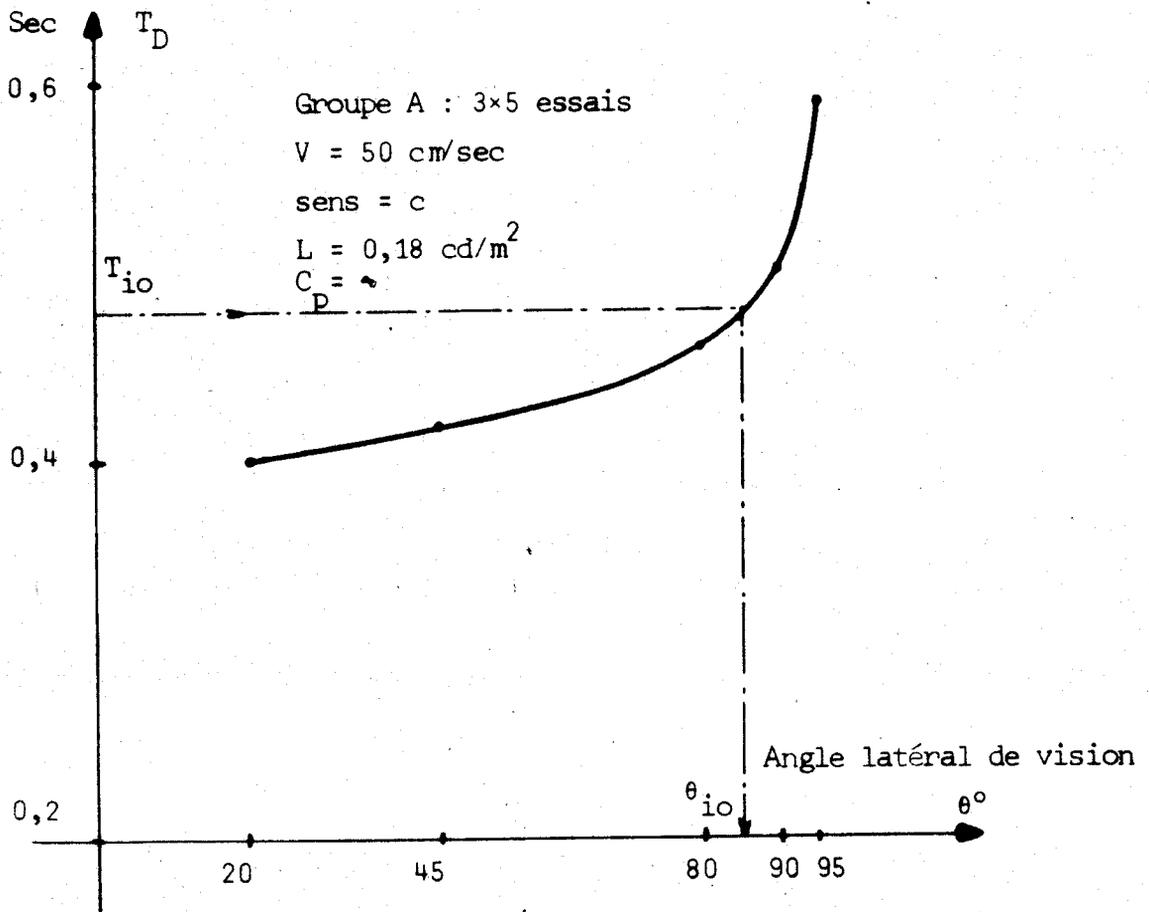


Figure 2.3 : Temps de détection du mobile  $x(t)$  en fonction de l'angle de vision. Mobile  $x(t)$  : V = 50 cm/sec, sens = c (central), L = 0,18 cd/m<sup>2</sup> C(p) = ~ ; sujets du groupe A : 3 x 5 essais.

### II.3 - Etude de l'influence de la vitesse et de l'orientation du mobile dans dans le champ visuel

L'étude de l'influence de ces deux paramètres est illustrée figures 2.4 et 2.5, où nous présentons différents résultats selon la valeur de l'angle latéral  $\theta$ . L'annexe A.2 complète cette analyse en présentant quelques tracés de réponses significatives. On note figure 2.4 pour  $V = 80$  cm/sec, déplacement du mobile dirigé vers le centre du champ visuel, une probabilité de non-appui de  $4/15^{\text{ème}}$  à  $\theta = 90^\circ$  et aucune mesure à  $\theta = 95^\circ$ . Ce résultat d'analyse ne doit pas être interprété généralement car il est fonction des individus et surtout de la charge de travail  $C_p$ . (Nb de non-appuis : chiffre noté sur le point de mesure)

L'interprétation du réseau de courbes (figure 2.4) peut être basée sur une analyse de la structure histologique de la rétine /38/ et permet de suggérer les remarques suivantes : (sous réserve de nos conditions expérimentales)

- la décroissance de  $T_D$  en fonction de  $V$  de 1 à environ 20 cm/sec peut interpréter le phénomène de sommation temporelle ; le nombre de récepteurs stimulés en fonction de la vitesse augmente par unité de temps et amène une réponse  $T_D$  plus rapide. Ce phénomène est davantage illustré pour les grands angles latéraux, ce qui peut être expliqué par une diminution de la densité des cellules rétiniennes.
- la croissance de  $T_D$  (à partir de son minimum correspondant à un  $\theta$  donné) peut représenter le rôle de la sommation spatiale. En effet, la sommation précédente s'effectue en un temps de plus en plus court en fonction de la vitesse et entraîne un nombre de stimulations de récepteurs plus grand pour une réaction de l'opérateur. Ce phénomène n'est pas décelé pour de petits angles latéraux mais apparaît dans les régions éloignées de la fovéa où la densité des cellules réceptrices de lumière est plus petite.

Ces aspects intéressants ne sont pas exploitables directement car il aurait fallu moduler l'amplitude du déplacement du mobile, la fréquence de réapparition de celui-ci (annexe A.2).

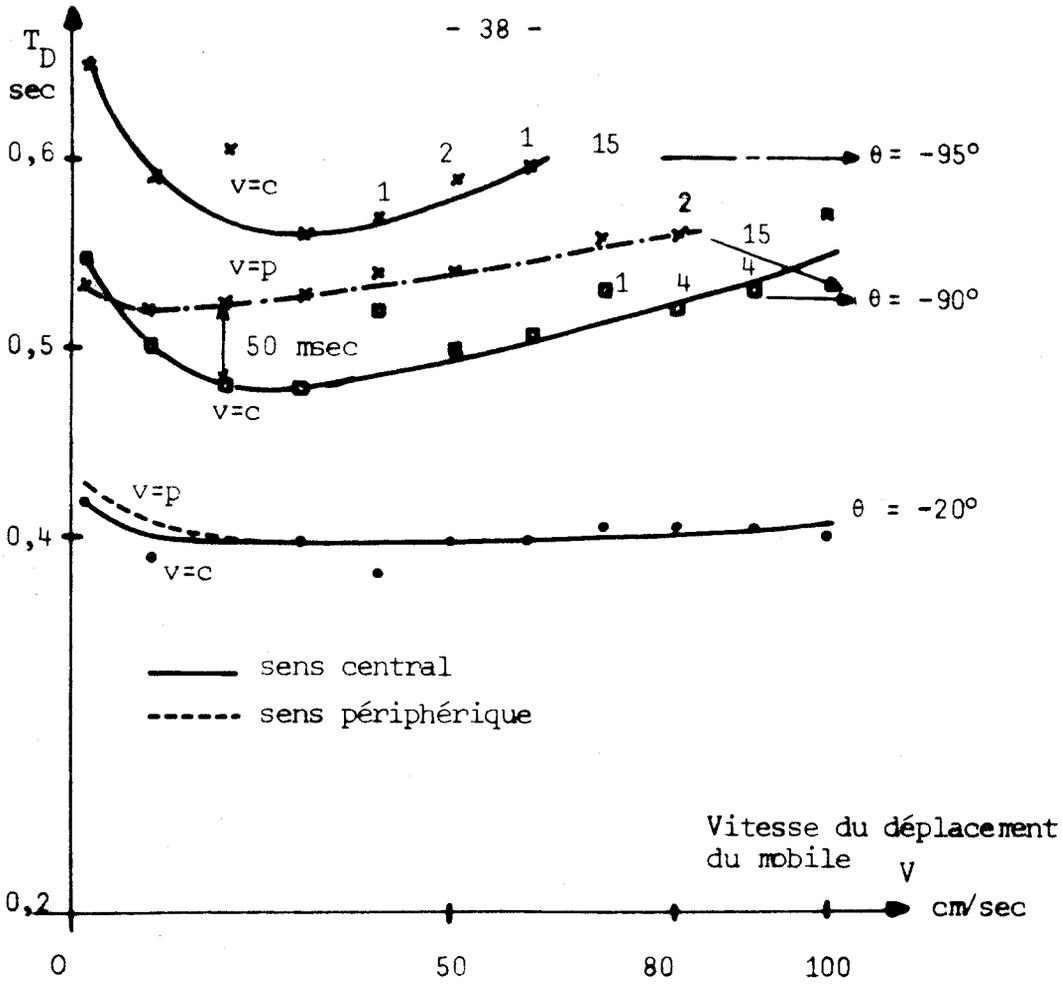


Figure 2.4 : temps de détection du mobile  $x(t)$  en fonction de sa vitesse  $V$  de déplacement sens central (c) et périphérique (p) ;  $\theta = 20, 90, 95^\circ$  ;  $L = 0,18 \text{ cd/m}^2$  ;  $C_p = \dots$  ; sujets du groupe A : 3x5 essais.

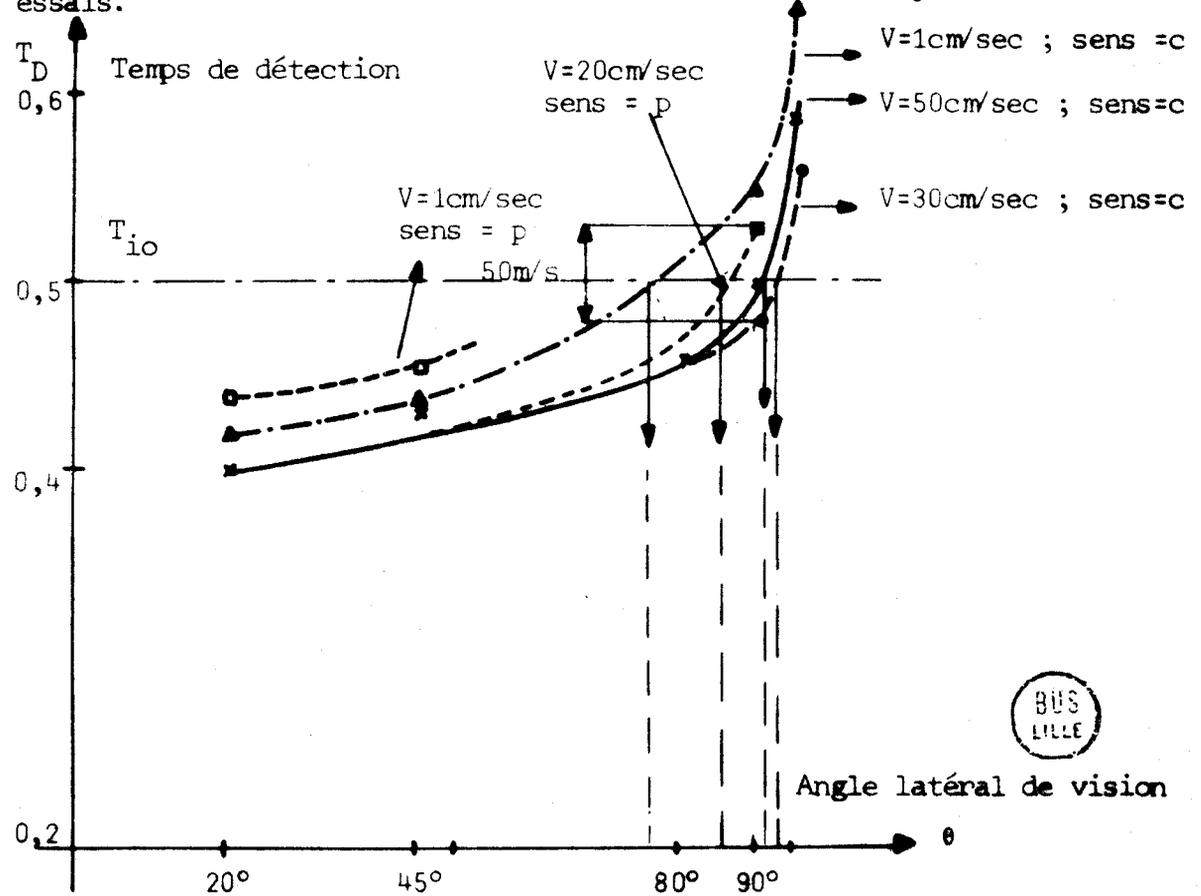


Figure 2.5 : Variation du temps de détection en fonction de l'angle d'apparition du mobile; paramètre : vitesse  $V=1, 20, 30, 50 \text{ cm/sec}$  et sens : central (c) et périphérique (p) ; groupe A  $L=0,18 \text{ cd/m}^2$  ;  $C_p = \dots$ .

## Conclusions

Dans le domaine de vitesse exploré on peut considérer importante l'influence de la vitesse  $V$  à partir d'un angle  $\theta$  de  $80^\circ$ . En outre une quantité non négligeable de "non-appui" se rencontre à partir de  $\theta = 90^\circ$ , croissant avec la valeur de la vitesse mobile. La formulation du paramètre  $K_1$  dans l'expression  $T_D = f(\theta)$  n'est pas évidente du fait de sa non-linéarité. Toutefois dans un certain domaine on reconnaît une fonction du type  $F_{\theta_0, L_0} \left( \frac{1}{V}, V \right)$  permettant de simuler la décroissance de  $T_D$  aux faibles vitesses et le minimum décelé aux grands angles latéraux.

En ce qui concerne les deux sens du déplacement de la cible - orientation vers la périphérie (p) et vers le centre (c) du champ visuel - les différences de  $T_D$  se sont révélées non négligeables pour les mobiles situés aux limites du champ de vision : on relève figure 2.4 un écart de 50 m sec à  $\theta = 90^\circ$  pour  $V = \pm 20$  cm/sec. Il convient en outre de signaler que l'opérateur se comporte d'une manière plus "réflexe" pour des mobiles se rapprochant de son "centre". Remarquons figure 2.5 les modifications non négligeables du champ de détection correspondant à une valeur du temps de détection  $T_{10}$  autorisé par exemple au cours d'un travail de l'opérateur si la vitesse du déplacement du mobile varie. L'analyse suivante montre que la dissymétrie du réseau de courbes figure 2.4 relative à l'orientation du mobile décroît pour des valeurs plus élevées de la luminosité du point objet.

### II.4 - Détermination du champ de détection visuelle en fonction de la luminosité du mobile.

Les résultats expérimentaux (figures 2.6 et 2.7) révèlent que le paramètre vitesse du mobile est plus prépondérant aux faibles valeurs de la luminance de l'objet qu'aux valeurs élevées. La décroissance du temps mis pour détecter la cible en fonction de sa luminosité peut être aisément interprétée par les propriétés /39/ de la rétine, rendues plus "efficaces" lorsque la luminosité augmente /40/. Ces mêmes phénomènes physiologiques expliquent que l'influence de la vitesse du mobile et la dissymétrie relative à l'orientation du déplacement de l'objet diminuent pour des valeurs plus fortes de la luminance du point en mouvement et confirment la prépondérance du contraste dans le processus de détection d'un objet /41/.

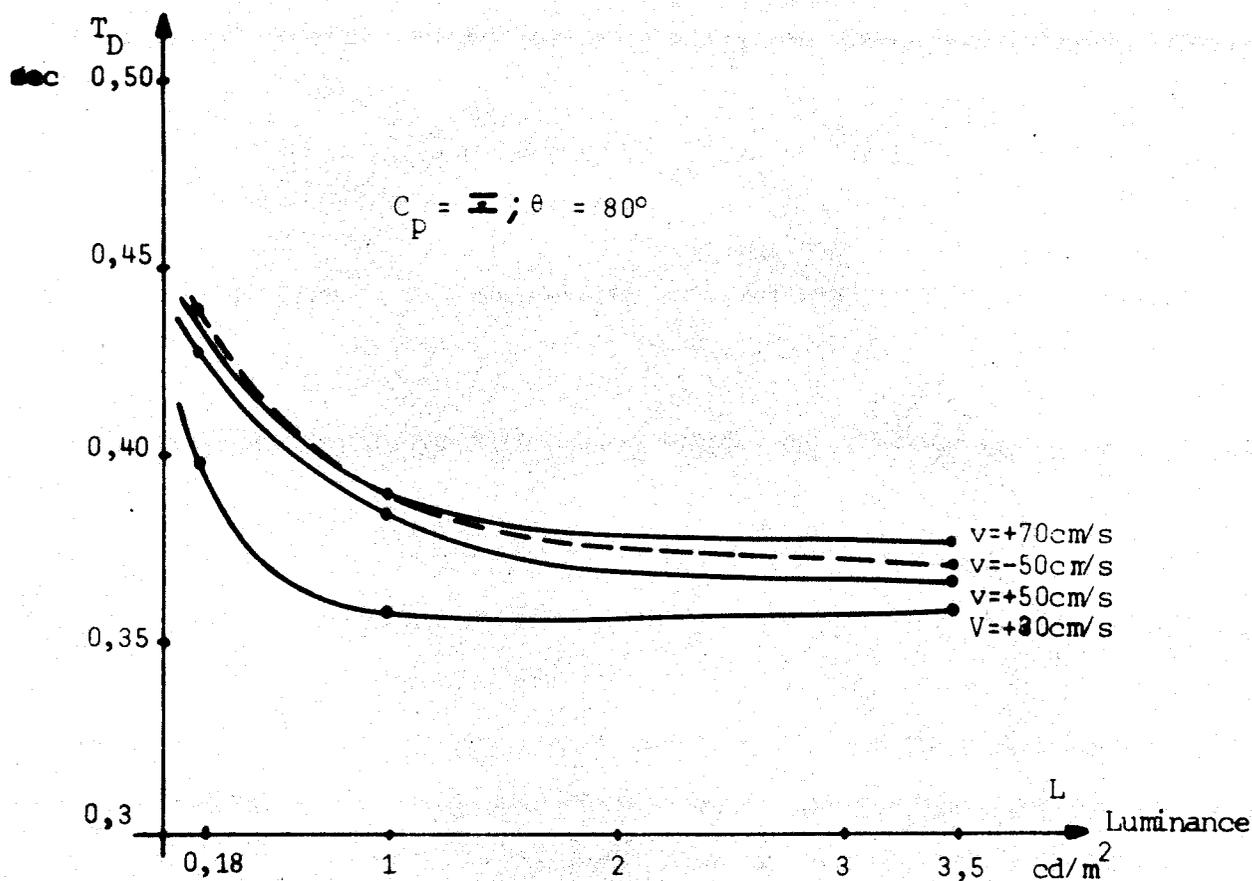


Figure 2.6 : Variations du temps de détection  $T_D$  en fonction de la luminosité du mobile  $x(t)$  ;  $V = \pm 50$  cm/sec, 30 et 70 cm/sec,  $\theta = 80^\circ$  ;  $C_p = 1$  (sujet A).

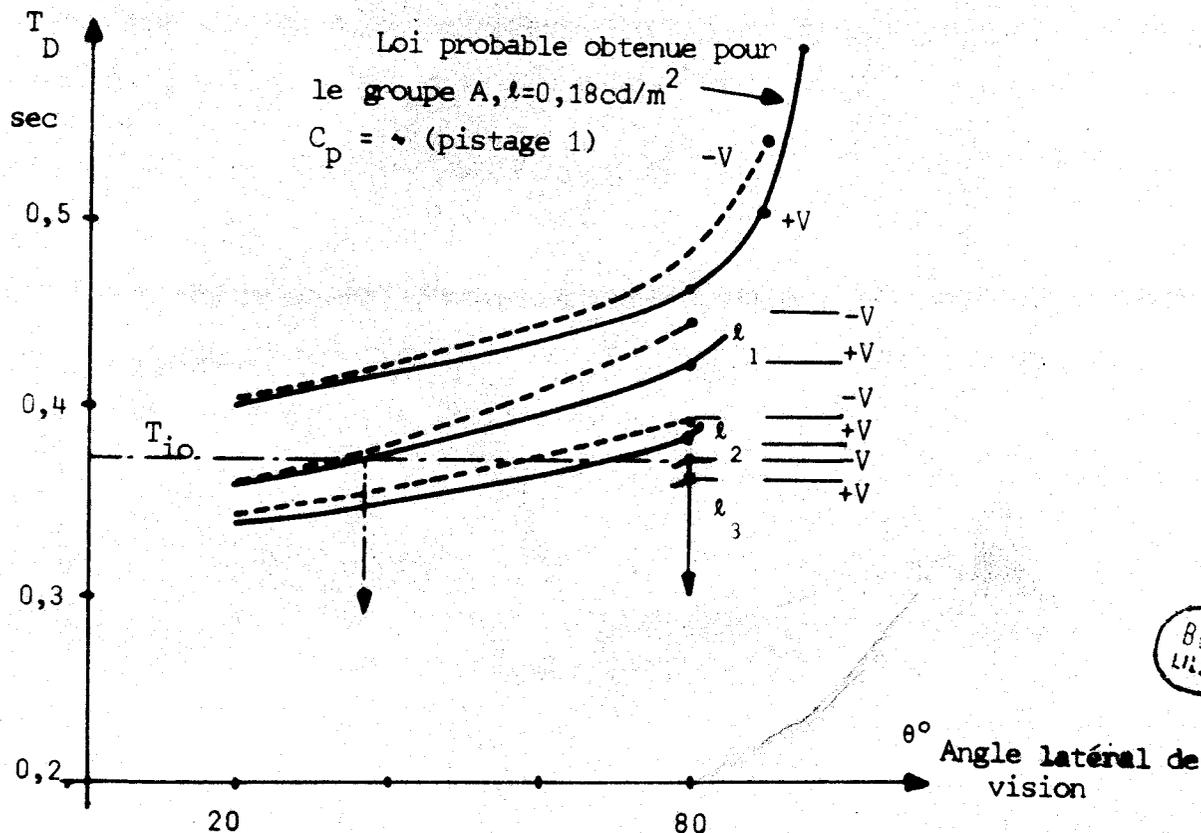


Figure 2.7 : Variations de  $T_D = f(\theta)$  pour plusieurs luminosités  $l_1 = 0,18$ ,  $l_2 = 1$ ,  $l_3 = 3,5$   $cd/m^2$ . Vit. du Mob.  $V = 50$  cm/sec central (+) et périphérique (-) - Lois probables pour 4 sujets  $A_2 A_3/B_1 B_2$ .

### En résumé

Les principales conséquences de cette analyse autorisent à supposer, en vue de l'identification d'un modèle d'opérateur que la valeur du paramètre luminosité du mobile détermine principalement le phénomène de la perception visuelle entraînant une prise d'information. On observe (figure 2.7) que le champ visuel correspondant à un temps de détection donné  $T_{i0}$  croît considérablement avec la valeur du contraste. La formulation de  $T_D = f(L)$  est ici plus facile à mettre en évidence, mais compte tenu des autres paramètres nous aurons recours à la simulation d'une caractéristique non-linéaire lors de l'élaboration du modèle présentant un seuil et une saturation.

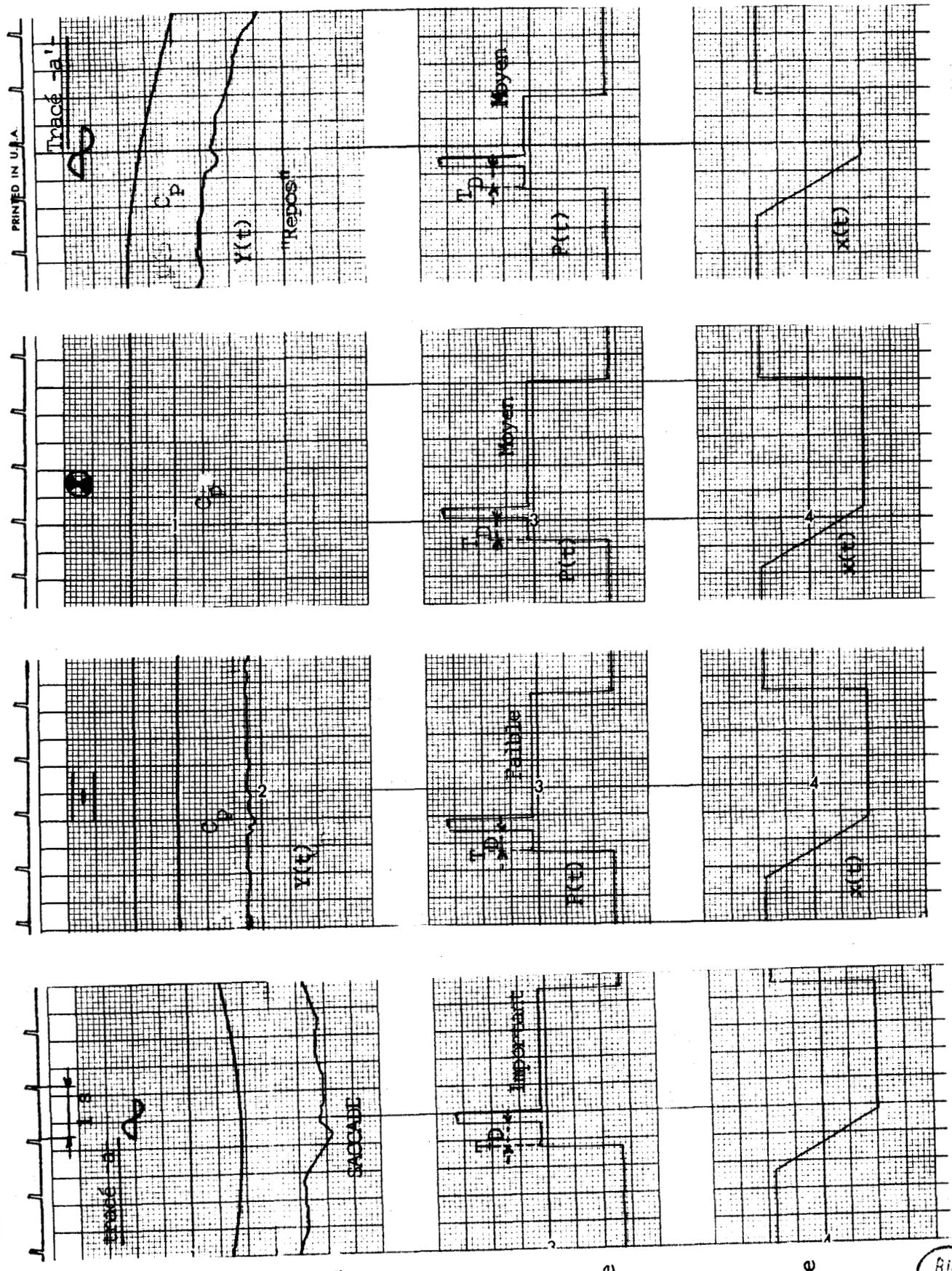
### II.5 - Analyse de l'influence de la tâche principale de travail

Un premier examen rapide des tracés (figure 2.8) permet de constater qu'une modification de la tâche principale  $C_p$  amène à des résultats différents, et ceci quelle que soit la position de l'objet dans le champ visuel. Les groupes A et B précédents se différencient davantage selon l'habileté des opérateurs au travail demandé. On note tracé -a- par comparaison au tracé -a'- qu'une saccade ou un mouvement volontaire dans la réponse principale entraîne une réponse secondaire moins rapide étant donné que le sujet vient d'apporter une grande attention à l'exécution de sa tâche principale, l'opérateur tend vers un équilibre rendu variable en fonction des "imprévus" relatifs à son travail essentiel (annexe A.2).

### Conséquences

Bien que la charge de travail que représente la tâche principale soit difficile à "définir" une modification de celle-ci engendre des résultats essentiellement différents. Cette étude montre que l'aptitude du sujet à un travail donné caractérise l'allure de la fonction  $T_D = f(\theta)$  (figure 2.9). Il convient en outre de distinguer dans la charge de travail un niveau "continu" lié principalement à la nature du travail et à l'aptitude de l'opérateur, et un niveau "discontinu" relatif aux corrections et saccades manuelles fonction de l'attention du sujet, d'une activité corticale, de la fatigue et des imprévus ... La simplification de ces phénomènes permet de supposer qu'une coïncidence parfaite des points objet et suiveur (tâche principale) et un rattrapage du point objet après une erreur importante entraînent de plus fortes valeurs de  $T_D$ . Autrement dit l'attention de l'opérateur à  $C_p$ , liée au temps de détection  $T_D$ , peut être fonction de l'erreur principale (figure 2.10). Cette relation est utilisée lors de l'élaboration du modèle de l'opérateur humain en modulant le paramètre représentatif des limites du champ visuel de détection.

manuel entre z reperes  
cible de déplacement  
sinusoïdal



Tâche principale  
C(p)  
Réponse Principale  
 $Y_M(t)$

Réponse secondaire  
P(t)

Tâche secondaire  
 $x(t)$   
 $\theta = 20^\circ$



Figure 2.8 : Enregistrements des réponses principales  $Y_M(t)$  et secondaires  $P(t)$  de l'opérateur humain effectuant des travaux différents. Un sujet du groupe A.  $\theta = 20^\circ$  ;  $L=1 \text{ cd/m}^2$  ;  $V = 10 \text{ cm/sec}$  ; sens : P

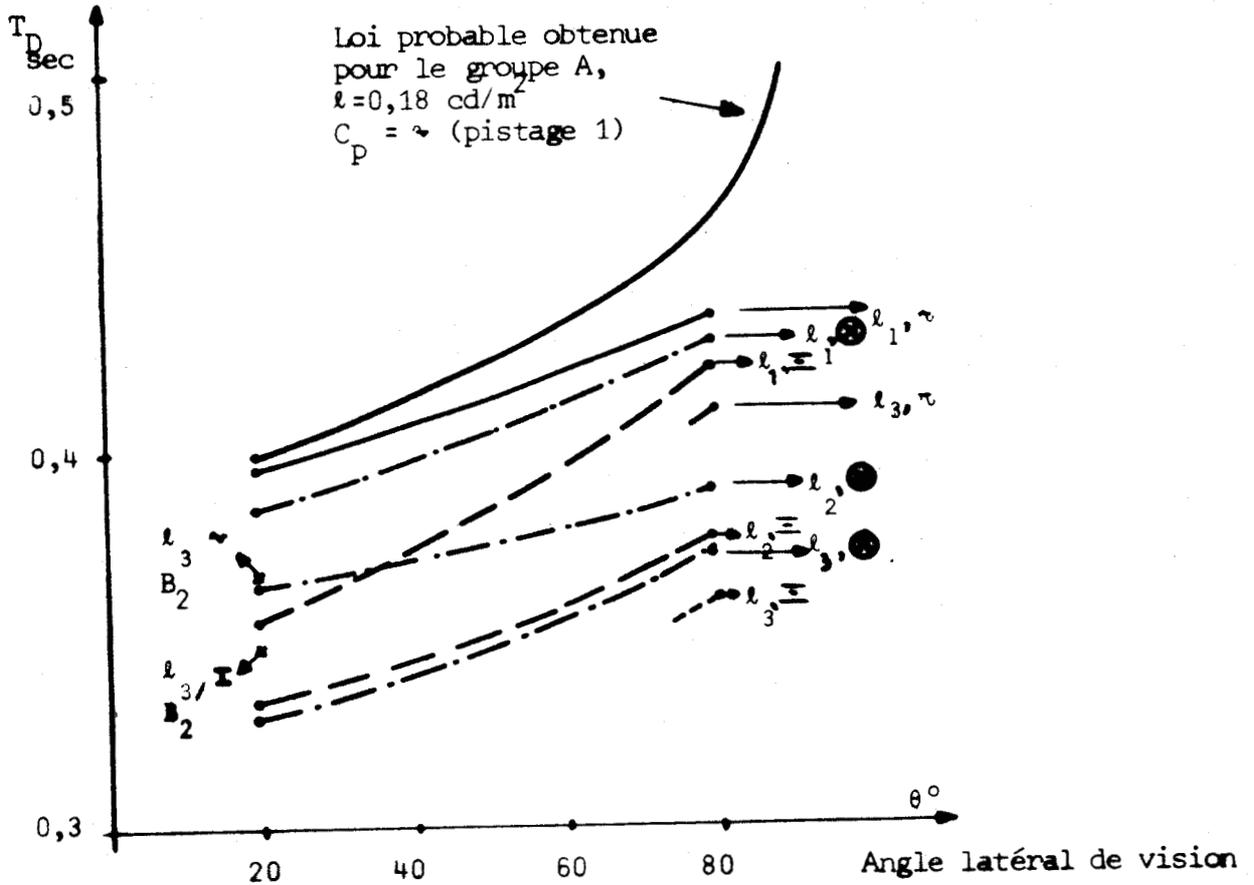


Figure 2.9 : Temps de détection  $T_D$  au mobile  $x(t)$  en fonction de l'angle latéral de vision. Les paramètres utilisés sont la valeur de la luminosité du mobile  $l_1, l_2, l_3$  et la nature de la tâche principale de travail  $\sim, \equiv, \otimes$ .

- $l_1 = 0,18 \text{ cd/m}^2$        $\sim$  = pistage       $V = 50 \text{ cm/sec}$
- $l_2 = 1 \text{ cd/m}^2$        $\equiv$  = positionnement      sens = central
- $l_3 = 3,5 \text{ cd/m}^2$        $\otimes$  = surveillance

Mesures effectuées sur 4 sujets  $A_2 A_3 / B_1 B_2$ .

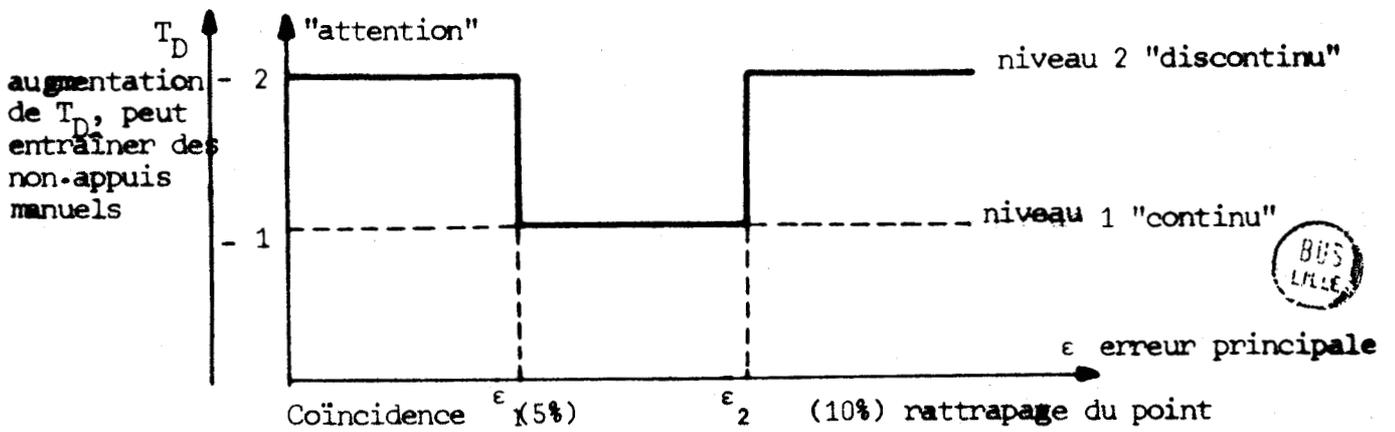


Figure 2.10 : Image de l'attention du sujet assimilée à la qualité de la réponse. les "non-appuis" manuels sont aussi fonction d'un caractère aléatoire cortical.

## II.6 - Synthèse et abaque du champ visuel de détection

Les résultats acquis mettent en évidence les différents effets que peuvent avoir les modifications des paramètres considérés dans l'étude sur la valeur du temps  $T_D$  mis pour détecter le mobile, et dégagent certaines conditions de mise en évidence du phénomène de la détection. On relève une grande sensibilité des paramètres à partir d'un angle latéral voisin de  $70^\circ$  par rapport à la direction du regard (figure 2.3, 2.5) et une diminution du temps de détection pouvant être voisin de 10 % (figure 2.9) pour un changement de tâche principale  $C_p$  lors d'un pistage manuel sinusoïdal par un positionnement manuel entre deux repères.

La vitesse du déplacement du mobile 1 à 100 cm/sec influence davantage la valeur de  $T_D$  aux faibles luminosités de l'objet  $0,18 \text{ cd/m}^2$  et aux grands angles latéraux supérieurs à  $80^\circ$  ; un minimum du temps de détection est mis en évidence dans plusieurs de nos expériences figure 2.4 obtenu par exemple à  $V = 30 \text{ cm/sec}$  pour un  $\theta = 90^\circ$ . En outre, le sens du déplacement de l'objet révèle un comportement différent de l'opérateur ; le temps de détection  $T_D$  est généralement plus long pour des déplacements dirigés vers la périphérie du champ visuel que pour ceux dirigés vers son centre. (figure 2.4).

L'étendue des domaines de variations des paramètres est loin d'être complète, mais elle permet de dégager les "lois probables" des propriétés de la détection visuelle. Il conviendrait en particulier d'approfondir le domaine de variation de la luminosité et du contraste de l'objet en mouvement, de modifier davantage la charge de travail et la séquence d'apparition des stimulus cibles, et d'augmenter le nombre d'expériences aux limites du champ visuel.

Toutefois compte tenu des conditions expérimentales, des réserves présentées au début du chapitre et des difficultés exposées au paragraphe précédent, nous pensons que nos 30.000 mesures expérimentales effectuées sur le comportement de l'homme en conduite d'un engin nous ont permis d'élaborer d'un modèle et la recherche d'un champ de vision optimal.

Parmi les abaques possibles mettant en évidence les variations de la luminosité, de la vitesse du mobile, de la charge de travail ... en fonction du champ de vision correspondant à un temps de détection  $T_{i0}$  autorisé par exemple lors de la conduite d'un engin nous présentons figure 2.11 la courbe  $V = f(\theta)$  pour un temps de détection  $T_{i0}$  donné. Signalons toutefois la nécessité d'effectuer une interpolation entre les différents points de mesure. On observe figure 2.11 que l'interpolation des points donne pour  $T_{i0} = 0,5 \text{ sec.}$  un optimum du champ de vision égal à environ  $92^\circ$  pour une vitesse du mobile de 30 cm/sec.

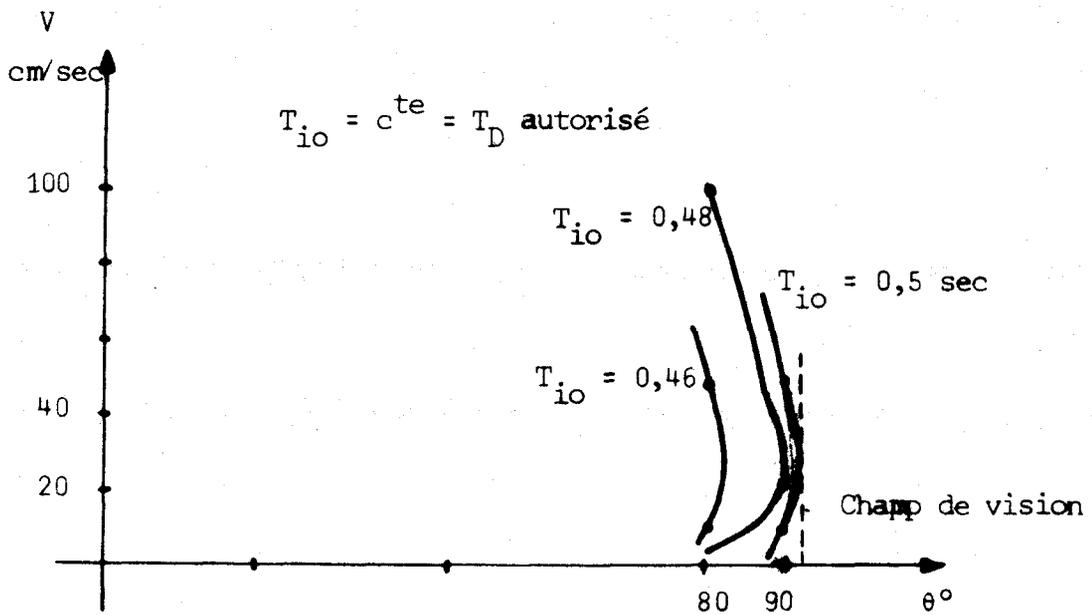


Figure 2.11 : Abaque  $V = f(\theta)$  pour plusieurs temps de détection autorisés  $T_{io}$ .

### II.7 - Difficultés rencontrées

Les difficultés rencontrées au cours de l'analyse expérimentale peuvent être rangées dans deux classes : l'une concerne la mesure des paramètres - niveau de charge de travail, luminance  $L$  d'un point en mouvement, angle  $\theta$ , perception visuelle et non-appui manuel - l'autre le système humain lui-même - amélioration globale des performances, différents comportements du sujet lors des régimes permanent et transitoire de ses activités -. C'est ce que nous allons exposer succinctement.

#### II.7.1 - Mesure des paramètres

##### . Niveau de charge de travail de l'opérateur

Un travail peut paraître plus ou moins facile, ou plus ou moins compliqué selon les sujets et entraîner la mise en jeu d'un circuit "cortical" particulier en fonction de la nature de la tâche. C'est pourquoi nous avons considéré les tâches non seulement intégrées dans la charge globale de travail - travaux principal et secondaire, appuis manuels correspondant à la détection des lampes  $L_1$  et  $L_2$  en précisant leur séquence d'apparition (annexe A.1) - mais aussi représentatives d'un comportement différent selon les sujets.

. Mesure de la luminance  $L$  de la cible mobile

La difficulté de mesure de  $L$  en temps réel réside dans le fait que le balayage de la cible  $x(t)$  est "unique" pour une vitesse donnée entraînant un temps d'apparition du mobile sur l'écran très faible aux grandes vitesses de déplacement de celui-ci, la mesure de  $L$  a été alors effectuée lorsque le point  $x(t)$  est immobile sur l'écran de l'oscilloscope.

. Mesure de l'angle latéral  $\theta$  séparant les tâches principale et secondaire

Le dispositif de mesure des mouvements oculaires n'autorise qu'un temps limité (10 minutes) de l'expérience et exige l'éclairement de la lentille cornéenne. Le contrôle du maintien du regard est alors effectué à l'aide du dispositif d'électro-oculographie moins précis que le premier dispositif.

. Perception visuelle et non-appui manuel

L'analyse de la perception visuelle à partir d'une réaction motrice demandée à l'opérateur présente des difficultés d'interprétation des résultats lorsque l'action exigée n'a pas lieu. En effet les "non-appui" manuels sont observés non seulement aux grands angles latéraux mais encore aux instants de grande attention que porte le sujet à son travail principal, ajoutés à ceux de distraction, fatigue oubli, choix des stimulus ... . L'identification des différents cas de détection est reprise par la suite (cas normal, hésitation, intervention extérieure, inhibition ...). Remarquons que pour bien distinguer ces cas il est nécessaire de disposer des signes électrophysiologiques indépendants de la conscience et de la volonté du sujet (l'électrorétinogramme et l'électrocorticogramme étant pratiquement impossibles à appliquer dans nos conditions expérimentales actuelles).

II.7.2.- Le système humain

. Amélioration des performances des sujets au cours de la recherche

Les différentes analyses de ce chapitre sont basées sur des expériences qui se sont déroulées durant une année entière avec deux périodes intensives séparées de quatre mois. Les résultats de la deuxième série ont mis en évidence une amélioration de la performance des sujets par rapport à la première (adaptation "globale des opérateurs à l'ensemble du dispositif, diminution de l'appréhension de la cabine ...). Toutefois nous avons tenté d'homogénéiser l'ensemble de nos mesures mais il ne faut pas s'étonner que la correspondance de quelques courbes présentées ne soit pas rigoureuse.

. Différents comportements de l'opérateur humain à propos de la charge de travail

Les premiers essais expérimentaux ont été réalisés à l'aide d'une tâche de travail  $C_p$  de poursuite manuelle d'un cible dont le déplacement est composé d'une suite d'échelons de position d'amplitude variable et présentés aléatoirement dans le temps (l'objectif étant d'éviter un comportement adaptatif de l'opérateur). Ceci entraîne une discontinuité considérable du "paramètre" charge de travail lors d'un déplacement brutal de l'objet et une croissance de la valeur de  $T_D$  au mobile  $x(t)$  présenté à ces instants figure 2.12. La possibilité de désynchroniser les déplacements de l'objet-principal par rapport aux apparitions du mobile  $x(t)$ , s'est révélée néfaste car on décèle rapidement un comportement adaptatif de l'opérateur relatif à la succession des tâches.

Le compromis choisi pour cette étude n'est certainement pas parfait, il entraîne néanmoins une dispersion des résultats (annexe A 2) mais n'amène pas un effet adaptatif dans les réponses du sujet pendant une expérience.

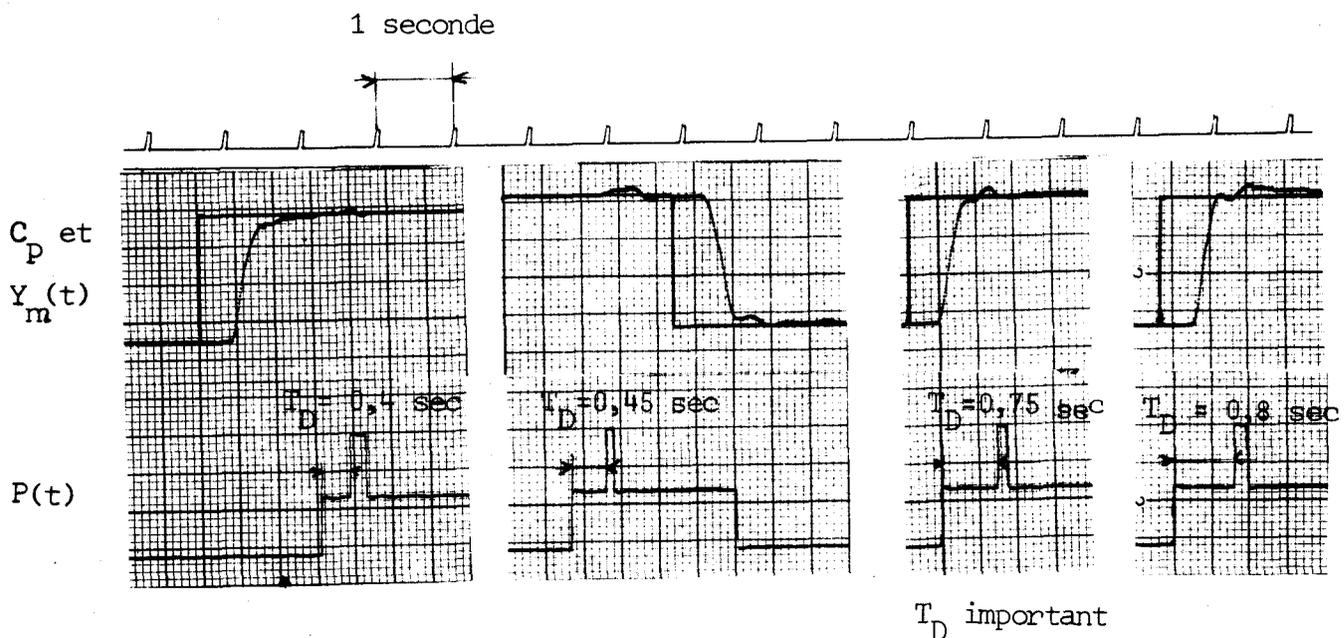


Figure 2.12 : Enregistrement de quelques réponses principales et secondaires de l'opérateur effectuant une tâche principale de poursuite d'échelons de position ; Sujet A,  $\theta = 45^\circ$ ,  $V\{x(t)\} = 2,5 \text{ cm/sec}$ , sens : central.

### CONCLUSIONS

Les différentes analyses de ce chapitre mettent en évidence les lois probables de la détection d'un objet mobile dans le champ visuel d'un opérateur humain et la complexité de ce phénomène. Toutefois pour l'objectif que nous nous sommes fixé, les faits significatifs mis en relief contribuent à formuler le comportement de l'opérateur à cette tâche. Retenons plus particulièrement les divers résultats du champ de détection en fonction de l'angle latéral  $\theta$  d'apparition de la cible mobile et de la luminance de celle-ci.

La charge de travail principal en vision frontale constitue l'un des "paramètres" les plus importants du temps mis pour détecter une cible en "vision extra-fovéale" et caractérise essentiellement le comportement de l'individu. Les réponses observées ont montré que cette analyse fait intervenir des phénomènes "corticaux" nécessitant de formuler certains critères en vue de l'élaboration d'un modèle d'opérateur et de préciser à l'aide d'un "étage supérieur" les contraintes liées à l'exécution de la tâche principale.

Au chapitre suivant nous exposons l'analyse des réponses dynamiques de l'homme réalisant un travail en vision frontale et en vision périphérique. Nous verrons que certains aspects sont étroitement liés à ceux de ce chapitre et qu'ils contribuent à l'analyse complémentaire de celui-ci.

Chapitre III

*ANALYSE des REPONSES DYNAMIQUES de l'HOMME*

Nous tentons dans ce chapitre de mettre en évidence les relations fonctionnelles existant entre les systèmes visuel et manuel lors du comportement dynamique de l'homme. Les résultats de l'analyse effectuée précédemment sont repris afin de les intégrer dans l'"interprétation globale" de l'opérateur humain et de permettre de dégager des relations caractéristiques entre les informations appréhendées par le système visuel, ou par le système auditif, et la réaction manuelle du sujet liée à celles-ci. Nous distinguons essentiellement dans le plan de ce chapitre les réponses observées chez l'homme en fonction de la localisation des stimulus dans le champ visuel.

III.1 - Analyse des réponses de l'opérateur humain à un stimulus présenté

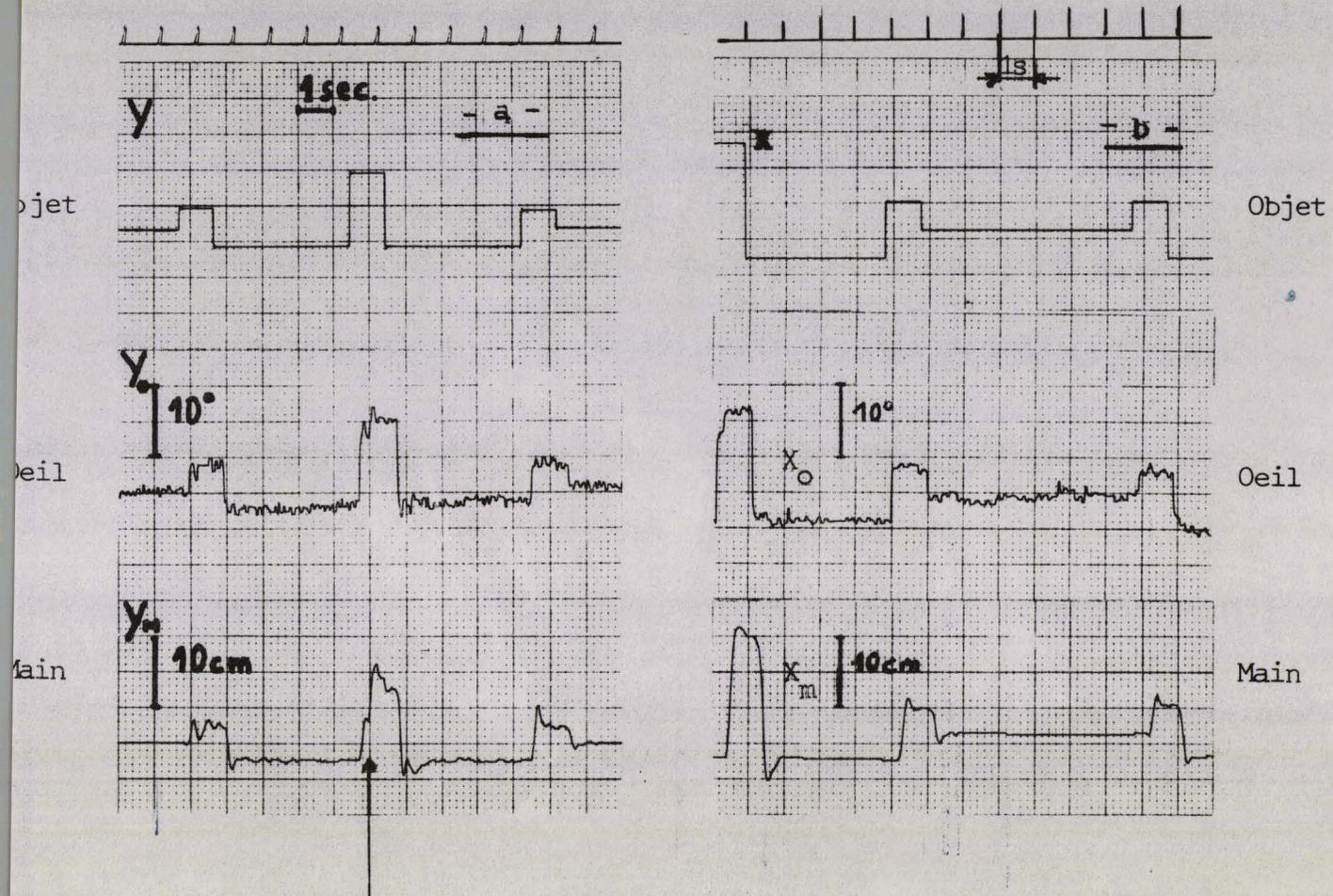
en vision frontale

L'étude du comportement d'un opérateur réalisant un travail en vision centrale est encore de nos jours très explorée /42/ et a fait l'objet de recherches dans notre laboratoire /25/. Notre but est de caractériser des faits significatifs afin de synthétiser le système humain d'une façon plus générale en introduisant la vision centrale et périphérique ainsi que la nature du signal (visuel et auditif). C'est pourquoi nous ne relatons que les principaux phénomènes observés, une étude plus détaillée étant présentée en annexe A.3.1 .

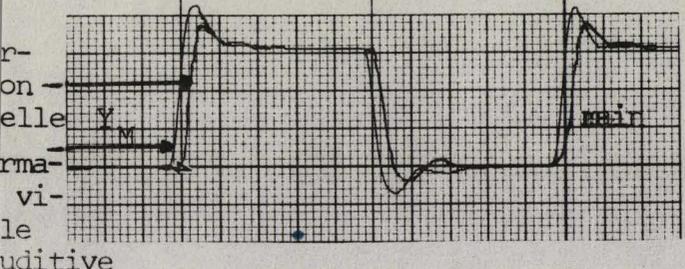
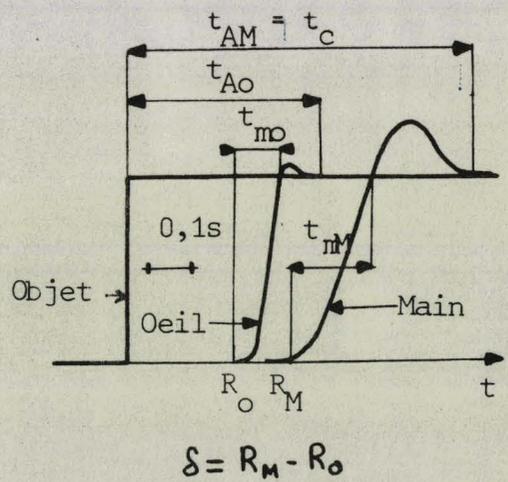
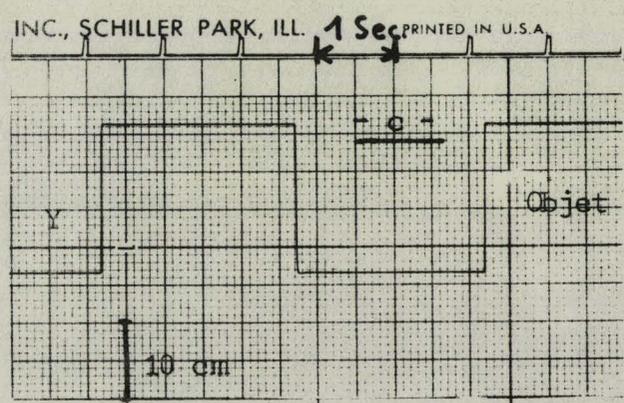
III.1.1 - Réactions d'un sujet à un stimulus en échelon de position

III.1.1.1 - Entrée échelon de position "lumineux"

L'examen des divers enregistrements en Annexe A.3.1 dont l'un est présenté figure 3.1 (a et b) permet de suggérer certaines relations entre les réponses visuelles et manuelles. Les principales caractéristiques des sorties peuvent se distinguer par leur temps de latence  $R_0$  (visuel) et  $R_M$  (manuel), de montée  $t_{m0}$  et  $T_{mM}$ , d'ajustement  $t_{A0}$  et  $t_{AM}$  permettant d'identifier l'écart  $\delta$  des temps de latence  $R_M - R_0$  (l'une des variables importantes du système oeil-main) ,



"arrêt"



objet et main

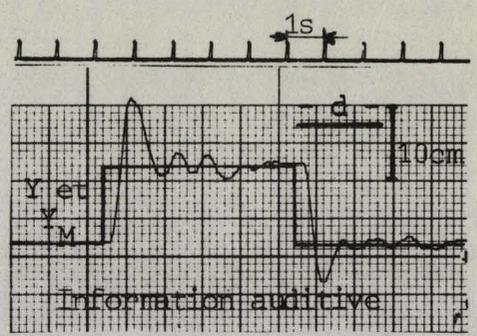


Figure 3.1 : Enregistrements des réponses visuelles et manuelles de l'opérateur humain effectuant une tâche de poursuite d'échelons de position en vision frontale. X = composante horizontale du déplacement ; Y = composante verticale du déplacement ; indice 0 = oeil ; indice M = main.

les constantes de temps, la stabilité à une position d'équilibre, le temps de coïncidence stable  $t_c$  des deux sous-systèmes visuel et manuel ... .

Lors d'une modification de l'amplitude du signal, on constate un phénomène non-linéaire caractérisé par des dépassements visuel et manuel considérables pour les stimulus de faible amplitude, de l'ordre de 100 % non suivis dans la plupart des cas d'oscillations. La valeur du dépassement diminue si l'amplitude augmente et l'on observe des "arrêts" figure 3.1 dans les différentes réponses au cours de leur déplacement entre deux positions du stimulus. Nous choisissons comme critère de performance non pas le minimum des retards, mais le minimum du temps d'ajustement  $t_c$  des systèmes visuel et manuel. L'exposé en annexe A.3.1 permet d'identifier cet "optimum" et complète les résultats de STARK /5/, l'analyse statistique fait apparaître  $t_c$  minimum pour :

- un écart  $\delta = 0,07$  seconde =  $R_M - R_0$
- un temps de montée manuel  $t_{mM} = 0,22$  seconde
- un retard de la réaction de la main  $R_M = 0,35$  seconde
- un retard visuel  $R_0 = 0,28$  seconde.

$t_c$  est alors égal à 0,57 seconde et correspond à une réponse sans dépassement. Le temps de coïncidence est bien entendu fonction de l'amplitude A, le résultat précédent a été trouvé avec  $A = 50$  mm (sur l'écran). Soulignons que nous avons détecté un temps de montée visuel moyen de 0,04 seconde pour un déplacement de l'oeil de  $4^\circ$ .

Le chapitre précédent souligne une croissance du temps de détection  $T_D = f(\theta)$  fonction de l'angle  $\theta$  séparant les tâches principale et secondaire, nous nous sommes attachés alors à déceler cette propriété dans cette expérience. L'annexe A<sub>3</sub> illustre les variations de  $R_0$ ,  $R_M$  et  $V_M$  (vitesse moyenne du déplacement manuel pendant le temps de montée) en fonction de l'amplitude A du stimulus (figure 3.2).

L'augmentation du retard visuel en fonction de l'amplitude  $R_0 = f(A)$  peut s'interpréter par le fait que l'image du point stimulus considéré est d'autant plus éloignée de la fovéa, à l'instant initial  $t_0$  du déplacement de l'objet, que l'amplitude du stimulus est grande. Pendant le temps correspondant au retard  $R_0$  le point image sur la rétine se trouve dans une région de moins en moins sensible lorsque l'amplitude A augmente, en d'autres termes selon notre définition, la charge de travail de l'opérateur est secondaire dans l'intervalle de temps  $t(t_0, R_0)$  (figure 3.2). Cette interprétation se trouve confirmée par l'analyse de cinq sujets sur les soixante expérimentés dont le retard visuel est supérieur au retard manuel amenant un écart  $\delta$ ,

$$\delta = R_M - R_0 < 0$$

une réaction manuelle relativement lente et un temps  $t_c$  plus important, une stabilisation de la main avec des oscillations autour de la nouvelle position du stimulus.

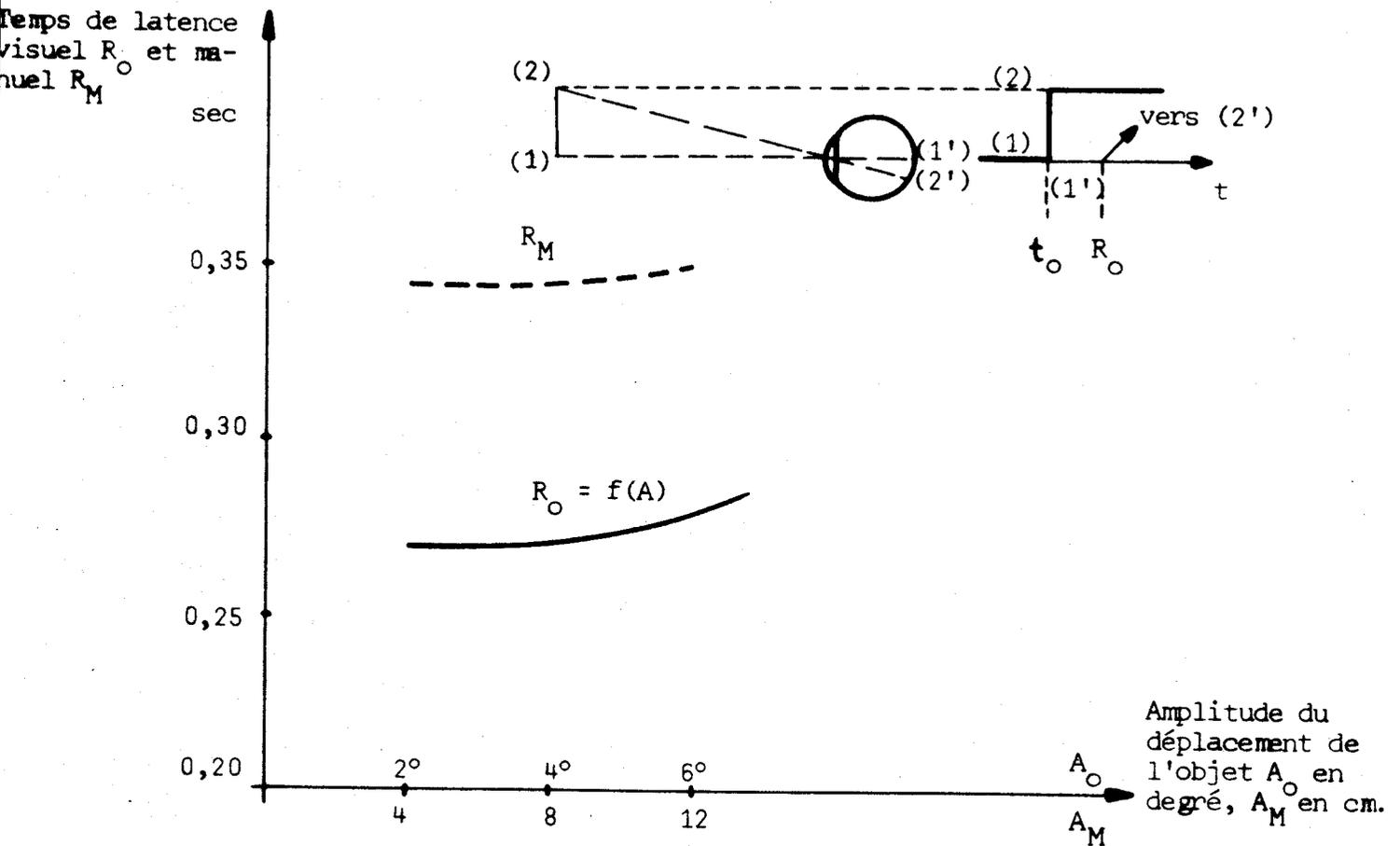


Figure 3.2 : Variations des temps de latence visuel  $R_0$  et Manuel  $R_M$  en fonction de l'amplitude du stimulus  $A$  ( $A_0$  = déplacement visuel,  $A_M$  = déplacement manuel).

En conclusion :

Sans prétendre à une synthèse immédiate entre les valeurs de  $R_M$  (ayant tendance à augmenter avec l'amplitude du stimulus) et celles du temps de détection  $T_D$  en vision périphérique, il est néanmoins intéressant de juxtaposer ces deux séries de résultats en observant que le retard manuel moyen obtenu (0,35 seconde) n'entraîne pas une discontinuité de la courbe  $T_D = f(\theta)$ . Les protocoles expérimentaux étant différents nous n'affirmons pas avec certitude cette interpolation des points de mesure, mais cela nous permet néanmoins de considérer l'angle d'apparition

de la cible comme un échelon de position d'amplitude  $\theta_0$  ayant l'intérêt d'introduire les propriétés physiologiques relatives à la structure de la rétine autour de la fovéa. Par ailleurs le point de vue physiologique consistant à supposer la notion de retard variable (Annexe A.1) autorise à distinguer un retard pur  $R_p$  du temps de latence  $R_M$  :  $R_p$  voisin de 0,15 à 0,2 seconde. Ceci permet de supposer dans cet intervalle de temps  $t(t_0, R_p)$  que la réponse du système humain s'effectue en boucle ouverte étant donné que l'information correctrice due à la boucle de retour n'est pas encore parvenue. Nous reviendrons par la suite sur cette hypothèse en la combinant avec la notion d'échantillonnage de l'entrée stimulus. Néanmoins l'examen de nos résultats permet de formuler une loi du mouvement manuel  $y_m(t)$  lors de sa mise en action à  $t = R_M$  du type

$$y_m(t) = K t^n$$

(le minimum de  $n$  ne pouvant être que 2)

Précisons dès à présent que notre identification des phénomènes humains s'oriente davantage vers une analyse des processus régulateurs de l'opérateur Figure 3.3 basée sur les principes physiologiques connus.

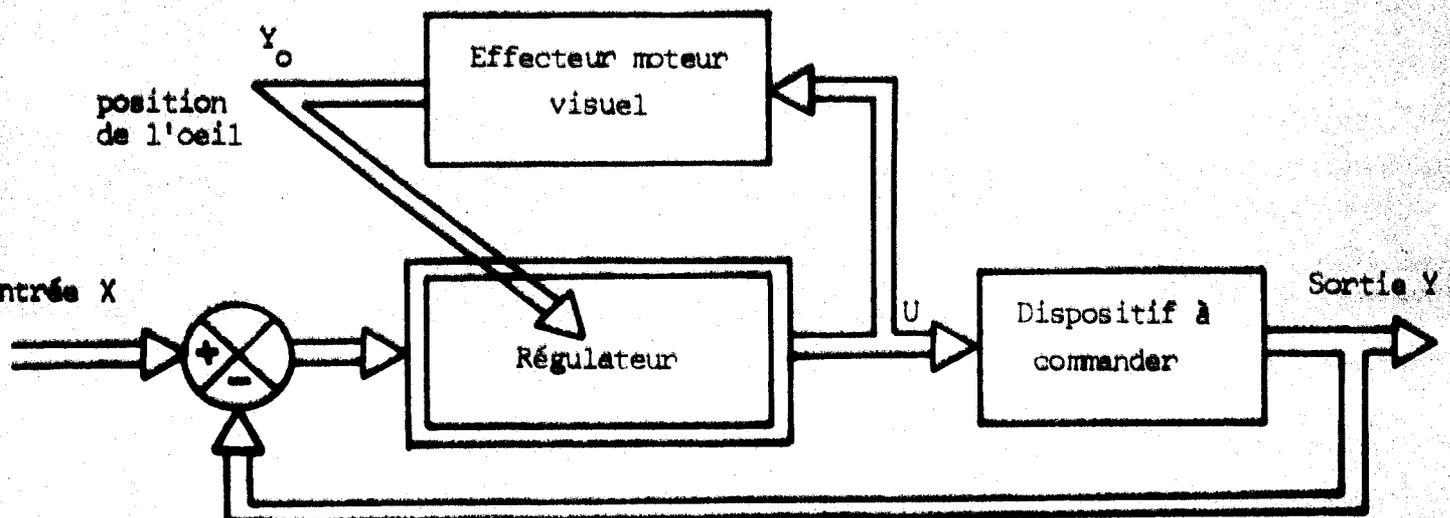


Figure 3.3.: Modification non-linéaire du processus régulateur de l'opérateur humain

Globalement le modèle peut se schématiser par un régulateur (modulations d'informations, position de l'oeil relative au stimulus, élaborations des commandes.

et un dispositif à commander (effecteurs musculaires, engins). Cette structure est liée aux modifications non-linéaires du régulateur fonction principalement de la localisation du signal d'entrée dans le champ visuel.

### III.1.1.2 - Entrée en échelon de position "lumineux et sonore"

Le protocole expérimental est identique au précédent, mais on informe l'opérateur par des informations visuelles et auditives /43/. L'oeil perçoit ou ne perçoit pas (figure 3.4) l'écart séparant le point objet du point suiveur mais l'oreille est renseignée par un stimulus auditif dont l'intensité est proportionnelle à l'erreur manuelle commise. La loi reliant l'intensité sonore et l'erreur du sujet n'a pas fait l'objet d'une analyse précise étant donné que notre objectif consiste seulement à mettre en évidence l'action de cette nouvelle entrée sur les réponses de l'opérateur en expérimentation.

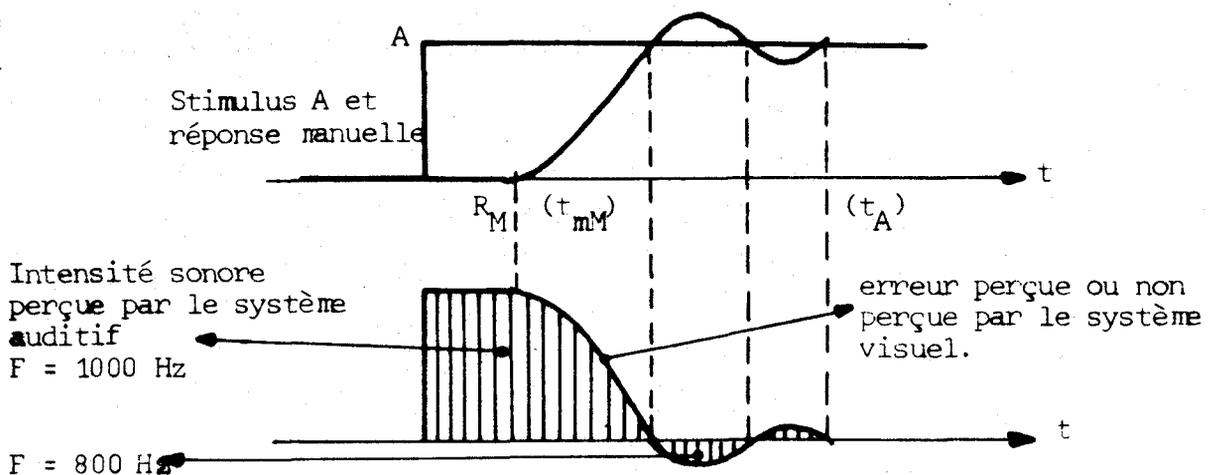


Figure 3.4 : Informations visuelles et auditives perçues par l'opérateur humain.

L'étude détaillée et les principales remarques expérimentales sont présentées en annexe A.3.1 pouvant être synthétisées par les faits significatifs suivants.

L'examen des enregistrements (figure 3.1 c et d) où nous avons parfois superposé sur une même photographie les diverses réponses obtenues (signaux visuel et auditif, signal sonore en comparaison avec une réponse à un stimulus lumineux seul) met en évidence les principales actions de l'information auditive sur le comportement de l'opérateur humain : le temps de latence est inférieur, voisin de 0,15 à 0,25 seconde, le dépassement manuel est plus important, près du double de celui qui est enregistré lorsque l'information sonore n'existe pas.

Le phénomène non-linéaire signalé précédemment est ici davantage mis en évidence : le dépassement est prépondérant pour les petits signaux et tend à diminuer pour les plus grandes amplitudes.

Le régulateur visuel joue un rôle moins "ordonné" que dans le cas du paragraphe III.1.1.1, les valeurs de  $R_M$  étant plus faibles la réaction de l'oeil peut s'effectuer soit avant, soit après le départ du mouvement manuel. Bien que le dépassement soit plus important la performance du sujet par rapport au minimum de  $t_c$  est améliorée. Le tableau de l'annexe A.3.1 indique une diminution de  $t_c$  de 10 % lorsque l'oeil et l'oreille perçoivent simultanément des informations. Dans ces mêmes conditions on note une diminution du retard manuel de 0,6 seconde par rapport au temps de latence relatif à un signal lumineux (pour les sujets considérés).

Le fait significatif dans la réponse manuelle lorsque le sujet ne voit ni la cible-objet, ni le point suiveur solidaire de la main, le travail de l'opérateur consistant alors à annuler le son en effectuant un mouvement manuel figure 3.4, consiste à conserver un retard  $R_M$  toujours faible de l'ordre de 0,25 seconde et d'enregistrer deux modes différents du déplacement de la main : l'un présentant une réaction, pendant le temps de montée, analogue à la précédente mais entraînant des dépassements manuels considérables (proche ou même supérieur à 100 % suivi de quelques oscillations d'amplitude beaucoup plus faible permettant à l'opérateur de localiser manuellement la position de l'objet avec certitude figure 3.1-d), l'autre mode fait apparaître un retard  $R_M$  encore petit, mais un déplacement très lent de la main vers la nouvelle position du stimulus pouvant atteindre plusieurs secondes dans nos conditions expérimentales.

#### En conclusion :

Cette analyse expérimentale permet d'affirmer que le système auditif contribue essentiellement dans la réponse du sujet au "démarrage" de la réaction de la main, et que l'information visuelle est nécessaire pour l'obtention d'un temps de coïncidence stable  $t_c$  faible. En effet, la stabilisation manuelle vers le but à atteindre exige des renseignements précis. En d'autres termes, on peut supposer que le cortex (étage supérieur) effectue une "sélection" des informations lors de signaux visuel et auditif pouvant interpréter en quelque sorte la "décoordination" apparue entre les réactions visuelles et manuelles. L'oeil n'est plus le seul régulateur du système humain considéré.

Des considérations physiologiques confirment cette hypothèse étant donné que la transmission de l'information auditive s'effectue plus rapidement qu'un signal visuel : le départ de la main est lié au stimulus sonore et la contribution du système visuel devient prioritaire lors de l'ajustement manuel autour d'une nouvelle position de l'objet. Cette prédominance de la vue après le "démarrage" de la main se trouve vérifiée par ailleurs en relevant un retard pur  $R_p$  du même ordre de grandeur (0,15 seconde) que celui enregistré avec un seul stimulus lumineux. Toutefois l'effet du signal sonore se caractérise par une vitesse manuelle moyenne  $V_M$  supérieure, pendant le temps de montée de la main, à celle obtenue précédemment.

### III.1.1.3 - Conclusions sur les réponses observées chez l'opérateur humain

Cette analyse montre que la réaction de l'homme est liée à la nature des stimulus et que celui-ci équilibre en quelque sorte le "service" que peuvent lui rendre plusieurs informations ; le stimulus sonore contribue au départ de la réaction et l'entrée visuelle fournit les informations nécessaires pour un ajustement correct de la main. Présentons figure 3.5 les différentes valeurs prises par les paramètres de la réponse manuelle afin de préciser la contribution des diverses informations.

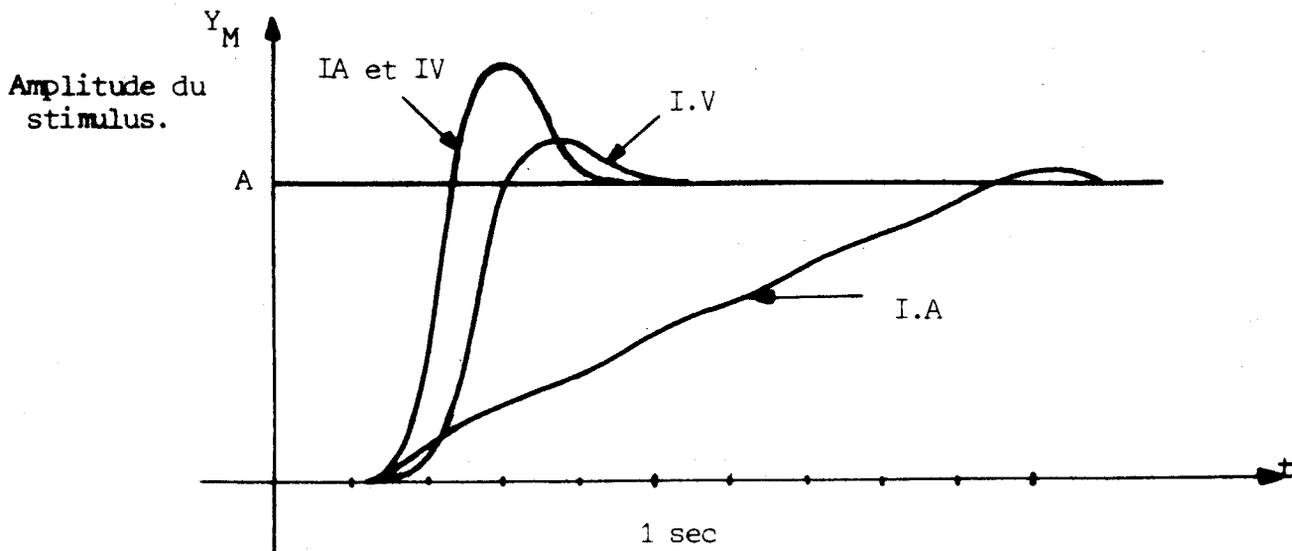


Figure 3.5 : Réponses manuelles à un même stimulus échelon de position en fonction des informations fournies au sujet (IV = informations visuelles, IA = informations auditives).

En résumé lors d'un signal sonore le retard  $R_M$  est minimum alors que le temps d'ajustement est important, la combinaison des deux informations visuelle et auditive donne une réponse "semi-optimale" par rapport aux valeurs des temps de latence  $R_M$  et d'ajustement  $t_{AM}$ .

Ces différentes analyses permettent de modifier la schématisation du modèle général proposé figure 3.3 en introduisant une boucle supplémentaire (se référer à l'annexe A.3.i). Nous verrons plus loin que l'interaction du système auditif agit principalement sur la période d'échantillonnage et le gain variable du modèle figure 3.6.

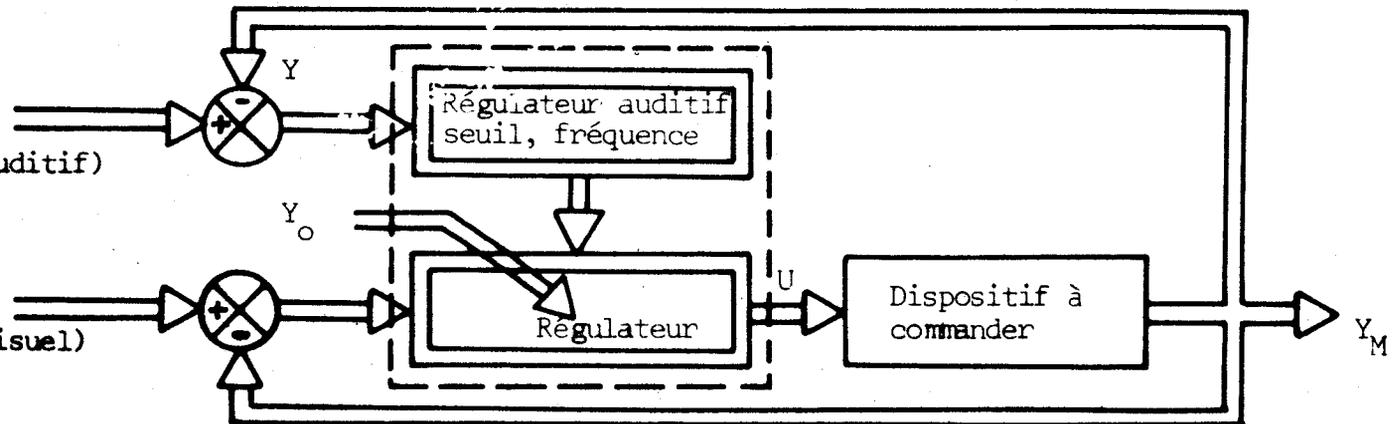


Figure 3.6 : Régulateurs visuel et auditif dans la voie de transfert des informations

### III.1.2 - Analyses des réponses de l'opérateur à un stimulus "continu"

Les réponses de l'opérateur à des stimulus "continus" (sinusoïdes, dents de scie ...) sont intéressantes du point de vue fonctionnel, elles mettent en évidence les différents comportements des sous-systèmes visuel et manuel en fonction de la fréquence et de la vitesse du déplacement de l'objet. De plus elles font apparaître un phénomène de "séquence" du comportement amenant à proposer le caractère échantillonné /44/ des systèmes bien que cet aspect ait déjà été entrevu dans les précédents paragraphes.

#### III.1.2.1 - Réactions de l'opérateur à des stimulus sinusoïdaux

L'examen des différents résultats et l'analyse statistique sont présentés en annexe A.3.1. Les faits importants de cette étude permettent de distinguer trois modes de réponses visuelles et manuelles (figure 3.7) et soulignent les propriétés non-linéaires du système humain.

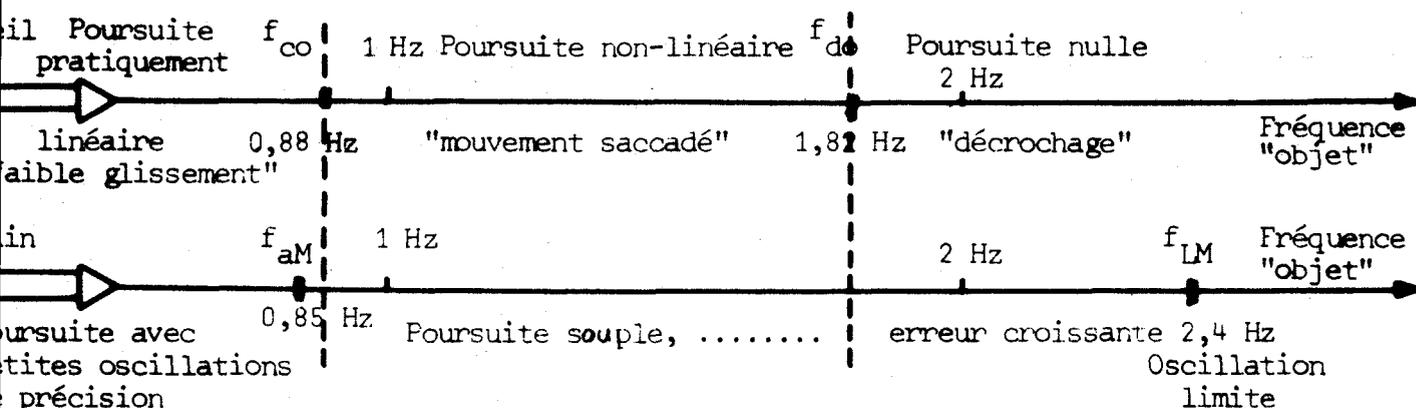


Figure 3.7 : Schématisation des comportements visuel et manuel en fonction de la fréquence du signal.

Lorsque la fréquence du stimulus est faible, l'oeil se comporte approximativement d'une façon linéaire tandis que la main poursuit l'objet avec des petites oscillations de "rattrapage" destinées à parfaire la précision de l'asservissement. Le mouvement oculaire contient néanmoins quelques faibles saccades semblables à des "sauts", il présente une forme de plus en plus saccadée (réponse en escalier) à partir de la fréquence  $f_{co}$  et l'on enregistre un "décrochage" du mouvement de l'oeil à un déplacement de l'objet correspondant à la fréquence  $f_{do}$ . Ce décrochage n'existe pas dans le mouvement manuel, on note une désynchronisation avec la fréquence du signal d'entrée à  $f_{LM} = 2,4$  Hz, la main oscille alors avec une amplitude et une fréquence plus ou moins constante.

En conclusion :

Les trois comportements délimités figure 3.7 autorisent à proposer une loi "corrélative" entre les systèmes visuel et manuel certainement non-linéaire et faisant apparaître une "décoordination" des mouvements oeil-main : pour des fréquences supérieures à  $f_{do} = 1,82$  Hz on enregistre une poursuite manuelle de plus en plus entachée d'erreur et tendant vers  $f_{LM}$ . Les différentes analyses effectuées suggèrent que le système perceptif lui-même module la "structure" du système manuel et que l'écart entre la position de l'image stimulus sur la rétine et celle de la fovéa est une grandeur essentielle pouvant interpréter les modes de la réponse manuelle. La différence des fréquences séparant  $f_{do}$  et  $f_{LM}$  est de l'ordre de 0,6 Hz, le coefficient de corrélation entre ces deux paramètres est de  $\rho = 0,53$  et une approximation linéaire donne une relation liant  $f_{LM}$  et  $f_{do}$  tel que :

$$f_{LM} \approx 0,9 f_{do} + 0,8 \text{ (en Hertz)}$$

Les variations de l'amplitude et du déphasage de la réponse manuelle en fonction de la fréquence du déplacement de la cible ne donnent que peu d'éléments positifs en vue de l'identification du système humain. En considérant le système manuel comme linéaire et continu on peut trouver à l'aide des courbes de BODE une transmittance contenant un terme d'ordre  $n$  élevé  $\frac{K}{(1+T_1 p)^n}$  avec  $T_1 \approx 0,07$  seconde. Par ailleurs ces courbes peuvent être représentatives, selon la classe de nos sujets, des résultats proposés par certains auteurs Mc RUER /1/, LEVISON /11/, ELKIND /12/

### III.1.2.2 - Réponses du sujet à des stimulus en dents de scie

Les petites oscillations manuelles se superposant sur la trajectoire de la main sont ici plus apparentes et fonction de la pente du stimulus, cette caractéristique se révèle quelle que soit la nature du stimulus. Les petits sauts et la forme en "escalier" relatifs à la réponse visuelle sont davantage mis en évidence sur les tracés d'enregistrement présentés en annexe A.3.1. Lors d'un changement de signe de la dérivée du signal on note des dépassements visuel et manuel suivis de saccades de rattrapage. Celles-ci sont accentuées si l'on introduit l'information auditive, rappelant la réaction plus rapide obtenue dans ces mêmes conditions lors d'un signal en échelon de position.

L'examen des enregistrements dans le même esprit (figure 3.7) amène à proposer  $f_{co} = 0,67$  Hz,  $f_{do} = 1,82$  Hz (identique à la précédente),  $f_{aM} = 1,05$  Hz et  $f_{LM} = 1,94$  Hz. Une autre caractéristique fréquentielle est introduite  $f_{sM} = 0,88$  Hz délimitant un domaine ( $f_{sM}$ ,  $f_{aM}$ ) dans lequel la réponse manuelle est "semi-optimale" par rapport à l'erreur commise par l'opérateur, il est en accord avec la physiologie des déplacements musculaires et correspond à une vitesse de déplacement voisine de 160 mm/sec (dans nos conditions expérimentales).

La combinaison d'un stimulus auditif et d'une information visuelle amène une poursuite de la main présentant de légères oscillations lorsque la valeur de la pente du stimulus est constante, la fréquence limite  $f_{LM}$  est du même ordre de grandeur (2 Hz) mais on observe généralement un décrochage réel de la main (analogue à celui du système oculo-moteur). En effet il arrive que le sujet soit gêné par le signal sonore quand l'erreur manuelle devient importante.

Le coefficient de corrélation entre les paramètres  $f_{LM}$  et  $f_{do}$  est  $\rho = 0,52$  il est de 0,45 entre  $f_{LM}$  et  $f_{co}$ . Terminons cette analyse en soulignant qu'un pistage d'un signal auditif en forme de dents de scie, est difficile pour le sujet sauf si le déplacement de l'objet à suivre (non vu) ne présente pas de discontinuité.

En conclusion :

Les principales conséquences de ce paragraphe sont liées d'une part à la mise en évidence de l'importance du régulateur visuel /45/ sur le mode de réponse manuelle (la fréquence caractéristique  $f_{co}$  en particulier), d'autre part à l'aspect oscillatoire du mouvement de la main quelle que soit la nature du stimulus. Cette dernière remarque souligne une succession de "séquences" dans la trajectoire manuelle pouvant être représentatives d'un phénomène échantillonné de la transmission des informations, détectable aussi dans la réponse visuelle : l'oeil capte un "point" et la main vise celui-ci, cette visée ne sous-entend pas forcément un "point" capté en vision fovéale rigoureuse étant donné les "sauts" et "arrêts" dans le mouvement de l'oeil.

III.1.2.3 - Conséquences fondamentales

L'étude ci-dessus permet de constater que les "formes" dynamiques des déplacements de l'oeil et de la main ne diffèrent pratiquement pas, à partir de la fréquence caractéristique du régulateur visuel  $f_{co}$ , pour des stimulus sinusoïdaux et en dents de scie. Ce phénomène ajouté à celui des saccades visuelles et d'oscillations de la main amène à supposer une séquence échantillonnée dans la transmission de l'information.

III.2 - Analyses des réponses de l'opérateur humain à un stimulus présenté en vision périphérique et effectuant une tâche en vision frontale .

Les résultats de la seconde partie de ce chapitre sont relatifs au protocole expérimental (figure 1.3, cas c) où la tâche principale consiste en un maintien du regard vers un repère (rouge) fixe pendant l'expérience et la tâche secondaire est constituée par un travail de poursuite d'un point objet (vert) à l'aide du point suiveur (bleu) solidaire des déplacements manuels. Ces deux "spots" sont situés en vision périphérique et le travail demandé à l'opérateur consiste toujours à réaliser la coïncidence des deux points. L'angle  $\theta$  choisi la plupart du temps dans cet exposé est  $\theta = 35^\circ$  étant donné que des essais préliminaires nous ont montré que pour les angles supérieurs les réponses deviennent très hétérogènes, les informations visuelles appréhendées devenant de plus en plus imprécises.

III.2.1 - Détermination des réactions de l'opérateur humain à un stimulus en échelon de position

L'examen des enregistrements (annexe A.3.2) révèle un mouvement manuel conservant les principales caractéristiques définies précédemment lors de l'étude de l'opérateur en vision frontale et en vision latérale dans une tâche de détection (temps de latence, arrêt de la main, absence de réponse du système manuel rappelant la non-détection du mobile animé d'une vitesse dans le champ de vision..) Toutefois cette analyse met en évidence l'existence d'une erreur permanente très importante à une position d'équilibre de la main (figures 3.8 et 9.a)

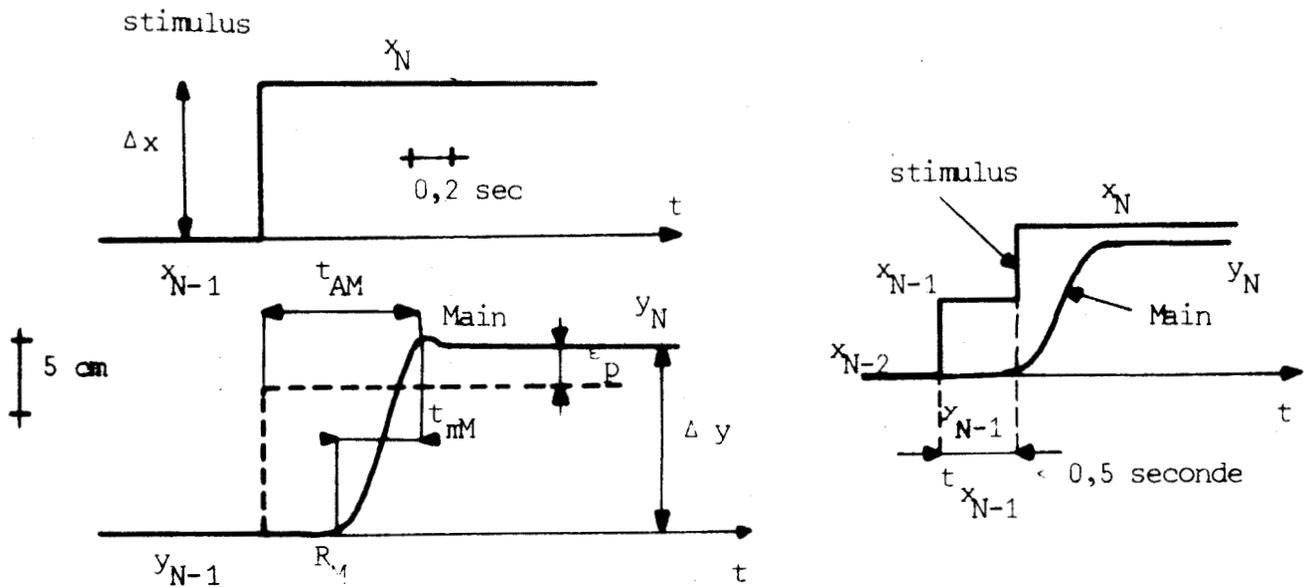


Figure 3.8 : Réponses caractéristiques de l'opérateur humain effectuant une tâche de pistage en vision extra-fovéale.

La dispersion des mesures est équivalente à celle qui existe dans les résultats du temps de détection en vision latérale (chapitre II), néanmoins le nombre de sujets étant plus important (20 opérateurs), il est possible de distinguer deux comportements principaux : l'un présentant un temps de montée manuel très grand (sujets prudents), l'autre une réaction semblable à celle observée en vision fovéale, mais ayant une erreur permanente  $\epsilon_p$  plus forte que pour les premiers sujets.

L'analyse des résultats fait apparaître un seuil en amplitude considérable (plusieurs centimètres sur l'écran) qui ne peut pas être lié uniquement au seuil de perception visuelle au sens physiologique du terme, compte tenu de la position de l'image stimulus sur la rétine. C'est pourquoi nous introduisons un "seuil de réponse" différent du seuil visuel lié à une décision et à l'"état" du sujet. De plus il est nécessaire de préciser la séquence d'apparition du point objet : un palier intermédiaire de durée courte entre deux positions du stimulus de temps plus longs n'amène pas de conséquences apparentes dans la trajectoire manuelle, tandis qu'une impulsion même brève entraîne une réaction de la main semblable à celle d'un système en boucle ouverte contenant un intégrateur pur (le sujet répondant généralement au premier front vertical de l'impulsion uniquement et gardant sa position manuelle après disparition de cette impulsion). Le seuil de réponse est fonction de l'"effort" que vient de produire l'opérateur lors d'une réaction, il est caractéristique de remarquer dans la majorité des cas qu'un changement de la position de l'objet n'a de conséquence que si la position manuelle est stable par rapport au stimulus précédent.

#### En résumé

- l'opérateur est toujours "renseigné" sur le sens du déplacement de l'objet lorsque celui-ci dépasse le seuil de réponse fonction de la "dynamique" du système manuel. Appelons  $\Delta x$  l'amplitude de l'échelon (fig.3.8) et  $\Delta y$  l'amplitude du déplacement manuel correspondant.

$$\Delta x = x_N - x_{N-1}$$

$x_N$  et  $x_{N-1}$  : positions du nouveau N et du précédent N-1 stimulus.

$$\Delta y = y_N - y_{N-1}$$

$y_N$  et  $y_{N-1}$  liés à  $x_N$  et  $x_{N-1}$

$\Delta x$  provoque une réaction manuelle  $\Delta y$  si

$|\Delta x| > \Delta_0$  = seuil du capteur visuel pouvant atteindre l'ordre du degré.

$t_{x_{N-1}} \geq 0,5$  seconde = temps d'apparition de l'objet à la position précédente.

Le temps  $t(x_{N-1})$  est variable selon les sujets, il peut être variable avec

l'apprentissage du test. Nous reviendrons sur cette propriété à propos du phénomène d'échantillonnage des points "visés" par l'opérateur.

- la relation  $\Delta y = f(\Delta x)$  est extrêmement non-linéaire, une catégorie de sujets a une réponse  $\Delta y < \Delta x$  et l'on observe des absences de réponses (sujets prudents), l'autre catégorie tend à répondre manuellement avec une amplitude  $\Delta y > \Delta x$  et un rapport  $\frac{\Delta y}{\Delta x}$  en diminution lorsque l'écart  $\Delta x$  devient important.
- le temps de latence  $R_M$  est plus important (0,4 sec) et possède une plus grande dispersion que le retard observé (0,3 sec) lors d'une poursuite en vision frontale (se référer annexe A.3.2). La réaction manuelle présente généralement un temps de montée  $t_{mM}$  plus grand qu'en vision fovéale.
- l'ajustement manuel à une nouvelle position d'équilibre ne s'effectue pas avec des oscillations comme celles qui apparaissent lors d'une réaction de la main en vision centrale.

Les remarques énoncées ci-dessus mettent en évidence que l'opérateur agit d'une manière complexe, et bien que les stimulus soient pseudo-aléatoires, on relève néanmoins un effort du sujet pour mémoriser les informations du signal envoyé. Les informations précises (fovéales) n'existant pas dans ces expériences, on peut suggérer que la "boucle" de transmission de l'information est d'autant plus perturbée que l'excentricité de l'image de l'objet est grande.

### III.2.2 - Analyse des réponses de l'opérateur humain à des stimulus en échelons de position répétitifs.

L'analyse des résultats au cours d'un essai de tests répétés, illustrée par l'enregistrement (figure 3.9 b et c), met en évidence les facultés auto-adaptatives de l'opérateur : les paramètres de la réponse du système tendent vers ceux observés en vision frontale après un nombre d'essais variable avec les sujets, voisin de 10. L'annexe A.3.2 complète cette étude concernant la variabilité du seuil de réponse et signale l'apparition de certaines corrections manuelles lors d'un ajustement manuel à un même stimulus, l'intervalle de temps séparant la réaction de la main au stimulus et cette correction est de l'ordre de 0,5 à 1 seconde. L'étude des réponses de l'opérateur est illustrée (figure 3.10) par les variations des principales caractéristiques du sujet en fonction du nombre de tests effectués:

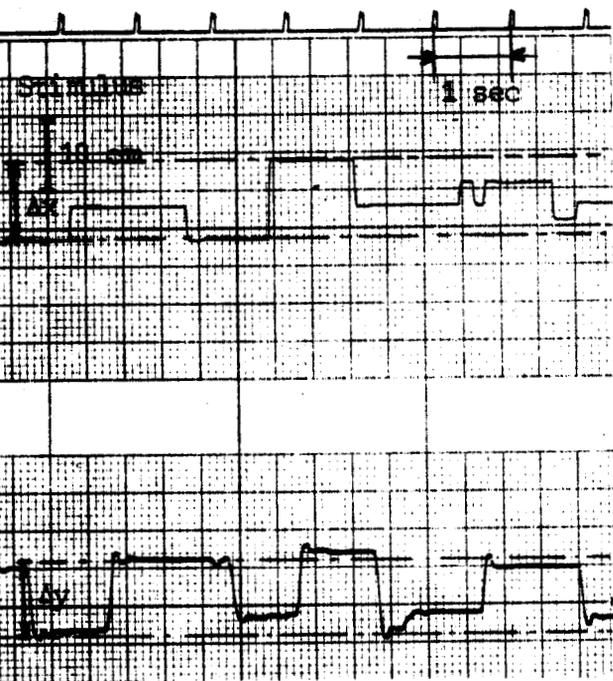


Figure 3.9 -a-

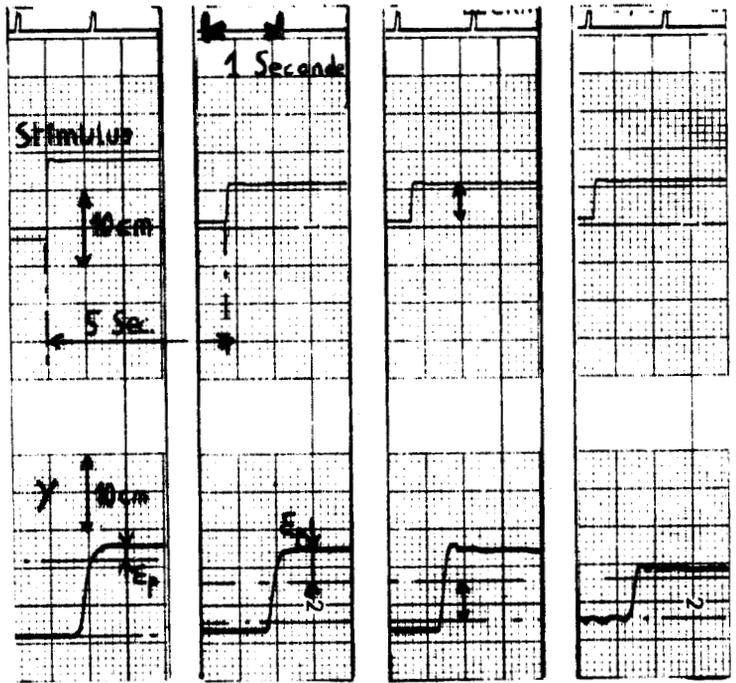


Figure 3.9 -b- : stimulus répétés toutes les 5 secondes  $\epsilon_p$  = erreur permanente

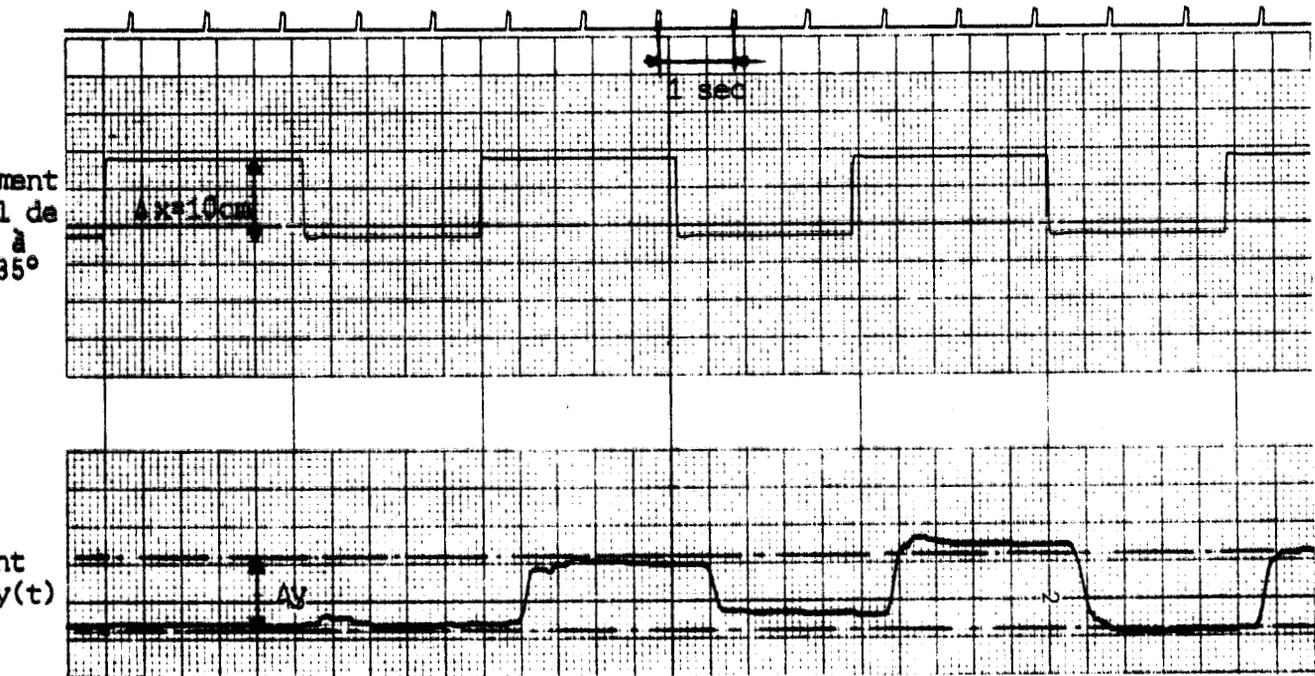


Figure 3.9 -c-

Figure 3.9 : Enregistrements du mouvement manuel  $y(t)$  au cours d'un test de poursuite en vision extra fovéale à  $\theta = 35^\circ$  latéral

Tracé -a- stimulus pseudo-aléatoires  
Tracés -b- et -c- stimulus répétés



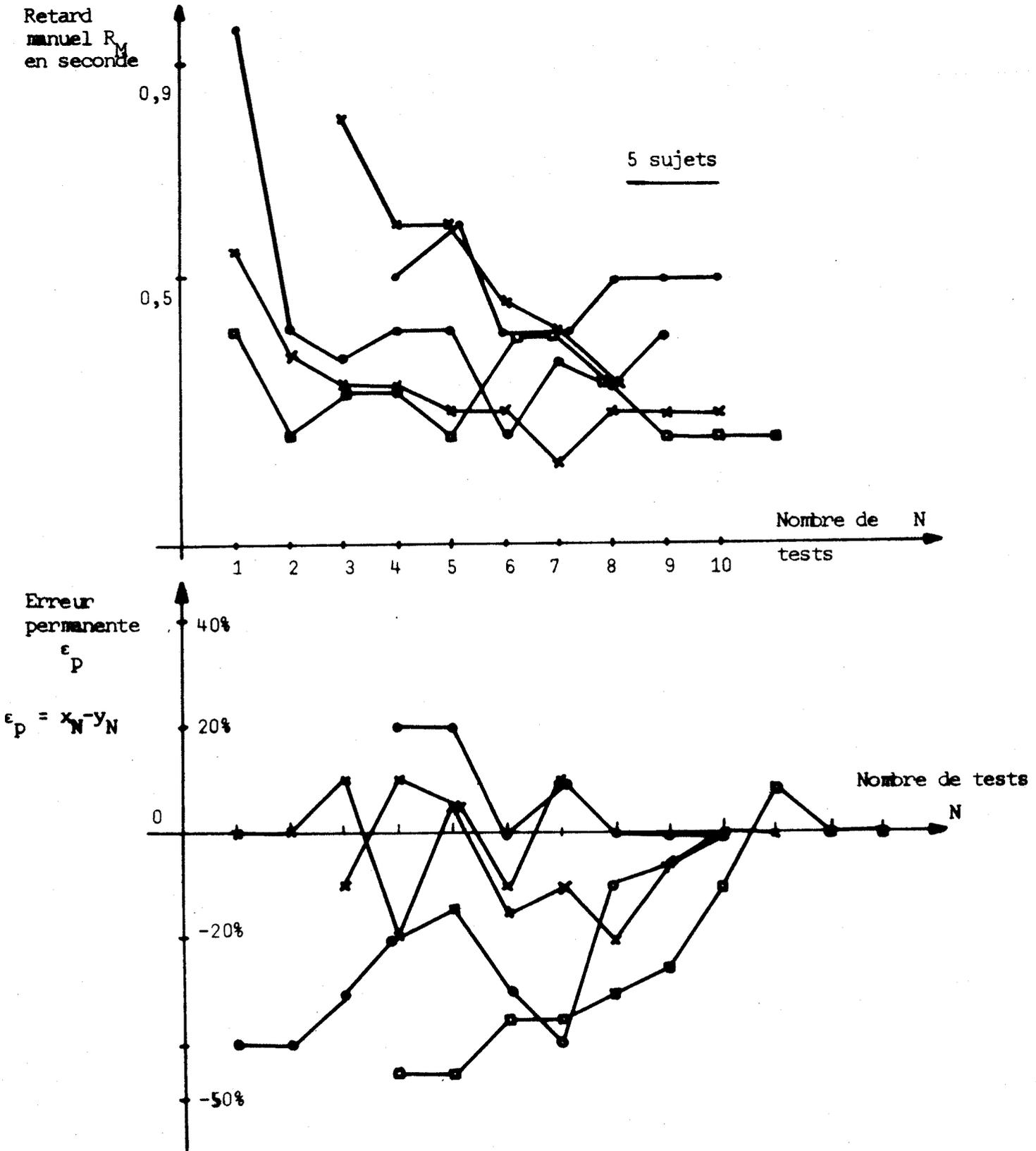


Figure 3.10 : Variations du temps de latence  $R_M$  et de l'erreur permanente  $\epsilon_p$  en fonction du nombre de tests N (stimulus échelons de position situés à  $\theta = 35^\circ$  latéral).

le temps de latence  $R_M$  diminue, le temps de montée décroît ou se stabilise à une valeur faible, l'erreur permanente  $\epsilon_p$  peut devenir nulle ou tend vers une valeur constante petite. De plus, l'analyse révèle que le mode d'ajustement manuel avec petites oscillations autour de la position d'équilibre n'existe toujours pas ; la "visée" de l'opérateur ayant par apprentissage un but de plus en plus précis on note un temps d'ajustement décroissant. Précisons que l'absence de certaines réactions de la main au début d'une série d'échelons permet de supposer que l'opérateur met en mémoire une quantité d'information pour élaborer son action.

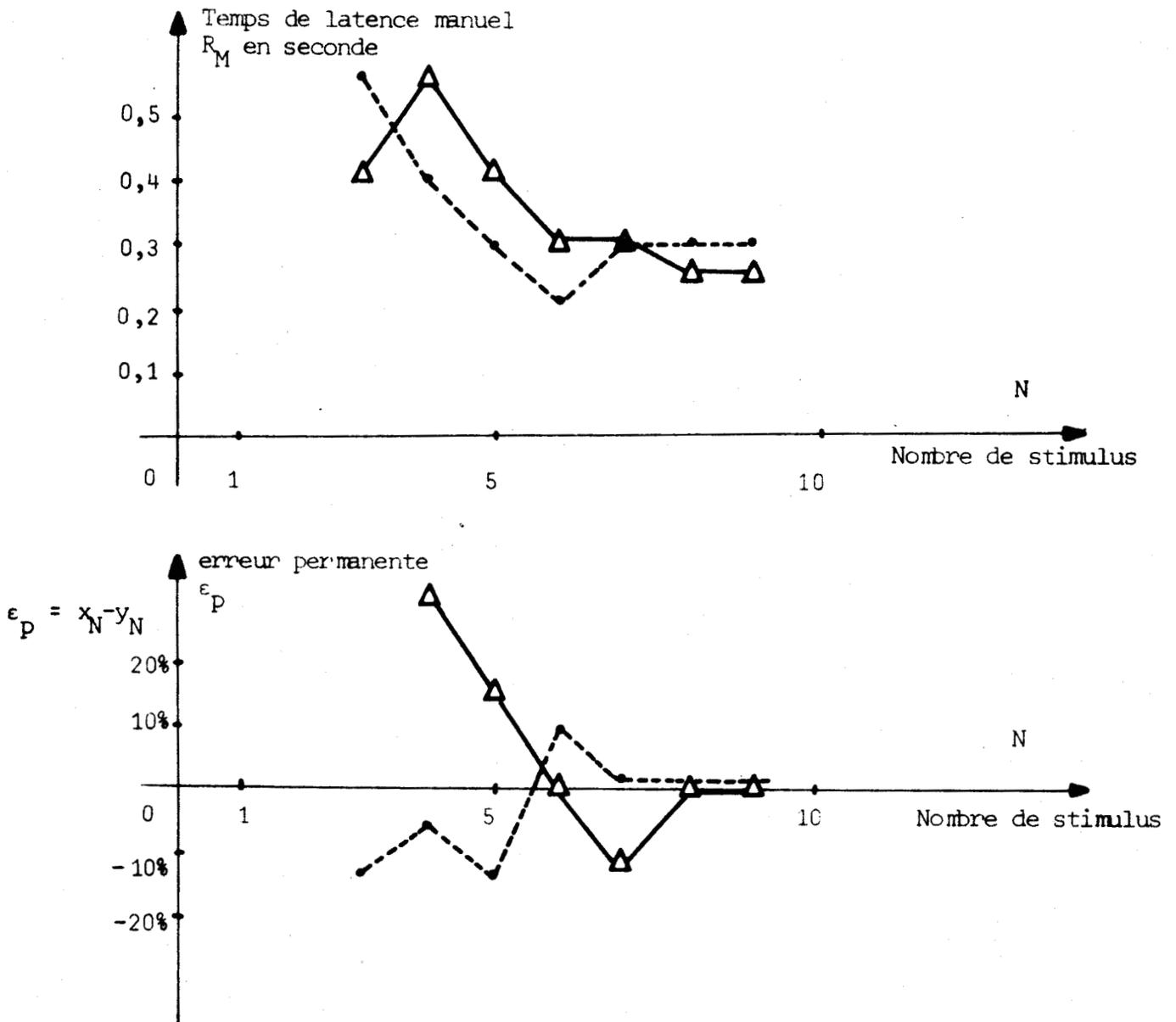


Figure 3.11 : Variations du temps de latence  $R_M$  et de l'erreur permanente  $\epsilon_p$  en fonction du nombre de stimulus échelon N au cours de l'adaptation en vision extra-fovéale 0.H.4;  $\theta = 35^\circ$

La figure 3.11 indique un aspect intéressant de la faculté d'adaptation du sujet : une simultanéité des décroissances de l'erreur permanente  $\epsilon_p$  et du retard  $R_M$ . Or on se souvient d'une propriété analogue lors de l'étude du champ de détection d'un mobile : une saccade, une erreur importante relatives à la tâche principale entraînent un temps de détection plus long du mobile situé en vision latérale. Soulignons que certains sujets ont un comportement différent, ils se synchronisent d'abord sur le stimulus répété (le temps de latence diminue) puis corrigent leur amplitude manuelle (l'erreur permanente diminue mais  $R_M$  peut redevenir important durant cette phase), et au bout d'un certain nombre de tests les paramètres sont ajustés.

#### En conclusion

L'imprécision des informations perçues par le sujet amène la mise en jeu d'un comportement "cortical" entraînant des propriétés adaptatives de l'opérateur par rapport au déplacement du stimulus. Les renseignements reçus par le cerveau aussi bien de la cible que de la réaction manuelle résultante permettant d'élaborer un "modèle" du comportement possible du sujet par rapport aux actions extérieures : au  $N+1^{\text{ième}}$  stimulus, l'opérateur se trouve davantage renseigné sur sa réponse manuelle et réadapte son "modèle".

#### III.2.3 - Etude des trajectoires manuelles du sujet excité par des stimuli sinusoidaux et en dents de scie

L'annexe A.3.2 détaille cette analyse qui ne révèle que peu d'éléments positifs ; les phénomènes de seuil et de saturation sont davantage accentués, ceux-ci sont fonction non seulement de l'amplitude mais aussi de la fréquence. Plus l'amplitude du stimulus est faible, plus le déplacement doit être rapide afin de déclencher une réaction de la main, la vitesse du déplacement de la cible modifie le seuil de réponse de l'opérateur.

Contrairement à la vision frontale, nous enregistrons souvent un décrochage manuel réel quand la fréquence du mouvement du stimulus devient importante. Cette fréquence de "décrochage" se situe vers 1 Hz, elle est inférieure pour certains sujets. Soulignons l'absence de petites oscillations précises de la main autour de la trajectoire manuelle rappelant le mode d'ajustement à un stimulus en échelon de position sans oscillations. Rappelons que ces expériences ont été effectuées à  $\theta_0 = 35^\circ$ .

### En conséquence

Le décrochage manuel à  $f_{LM} \approx 1$  Hz peut interpréter une incapacité du système à restituer l'information d'entrée si celle-ci dépasse un seuil de fréquence fonction de l'angle de vision de l'objet. Ce phénomène illustre l'hypothèse d'un modèle échantillonné de l'opérateur humain faisant intervenir les propriétés du théorème de Shannon. L'analyse comparative des résultats en visions centrale et périphérique permet de constater que les différences se situent pour des déplacements de l'objet ayant soit une très faible vitesse (seuil), soit une très grande rapidité de déplacement ( $f_{LM}$ ).

### III.3 - Conclusions générales sur le comportement dynamique de l'opérateur

Dans un comportement "normal", l'oeil suit le but vu d'une manière plus ou moins précise et l'écart perçu entre le but et l'axe optique provoque la réaction du système oculo-moteur afin de tendre à annuler l'erreur. Le rôle du système visuel est de rechercher constamment une réception optimale des informations extérieures. Lors d'une poursuite manuelle simultanée ce "régulateur" visuel est intégré dans le système manuel où la perception de l'erreur provoque la réaction de la main.

Dans le cas d'un travail en vision extra-fovéale, le système visuel est "perturbé" dans sa fonction de perception des informations ; l'erreur entre le but et le point suiveur étant perçue d'une manière imprécise (floue). Il en résulte une réponse manuelle entachée d'erreur avec un retard manuel et un temps de montée plus grands. Ceci amène à considérer que la structure du système manuel se trouve "modulée" par l'écart existant entre la direction du regard et celle correspondant à la tâche secondaire. Comme nous l'avons vu la "perturbation" du système visuel peut en partie être compensée par l'effet de mémoire du stimulus.

Cette étude montre qu'il existe des "liaisons" fonctionnelles entre l'oeil et la main (écart des temps de latence manuel et visuel  $\delta = 0,07$  sec. entraînant une réponse manuelle quasi-optimale). Toutefois nous avons noté que la coordination des systèmes n'est pas étroite et que certaines réactions manuelles ne nécessitent pas de perception "optimale" du stimulus. Le comportement du sujet à des signaux visuels et auditifs peut supposer que le régulateur central, le cerveau, contribue à un choix approprié des informations afin d'effectuer l'action demandée. L'étude des enregistrements obtenus en vision frontale pour des stimulus continus montre que les réponses visuelles et manuelles sont pratiquement indépendantes de la forme des stimulus à partir de la fréquence pour laquelle la réponse visuelle devient non-linéaire (à  $f_{CO}$ ) ; certains de leurs paramètres se trouvent modifiés en fonction de la forme et de l'amplitude du signal.

En résumé, l'exposé de ce chapitre met principalement en évidence que le comportement de l'opérateur humain est fonction non seulement de la géométrie du stimulus, mais aussi de la nature et de la quantité des informations pouvant être "perçues" par les systèmes sensoriels. Les effets non-linéaires du système manuel sont davantage marqués au fur et à mesure que l'image du stimulus s'éloigne des régions fovéales. Cette propriété déjà entrevue en vision frontale permet de prétendre que l'excentricité de l'image par rapport à l'axe du regard constitue une des variables essentielles du comportement de l'homme. En vision "normale" la main vise la cible vue par l'œil et l'ajustement peut être fin, en vision périphérique le sujet doit effectuer à partir d'une prise d'information un calcul afin de rendre son action adaptée aux consignes extérieures. Ces remarques contribuent à la proposition d'un modèle représentatif d'un système non-linéaire et présentant des caractères d'auto-adaptation et d'échantillonnage, c'est ce que nous tentons de démontrer dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

*IDENTIFICATION et ELABORATION d'un MODELE  
MATHEMATIQUE de l'OPERATEUR HUMAIN*

L'analyse expérimentale du système humain a mis en évidence quelques propriétés fondamentales du comportement de l'opérateur effectuant un travail composé de plusieurs tâches. Ces caractéristiques ont été déterminées en fonction de la localisation des signaux d'entrée dans le champ visuel, de la nature et du nombre de stimulus dans un test d'apprentissage.

La complexité des phénomènes observés nous a conduit à proposer une méthode d'identification basée sur une décomposition du système humain en sous-systèmes, présentant l'intérêt de mettre davantage en évidence un phénomène particulier et d'isoler une caractéristique déterminée du comportement de l'opérateur. Cette méthode nécessite la recherche d'une synthèse permettant d'aboutir à une formulation plus générale du comportement de l'opérateur.

IV.1 - Méthode d'identification

La plupart des méthodes /46/ d'identification rendent nécessaire une simplification des phénomènes observés lors de l'analyse expérimentale et aboutissent à une formulation ne rendant pas suffisamment compte du comportement réel du système /47/. De plus l'exploitation mathématique des propriétés de la perception en considérant la totalité du champ de vision soulève la définition de l'espace visuel qui fait intervenir des phénomènes complexes /48/ d'ordre psycho-physiologique. Notre proposition consiste d'une part à considérer les différentes réponses observées chez un sujet comme les résultats possibles d'une interprétation des entrées, d'autre part à isoler une "propriété" fonctionnelle du régulateur humain ; la simulation sur ordinateur du modèle permettant alors de comparer l'erreur existant entre les réponses du système et celles de l'opérateur. Pour un phénomène donné nous supposons l'existence d'une solution quasi-optimale, et notre problème consistera à rechercher un algorithme permettant d'aboutir à cette solution.

L'annexe A4.1 propose une structure complexe du système humain /49/ et distingue des signaux  $X$  représentatifs des stimulus extérieurs liés aux objets (position dans l'espace, forme, luminosité ...), des résultats  $Y$  caractéristiques du phénomène observable et des perturbations  $Z$  associées aux propriétés internes à l'organisme et aux interactions entre les sous-systèmes. La difficulté majeure réside dans le fait que l'élaboration de la commande  $U$  du "processus" à partir des signaux  $X$  et  $Y$  n'est ni mesurable ni observable (figure 3.6, chapitre précédent).

Pour un protocole donné,  $X$  et  $Y$  étant les variables mesurées et déterminées par l'intermédiaire des paramètres (forme, nature, erreur permanente  $\epsilon_p$ , retards ...) nous rechercherons une minimisation de la distance entre les mesures effectuées sur l'opérateur et celles du modèle figure 4.1.

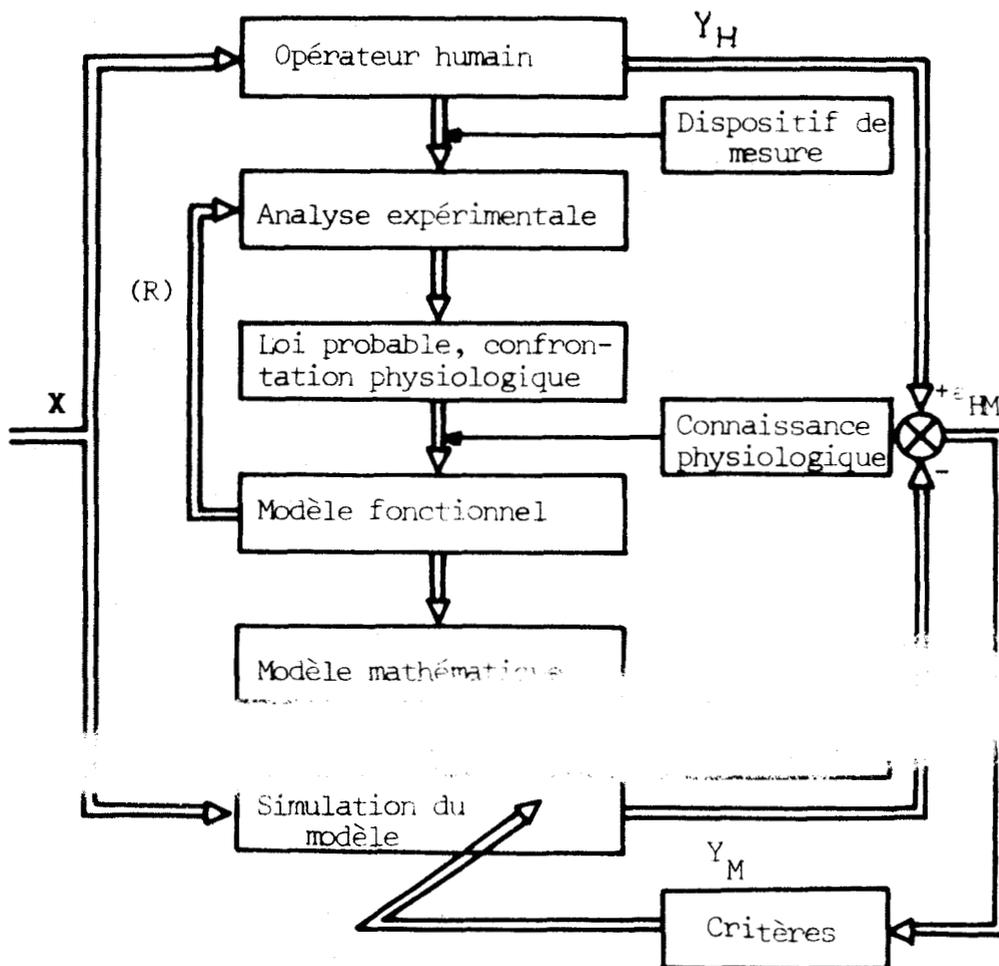


Figure 4.1 : Identification expérimentale

Le critère de validité du modèle est basé sur une minimisation de la valeur absolue des écarts existant entre les valeurs des paramètres du modèle M et ceux de l'homme H.

$$D = \sum_{i=1}^{i=k} | R_i^H - R_i^M |$$

associé à la connaissance de l'erreur Homme-Modèle

$$D_{HM} = | \epsilon_{HM}(t) |$$

#### IV.2 - Structure du modèle de l'opérateur

Les différentes propriétés fondamentales décelées dans les chapitres précédents (non-linéarité, choix "optimal" des signaux, décision d'une prise d'information, échantillonnage, amélioration de l'indice de performance, aspect multi-variable, coordination des tâches) doivent être interprétables dans la structure du modèle figure 4.3. Ce dernier met en évidence l'importance du régulateur central, le cerveau (étage supérieur), agissant en priorité sur l'ensemble du système. Nous considérons la "boucle" du système oculo-moteur comme sous-système principal du comportement global ; le système auditif n'agissant qu'en second plan dans le cadre que nous nous sommes fixé.

Rappelons que lors d'une série de stimulus ayant des caractéristiques identiques, la réaction demandée au sujet n'est jamais systématique (non-appui manuel dans une tâche de détection, absence de réponse de la main au début d'une série de stimulus). Par ailleurs l'excentricité de l'image stimulus par rapport à la fovéa "module" selon nos hypothèses la transmission des informations ainsi que les organes régulateurs. Le comportement "naturel" de l'oeil (cas du réflexe ou action avec un minimum de contraintes, observable chez les aveugles corticaux) doit alors se distinguer du comportement volontaire, selon le degré de complexité de l'image extérieure et du travail demandé (cas de plusieurs travaux).

Une solution consiste à considérer l'étage "cortical" que nous appelons étage supérieur figure 4.3 représenté physiologiquement figure 4.2. La simulation sur ordinateur nécessite de prévoir ces comportements étant donné qu'une absence de réaction de l'opérateur est un facteur essentiel en ergonomie.

La recherche de la structure du modèle peut se caractériser par la boucle R (figure 4.1) reliant le modèle fonctionnel relatif à un phénomène donné aux tests de vérification non seulement sur l'homme mais aussi sur le modèle.

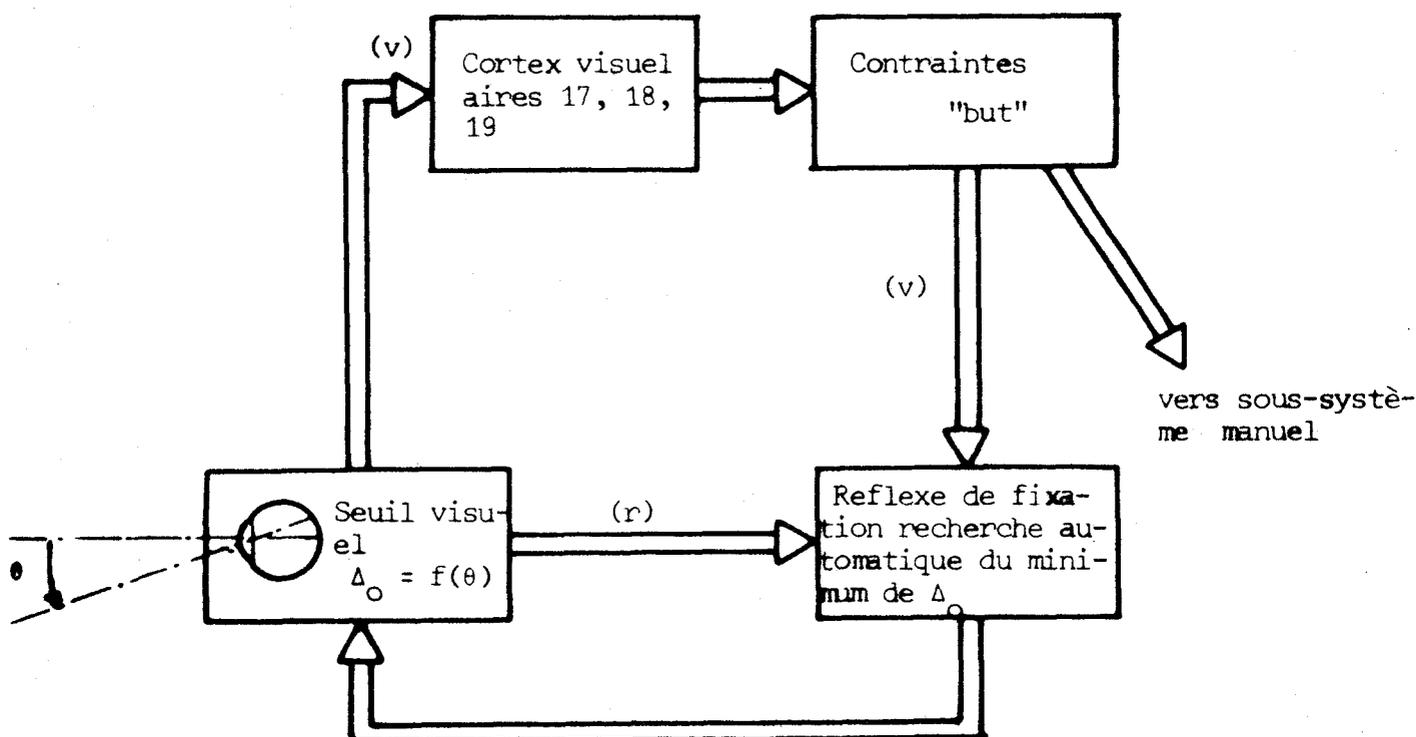


Figure 4.2 : Schéma simplifié des voies visuelles

r = réflexes ; v = volontaires soumises à des contraintes.

On remarque figure 4.3 un étage supérieur dont le but est de définir une "stratégie" du comportement global du sujet (priorité à  $C_p$  par rapport à  $C_s$ , prises d'informations extérieures ...), une transmission des informations dont la structure est essentiellement variable selon la forme, la nature, la répétition et la localisation des signaux, des organes moteurs musculaires dont la sortie peut être mesurée et des éléments à commander assimilés ici à des constantes /7/.

#### IV.3 - Caractérisation de la perception des stimulus

La fonction visuelle est caractérisée par trois variables essentielles (annexe A.4.1) : la détection, les entrées possibles, la perception liée à l'étage supérieur figure 4.4. Rappelons que l'attention du sujet a été assimilée à la "qualité" de la réponse principale, le critère choisi étant basé sur la valeur de l'erreur  $|\epsilon|$  principale (§ II.5).

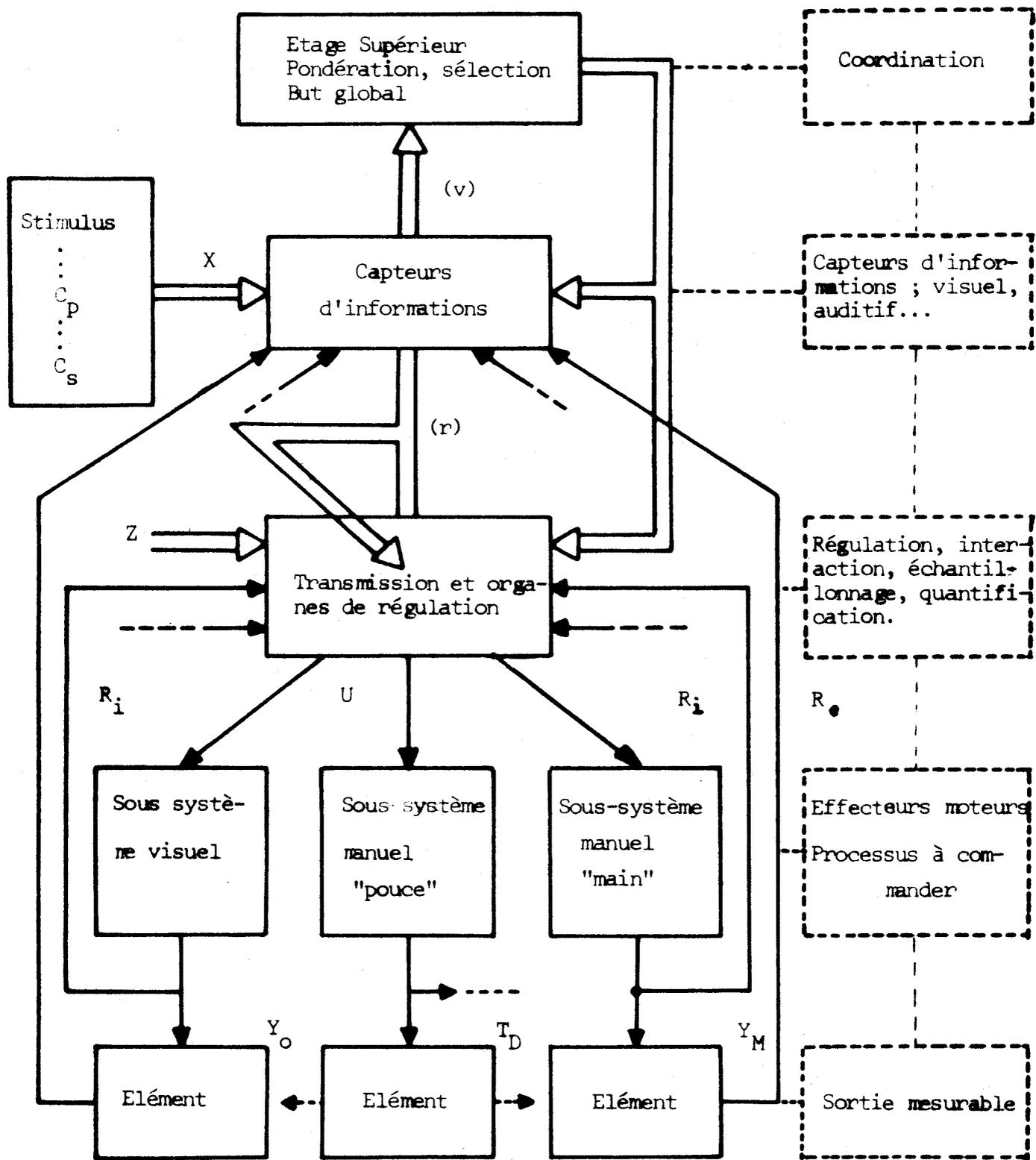


Figure 4.3 : Structure du modèle de l'opérateur humain  
( $R_i$  = retour interne,  $R_e$  = retour externe)

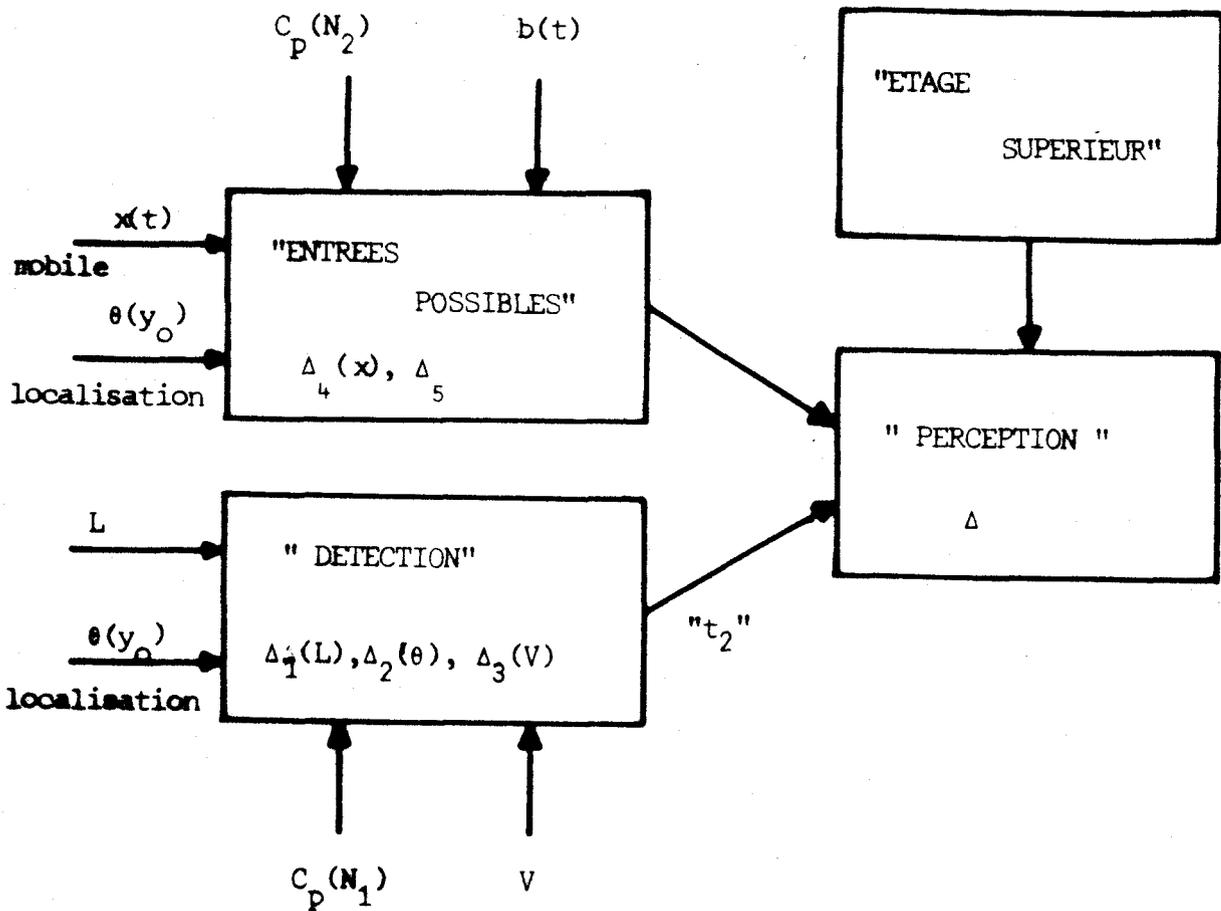


Figure 4.4 : Représentation du phénomène de la "détection" des stimulus.

a) Les phénomènes non linéaires apparus lors de l'analyse expérimentale (chapitre II), permettent de supposer pour la détection un seuil  $\Delta_1$  de luminosité /50/ fonction de l'angle latéral  $\theta$  ainsi qu'une propriété d'intégration à partir de laquelle une "impulsion" se déclenche, autorisant l'enregistrement possible d'une entrée. De plus le temps de détection étant sensible à la vitesse du mobile, ce paramètre est introduit dans le modèle par l'intermédiaire d'un coefficient fonction de la vitesse  $\Delta_3(V)$  - Il convient également de différencier un niveau "continu"  $N_1$  de charge de travail représentatif de la tâche demandée d'un niveau "discontinu"  $N_2$  fonction de l'attention de l'opérateur et d'une certaine activité corticale. L'annexe A41 démontre qu'une détection est possible à partir d'un instant  $t_2$  tel que :

$$t_2 = \frac{N_1(C_p)}{\Delta_3(V)} + \frac{\Delta_2(\theta)}{\lambda(\theta)}$$

$\Delta_2(\theta)$  = seuil rétinien fonction de l'excentricité du point image objet par rapport à la fovéa

$\lambda(\theta)$  = luminance perçue dans la direction  $\theta$

$$t_2 = f(C_p, \theta, l, V)$$

Cette valeur est fonction des paramètres expérimentaux et met en évidence d'une part une augmentation en fonction du niveau de travail et de l'angle latéral  $\theta$ , d'autre part une diminution en fonction de la luminance  $l$  ainsi qu'une variation avec la vitesse  $V$ .

Remarquons que " $t_2$ " simule la possibilité d'un enregistrement de l'entrée, autrement dit le point  $X_i$  peut être "vu".

b) Le bloc "entrées possibles" interprète les contraintes du système visuel sur les entrées appréhendées. Pour le modéliser nous faisons intervenir un seuil  $\Delta_4$  de déplacement et une limite  $\Delta_5$  représentative du champ visuel. De plus il est nécessaire d'introduire la position de l'oeil  $y_0$  et de supposer une entrée localisée au point  $X_i$  tel que :

$$X_i(t) = \theta_i + x_i(t)$$

$\theta_i$  = angle latéral de vision du mobile par rapport à la direction du regard.

$x_i(t)$  = déplacement du mobile à  $\theta_i$

Cette formulation présente en particulier l'intérêt de conserver la même structure du modèle lors d'une variation  $\theta_i$  du point  $X_i$  (figure 4.5)

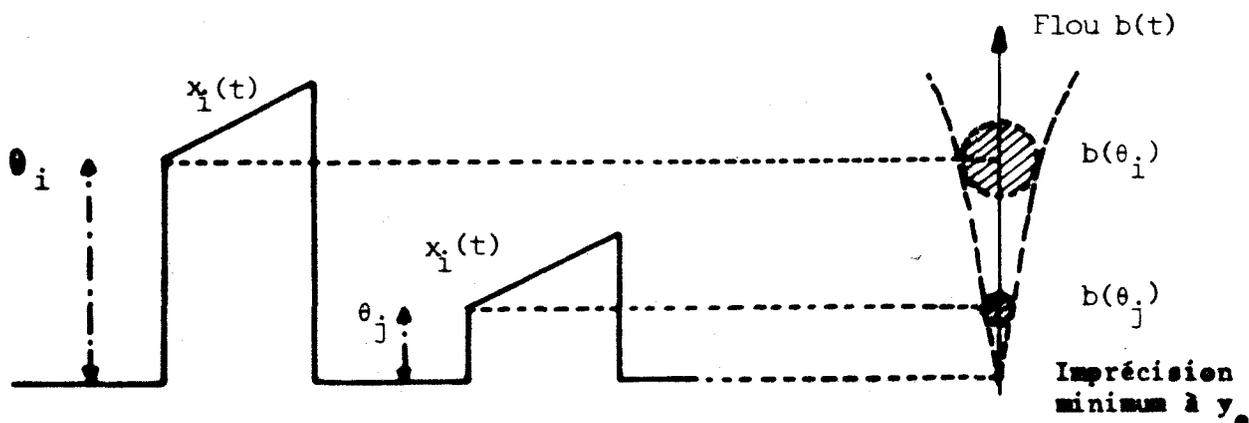


Figure 4.5 : Modélisation des entrées possibles

$y_0$  = axe du regard

$b(t)$  représentatif d'un "flou" associé à la détection du stimulus constitue l'image d'une imprécision sur la localisation du point cible.

Le seuil  $\Delta_4$  variable avec  $\theta$  peut être supérieur à l'amplitude du déplacement  $x(t)$  à partir d'un angle voisin de  $70^\circ$  ; l'opérateur se trouvant dans l'incapacité de restituer l'information relative à  $x_i$  peut néanmoins détecter la présence d'une cible dans une région "floue" centrée sur l'entrée  $\theta_i$  et non plus sur  $X_i(t) = \theta_i + x_i(t)$ .

L'intérêt de différencier  $x_i(t)$  et  $\theta_i$  dans le modèle réside encore dans la possibilité de conserver le même modèle lorsque la direction du regard coïncide avec celle de la tâche secondaire devenant alors tâche principale et entraînant :

- un seuil  $\Delta_4$  minimum (amplitude)
- $\theta_i = 0$  et  $X_i(t) = x_i(t)$
- un angle d'imprécision  $b(\theta)$  minimum (flou)
- un seuil  $\Delta_1$  très petit (luminance)
- un seuil  $\Delta_2$  très faible
- une valeur du paramètre  $\Delta_3$  quasi optimale.

c) Le sous-système "perception" lié à une décision de l'étage supérieur (seuil de décision  $\Delta$ ) interprète une prise d'information des entrées possibles enregistrées. En effet, nous avons distingué 6 cas différents de détection (chapitre II), ceux-ci peuvent aisément se simuler à l'aide de ces trois sous-systèmes.

- (1) Détection, enregistrement d'une entrée possible, sortie d'une réponse (cas normal)
- (2) Détection, enregistrement, problème (conflit) dans l'étage supérieur mais résolu après un temps d'hésitation, sortie d'une réponse (cas correspondant à une grande valeur de  $T_D$ , de  $R_0$  ou de  $R_M$ )
- (3) Détection, enregistrement, inhibition du phénomène de choix et de décision, pas de sortie (cas correspondant à un seuil de décision  $\Delta$  important et à une nécessité de localiser la cible dans un pistage extra-fovéal avant le premier essai).  
Néanmoins une réponse peut être obtenue en présence d'une intervention extérieure (question orale, bruit de l'imprimante).
- (4) Détection, enregistrement, inhibition
- (5) Détection ou non détection, pas d'enregistrement
- (6) Pas de détection.

La dissociation de la détection en trois sous-systèmes met l'accent sur la possibilité d'un enregistrement du "stimulus-déecté" sans pour cela entraîner nécessairement une réaction du sujet.

#### IV.4 - Echantillonnage des informations

L'annexe A.4.1 met en évidence les remarques expérimentales qui ont permis d'introduire un échantillonneur dans la fonction de transfert de l'opérateur, cette proposition tient compte du champ de vision du sujet et de la nature de l'information. Cette analyse indique une variation de la période  $T$  fonction de la vitesse de la cible,  $T$  varie de 0,3 à 0,2 seconde pour des vitesses allant de 50 à 200 mm/sec, et tend vers la valeur de 0,2 seconde (confirmation du théorème de Shannon ; en effet en vision frontale la fréquence limite manuelle  $f_{LM}$  voisine de 2,5 Hz,  $f_{LM} = \frac{1}{2T}$  conduit à  $T = 0,2$  seconde).

Une étude menée pour les réponses du sujet en vision extra-fovéale ( $35^\circ$ ) donne une variation de la période de 0,3 à 0,7 seconde, la même vérification au moyen du théorème de Shannon donne :

$$f_{LM} = 1 \text{ Hz} = \frac{1}{2T} \text{ et } T = 0,5 \text{ seconde}$$

Cette constatation ne doit pas être interprétée avec rigueur compte tenu de la dispersion des résultats obtenus, et l'identification ne donne que la valeur de la période minimum d'échantillonnage (se référer à l'annexe A.4.1).

Par combinaison d'un signal sonore, on relève une diminution de  $T$  voisine de 0,05 à 0,1 seconde dans les mêmes conditions de mesure. Indiquons que cette étude confirme le résultat expérimental de la valeur du retard pur introduit dans la chaîne de transfert du sujet,  $R_p$  est de l'ordre de 0,15 à 0,2 seconde.

Rappelons qu'en vision extra-fovéale, nous avons remarqué une non-réponse de l'opérateur lorsque le temps d'apparition du stimulus précédent  $t(x_{N-1})$  était inférieur à 0,5 seconde. Cette constatation est conforme à l'hypothèse d'un système échantillonné étant donné que celui-ci se trouve en "boucle ouverte" entre les instants d'échantillonnages, il ne peut alors y avoir de modification de la réponse relative au stimulus qu'après un second échantillonnage des informations d'entrée, décalé de 0,5 seconde (minimum). Il convient en outre d'indiquer que le phénomène d'échantillonnage est subordonné aux décisions de l'étage supérieur, lorsque la tâche est difficile.

En conclusion : Le phénomène d'échantillonnage dans la fonction de transfert de l'opérateur humain doit être introduit dans le modèle, car il est lié à la nature du stimulus (visuel ou auditif) et à la localisation de l'objet dans le champ visuel. Il convient alors de faire intervenir un "échantillonneur" supérieur" situé au niveau de l'étage supérieur dont la fonction est d'attribuer au modèle du sujet un comportement caractéristique de la nature et de la localisation du signal appréhendé par l'opérateur.

#### IV.5 - Poursuite manuelle en "boucle ouverte", introduction d'un gain variable

Il est intéressant de considérer dans quelle mesure une modification du protocole expérimental permet une identification du modèle de l'opérateur. Cette modification consiste à supprimer la connaissance de l'erreur visuelle existant entre la position du spot cible et celle du point suiveur. Ce comportement se situe dans un certain sens après celui correspondant à un pistage en vision extra-fovéale lorsque la connaissance de l'erreur est très imprécise. L'annexe A.4.2 présente les résultats de cette analyse et permet d'introduire dans le modèle un gain variable fonction de l'amplitude du stimulus, car la déviation de la main est relativement plus importante pour les stimulus en échelon de position de faible amplitude.

Signalons que la plupart des propriétés décelées au cours d'une poursuite manuelle en vision latérale se retrouvent dans ce protocole expérimental (en vision frontale et en "boucle ouverte") : erreur permanente considérable, effet de seuil et de saturation, absence de petites oscillations dans la trajectoire manuelle ...

#### En conséquence :

Compte tenu des hypothèses d'identification, la propriété de "gain variable" est "isolée" et introduite dans le modèle par un coefficient  $K_V$ , défini par le rapport de l'amplitude du mouvement manuel lorsque la boucle externe est ouverte à celle correspondant à l'entrée stimulus ; le rapport étant calculé en régime permanent. La même analyse a été réalisée pour les réponses obtenues en vision périphérique ( $35^\circ$ ).

Le domaine hachuré figure 4.6.a. illustre les variations de ce dernier rapport  $K_L$ .

On constate que les deux courbes  $K_V = f(A)$  et  $K_L = f(A)$ , concernant les mêmes sujets, ont une similitude de décroissance en fonction de l'amplitude A.

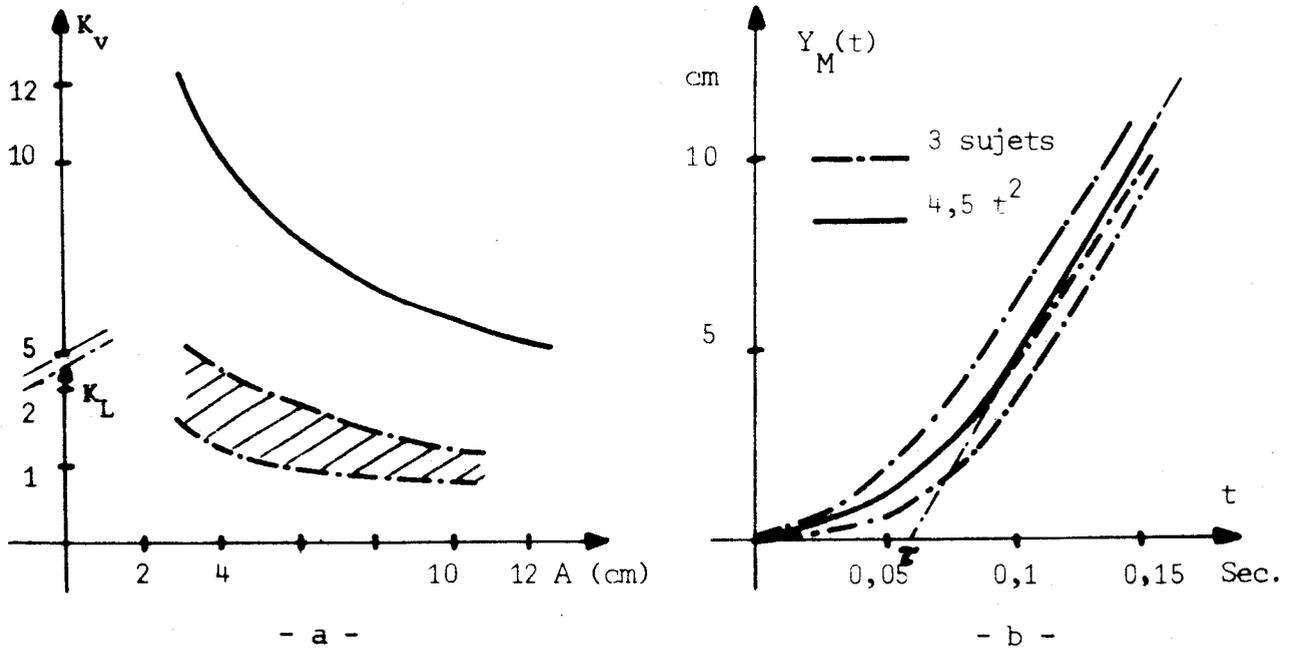


Figure 4.6 : Variation de  $K_V$  et  $K_L$  et relevé de quelques mises en action du sujet (figure 4.6.b). (entrée échelon de position)

Les rapports  $K_V$  calculés dans les mêmes conditions pour des stimulus sinusoïdaux donnent des résultats identiques (figure 4.6.a).

Par ailleurs, compte tenu de la notion de boucle ouverte au départ de la réaction manuelle conservant les mêmes caractéristiques quel que soit le protocole expérimental utilisé, on peut identifier la loi du mouvement manuel au démarrage par :

$$y_M(t) = 4,5 t^2 \quad t = (0 \quad 0,15 \text{ sec})$$

$$A = 60 \text{ mm}$$

Or si l'on se réfère à la courbe figure 4.6.a, on relève un gain  $K_V$  voisin de 7,5 pour la même amplitude  $A = 60 \text{ mm}$ . Rappelons qu'aux instants proches de la stabilisation de la main, le système n'est plus en boucle ouverte (retours Kines-thésiques, effets de consigne interne ...).

Compte tenu de l'introduction d'un échantillonneur dans le modèle et des résultats acquis en vision extra-fovéale, notre proposition consiste à considérer deux termes du premier ordre l'un présentant une très grande constante de temps assimilé à un intégrateur pur l'autre possédant une constante de temps  $\tau$  dont la valeur est déterminée par construction de la tangente à l'infini de la courbe représentative du déplacement manuel lors du démarrage (figure 4.6.b).

L'annexe A.4.2 propose une transmittance  $G(p)$

$$G(p) = \frac{K}{p(1+\tau p)}$$

$K$  = Gain variable figure 4.6.a

$\tau \approx 0,05$  à  $0,1$  seconde (figure 4.6.b)

Cette transmittance met en évidence une contradiction avec les résultats obtenus à propos de la période d'échantillonnage ( $T = 0,2$  seconde) ; cette contradiction peut être levée en supposant l'échantillonnage à période variable ; cette variation étant liée à la difficulté de la poursuite, autrement dit à l'erreur commise par le sujet.

#### IV.6 - Le système oculo-moteur

##### IV.6.1 - Mouvement de "va et vient" de l'oeil

Si l'opérateur reçoit deux stimulus  $X_1$  et  $X_2$  correspondant à deux déplacements indépendants sur l'écran de présentation des signaux situé en vision frontale, l'analyse des mouvements de l'oeil met en évidence un déplacement oculaire entre ces stimulus. Dans une tâche de **poursuite manuelle simultanée** qui exige un effort de la part du sujet, la main de celui-ci commande alors deux points (spots suiveurs) par l'intermédiaire des deux composantes du système mécanique solidaire du manche à balai : la première poursuit  $X_1$ , la seconde  $X_2$ . La fréquence de "va et vient" de l'oeil est liée à la complexité, à la fréquence du déplacement des stimulus et à la distance séparant les deux cibles. Les enregistrements montrent que le mouvement de l'oeil est davantage solidaire du stimulus plus rapide. Le mouvement manuel de l'opérateur est perturbé (il peut s'adapter grâce à la mémoire) mais on peut constater dans certains cas la succession de deux comportements principaux (figure 4.7) : l'un est représentatif d'une poursuite en vision fovéale, l'autre d'un pistage en vision extra-fovéale, l'oeil captant les informations d'une cible puis de l'autre.

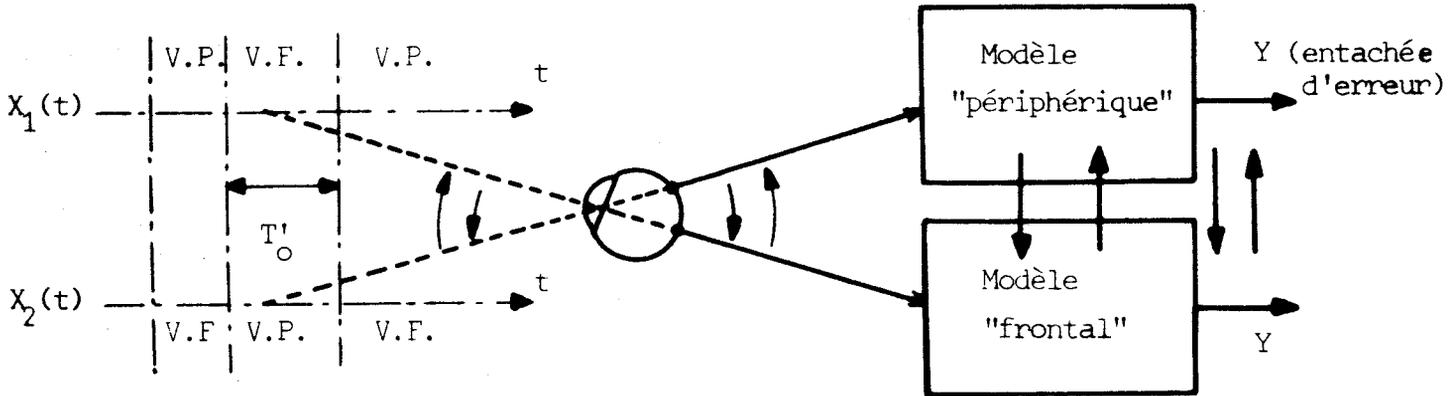


Figure 4.7 : Mouvement de va et vient de l'oeil et comportements de l'opérateur liés à la vision du mobile.

V.F. : vision frontale ; V.P. : vision périphérique

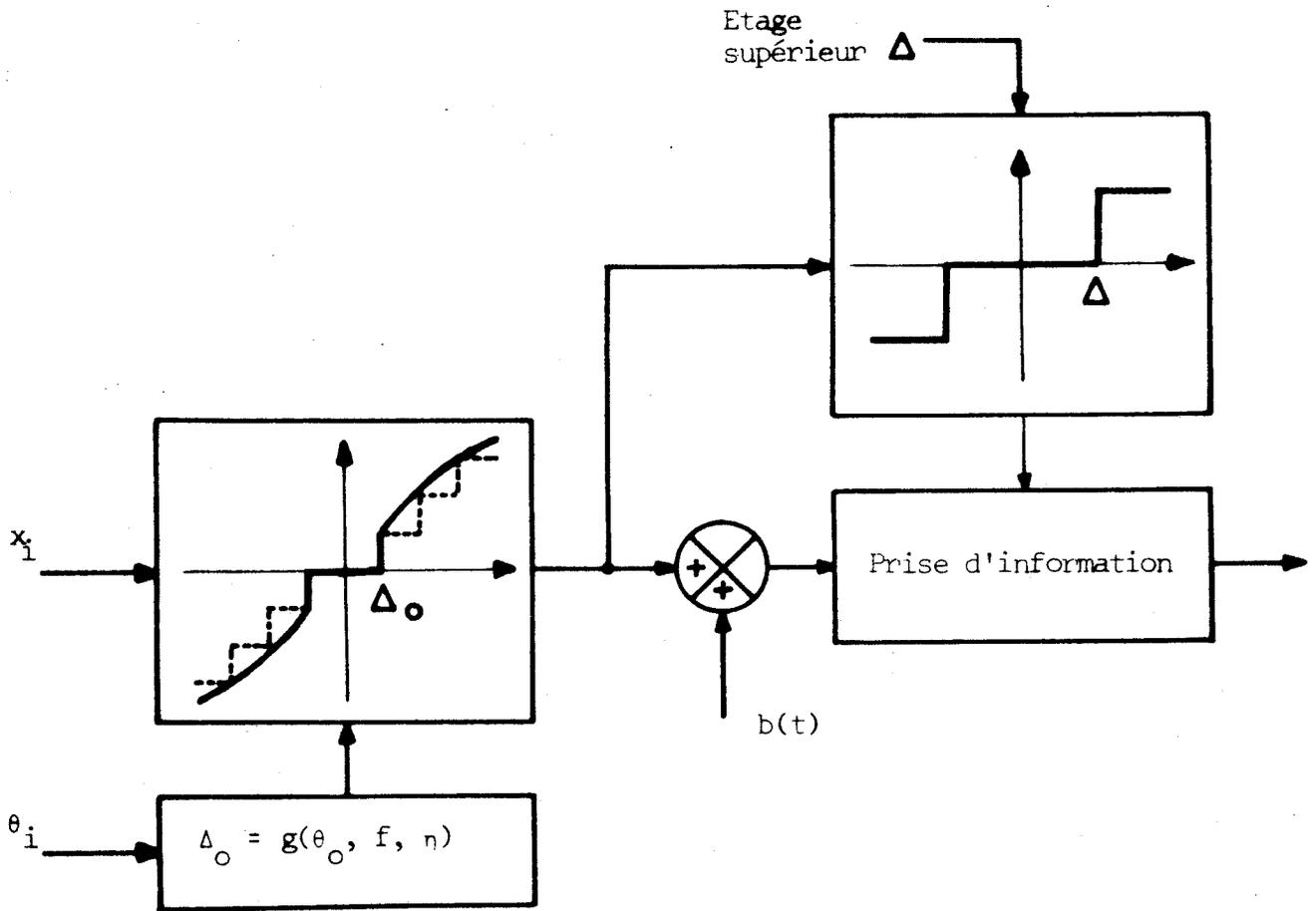


Figure 4.8 : Seuils d'une prise d'information liée à l'étage supérieur



Notons que le comportement de l'opérateur est variable selon l'individu et surtout selon le temps d'expérimentation.

En conclusion :

Cette expérience montre que le comportement du système humain correspond à un modèle "général" dont la structure est essentiellement variable en fonction de l'excentricité de l'image-stimulus sur la rétine par rapport à la fovéa. La période  $T'_0$  du mouvement de "va et vient" de l'oeil, de l'ordre de la seconde, n'est pas constante et tend à augmenter lorsque le sujet s'adapte au test.

*IV.6.2 - Capteur visuel*

Le capteur visuel par sa variation de sensibilité autour de la fovéa est essentiellement non-linéaire, et se trouve à l'origine d'une perte d'information /51/ lorsque la vitesse de la cible devient importante. De plus le comportement dynamique du système oculo-moteur amène à envisager une non-linéarité visuelle contenant un seuil  $\Delta_0$  variable en fonction de la vitesse du stimulus et de la localisation  $\theta_0$  du point image sur la rétine. Il est nécessaire en outre d'introduire dans cette caractéristique le phénomène de saturation pour de grandes amplitudes du stimulus.

Toutefois ces deux propriétés non-linéaires (seuil et saturation) ne permettent pas d'interpréter la totalité des phénomènes observés en particulier ceux relatifs à la vision périphérique et notamment le seuil de réponse.

L'annexe A.4.2 explicite notre proposition du choix d'une non-linéarité possédant non seulement un seuil et une saturation mais aussi un quantifieur, celui-ci ayant l'intérêt de mettre davantage en évidence le "paramètre" localisation du stimulus dans le champ visuel et illustrant la perturbation du système lorsque la perception du signal est "floue". Nous verrons par la suite que le choix de cette caractéristique non-linéaire sera confirmé dans l'étude des propriétés auto-adaptatives de l'opérateur humain. Outre ces aspects l'intérêt de cette représentation réside dans la possibilité de rappeler certaines notions physiologiques /52/ de transmission de l'information dans les neurones (seuil infra-luminaire, saturation ...).

En conclusion : Ces différentes propriétés peuvent s'interpréter au moyen du modèle de la figure 4.8 qui illustre les conditions d'une prise d'information.

Le seuil  $\Delta_0$  est défini par la relation :

$$\Delta_0 = g(\theta_0, f, \eta)$$

f : fréquence du signal d'entrée

$\eta$  : constante pouvant déclencher le phénomène non-linéaire du système visuel.

La relation entre fréquence de décrochage et amplitude du stimulus, vérifiée expérimentalement, peut s'expliciter de la manière suivante :

A un stimulus sinusoïdal, l'amplitude de la vitesse du signal est égale à :

$$a = A \omega \quad , \quad \begin{array}{l} A : \text{amplitude de l'entrée} \\ \omega : \text{pulsation du signal} \end{array}$$

le comportement non-linéaire est défini par :

$$\eta = 2 \pi A f_{do}$$

et le décrochage à la fréquence  $f_{do}$  est tel que :

$$f_{do} = \frac{\Delta_0(f_{do})}{2 \pi A}$$

Par ailleurs, le seuil de décision  $\Delta$  figure 4.8 intervenant dans l'étage supérieur peut s'exprimer :

$$N(E, A^T) > \Delta$$

$$E = \begin{bmatrix} V \\ L \\ C \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} N(V) \\ N(L) \\ N(C) \end{bmatrix}$$

N = fonction non-linéaire  
V = vitesse, L = luminance,  
C = charge de travail.

#### IV.6.3 - Système oculo-moteur en boucle fermée

Dans l'expérience correspondante les tensions représentatives du déplacement de l'oeil sont renvoyées sur les plaques de déviation de l'oscilloscope afin de rendre le déplacement d'un second point suiveur solidaire du mouvement de l'oeil. Nous avons alors trois points sur l'écran de présentation des signaux : "spot" cible, suiveur visuel, suiveur manuel.

L'examen des enregistrements (annexe A.4.2) met en évidence certaines caractéristiques non-linéaires du système visuel : les saccades du mouvement oculaire sont prononcées et l'on reconnaît une instabilité non seulement pour des signaux sinusoïdaux ou en dents de scie, mais aussi pour un échelon de position : le dépassement peut être très important. Par ailleurs on observe des arrêts dans le mouvement de l'oeil suivis d'un déplacement rapide, même lorsque la vitesse de la cible est très faible.

#### Conséquences

Cette analyse complète les précédentes et souligne le fait que le comportement "linéaire" du système visuel n'est en réalité qu'une approximation comme nous l'avons signalé. De plus elle illustre la présence d'une non-linéarité possédant un seuil représentatif d'un degré du comportement "volontaire" de l'homme.

Signalons que le décrochage visuel correspond à une fréquence plus faible,  $f_{do}$  voisine de 1,25 Hz et que la fréquence limite manuelle est plus petite, ( $f_{LM}$  de l'ordre de 1,5 Hz) ; la présence de trois points sur l'écran contribue probablement à ce phénomène. En outre, l'influence de l'amplitude est davantage marquée et l'on observe pour une amplitude divisée par deux (par rapport à la précédente) des fréquences  $f_{do}$  de 2 Hz et  $f_{LM}$  de 1,7 Hz pour les mêmes sujets. Les propriétés de "décoordination" oeil-main sont illustrées dans ces expériences chez certains sujets par les résultats suivants :  $f_{LM}$  peut être inférieure ou supérieure à  $f_{do}$  (ce que n'ont pas révélé les analyses précédentes) ; la poursuite visuelle peut s'effectuer après un premier décrochage et l'on a observé des oscillations jusqu'à 5 Hz ; et le pistage manuel se prolonge après une première désynchronisation avec la fréquence du signal quand le système visuel est "décroché".

#### IV.6.4 - Conclusions

Ces différentes expériences d'identification de la structure du système visuel aboutissent à la proposition du schéma fonctionnel figure 4.9 où l'effecteur moteur et l'objet conservent leurs caractéristiques quelle que soit l'image extérieure. Le "régulateur" joue un rôle principal dont les paramètres sont essentiellement variables en fonction de l'excentricité du point image-stimulus sur la rétine par rapport à l'axe optique et des caractéristiques du point vu (luminosité, contraste). Par ailleurs, la nécessité d'introduire l'étage supérieur s'est révélée impérative si l'on considère plusieurs stimulus situés dans le champ visuel de l'opérateur.

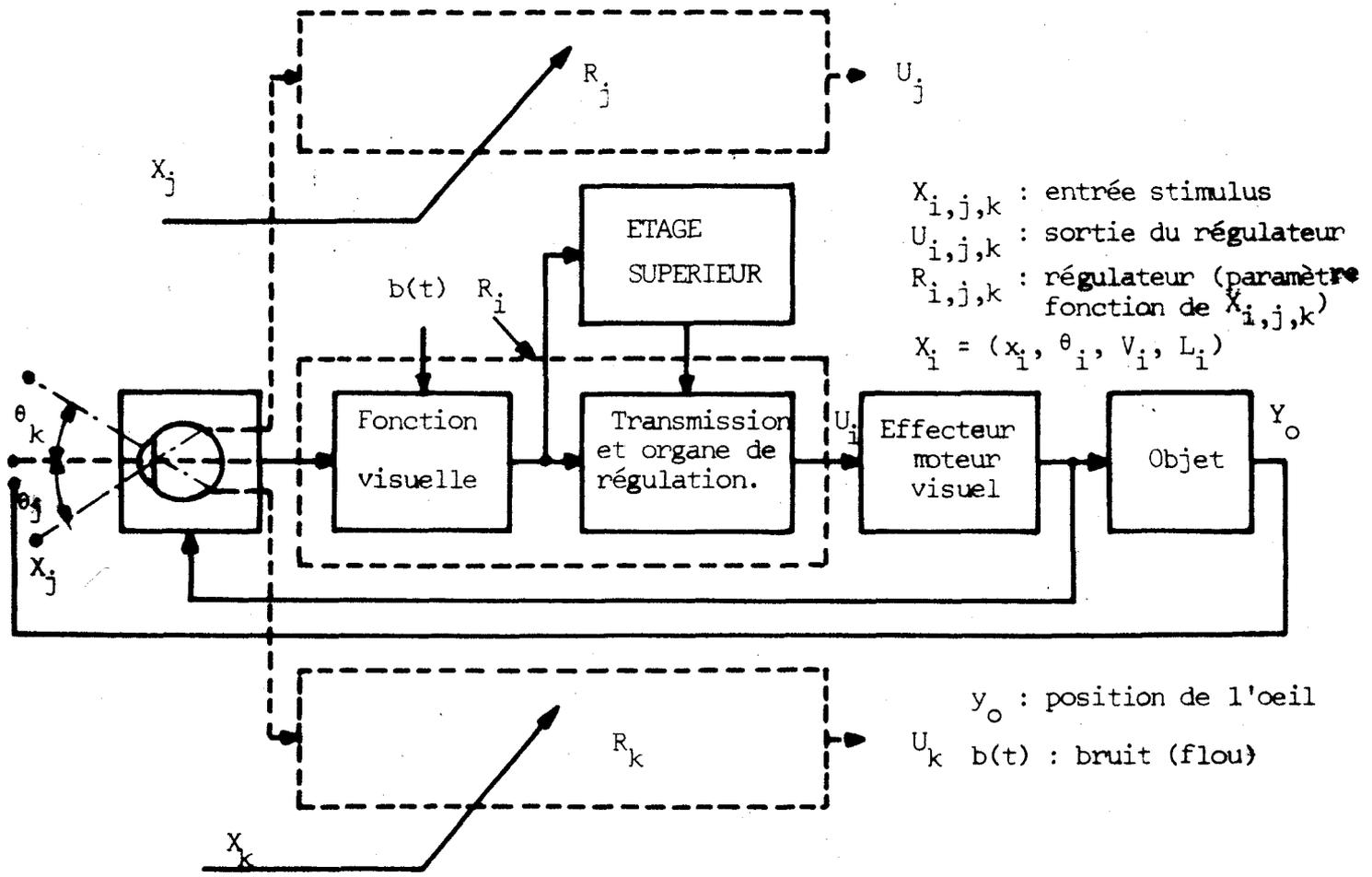


Figure 4.9 : Modèle fonctionnel du système visuel

Cette représentation repose sur les notions physiologiques du système visuel en supposant le principe de fixation du regard sur un point  $X_i$  du champ de vision. A un instant donné ou plus exactement pendant un intervalle de temps le déplacement ou la fixation de l'oeil  $y_o$  est "lié" principalement au stimulus choisi. L'étage supérieur ou la présence d'autres stimulus de caractéristiques données peuvent être la cause d'une modification de la "commande" du système oculo-moteur vers un autre point  $X_j$ . Nos différentes expériences (explicitées davantage dans l'annexe A.4.2) amènent à proposer une relation "globale" entre le point  $X_{ic}$  choisi et les caractéristiques des stimulus.

$$X_{ic} = f \left[ X(t), \frac{d X(t)}{dt}, \theta, L, C, \Delta \right]$$

Notons par ailleurs que l'influence du paramètre vitesse de la cible s'est révélée importante non seulement en vision frontale avec un ou plusieurs stimulus (§ IV.6.1) mais encore en vision périphérique. Il est difficile de situer cette "influence" dans la chaîne de transfert des informations (rétine, train d'impulsions, cortex, effecteur...). Notre proposition (se référer à l'annexe A.4.2) consiste à moduler certains paramètres du modèle (le seuil de la non-linéarité, la période d'échantillonnage en particulier) et à introduire un contrôle tachymétrique en considérant les propriétés des retours kinesthésiques pouvant renseigner l'opérateur "en position" et en "vitesse".

#### IV.7 - Action du système auditif sur le comportement de l'opérateur

Les saccades plus importantes lors d'un changement du signe de la dérivée du signal et le dépassement plus grand à un échelon de position dans les réponses manuelles de l'opérateur (§ IV.1.1.2) amènent à introduire un "gain"  $K$  plus important que celui représentatif d'une réaction à un stimulus lumineux. Par ailleurs l'identification de la période minimum d'échantillonnage du système humain fait apparaître une période  $T$  plus courte lors de la combinaison d'un signal sonore, (diminution de l'ordre de 0,05 à 0,1 seconde par rapport à celle correspondant à des stimulus visuels). Cette dernière constatation est en contradiction avec nos suppositions basées sur le théorème de Shannon étant donné que la fréquence limite de la main est du même ordre de grandeur et parfois plus faible que celle relevée avec un signal lumineux. Ceci nous amène à vérifier la contribution du stimulus sonore lors d'une poursuite manuelle par l'expérience suivante :

si nous supprimons l'information sonore  $\epsilon_a$  juste après le départ de la réaction manuelle nous constatons que la trajectoire manuelle à un stimulus en échelon de position se trouve inchangée. Ce protocole tend dans ces conditions à ne donner à l'opérateur qu'un renseignement de forme impulsionnelle permettant d'indiquer au sujet la modification de position du stimulus. L'annexe A.4.2 présente ces résultats et permet de proposer une structure du système manuel comparable à celle obtenue à partir de signaux visuels, mais en introduisant une deuxième afférence dans le modèle possédant une non-linéarité à seuil  $\Delta_a$  ; cette boucle "auditive" agit principalement sur la période d'échantillonnage, ainsi que sur le gain du modèle figure 4.10.

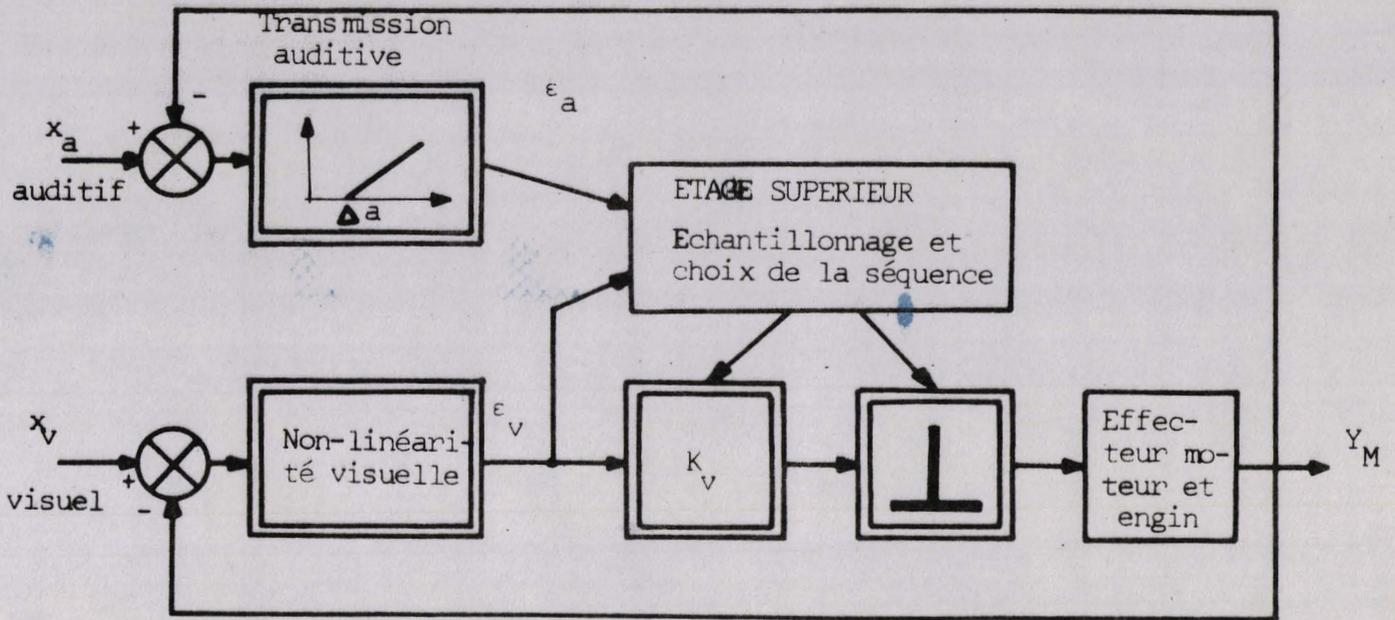


Figure 4.10 : Interaction de l'information auditive sur le modèle de l'opérateur humain réalisant un travail manuel

En conséquence :

Il faut prévoir dans l'étage supérieur un système capable de choisir le mode de "régulation" en fonction des entrées fournies à l'opérateur, ce régulateur agissant sur la gain  $K_v$ , la période  $T$  de l'échantillonneur et sur la valeur du temps de latence  $R_M$  principalement. La simulation du modèle a permis de constater que la valeur du seuil de la non-linéarité de la boucle "auditive" pouvait être important, le "contrôle" auditif étant prédominant au démarrage de la main uniquement ; la relation fonctionnelle reliant ces deux modes étant alors caractérisée par :

$$y_M(t) = f \left[ \begin{array}{l} (R_M, T, K_v)^a \\ 0 \text{ à } t' \end{array} , \begin{array}{l} (K_v, T)^v \\ t' \text{ à } \infty \end{array} , \right]$$

$$R_M \leq t' \leq R_M + t_{mM} ; a = \text{auditif}, v = \text{visuel}$$

L'instant  $t'$  défini par l'étage supérieur

$$\epsilon_a = \Delta_a = x_a - y_M(t')$$

Cette proposition a l'intérêt de reposer sur le principe physiologique de la transmission différente des informations visuelles et auditives amenant à envisager des modifications des coefficients du régulateur tout en conservant le même effecteur moteur manuel.

IV.8 - Caractérisation de l'excentricité de l'image stimulus sur la rétine

Nous terminons ce chapitre par ce dernier point dans un esprit de synthèse permettant de montrer l'influence ou la perturbation amenées par une excentricité de l'image stimulus sur la rétine /53/.

Les différentes analyses présentées conduisent à l'énoncé suivant : l'information  $x$  perçue si son amplitude dépasse le seuil visuel  $\Delta_0$  (physiologique) est entachée de bruit  $b(t)$  (le flou étant d'autant plus grand que l'excentricité est importante) ; le sujet vise alors un point choisi dans une région localisée si la quantité d'informations dépasse le seuil de réponse  $\Delta$  lié au phénomène de décision ; nous obtenons une réponse du système humain entachée plus ou moins d'erreur fonction de cette excentricité. Nous avons vu que celle-ci agissait sur le temps de latence, la période d'échantillonnage, le gain, les seuils et saturations ...

Notons par ailleurs que la transmittance  $G(p) = \frac{K_V}{p(1+\tau p)}$  est en accord avec les résultats expérimentaux obtenus en vision périphérique en supposant une prise d'information enregistrée, un comportement "cortical" et un phénomène de consigne interne.

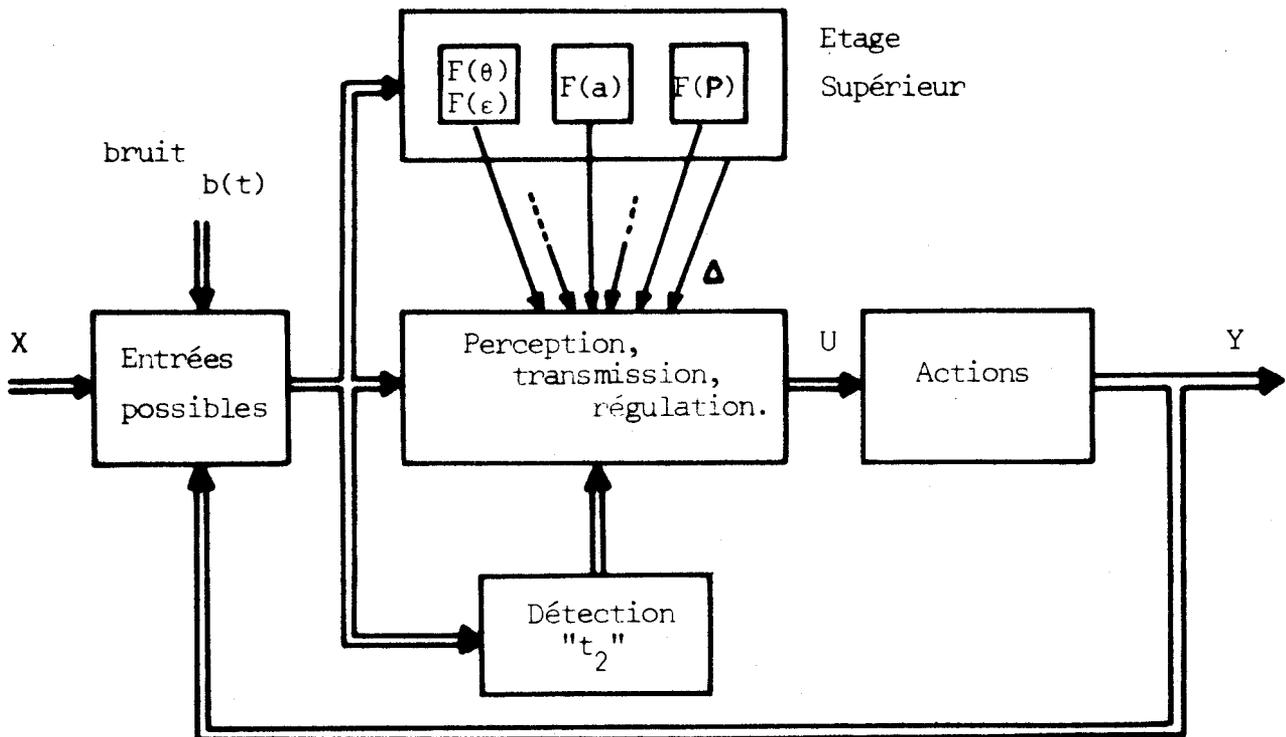


Figure 4.11 : Influence des principales interactions sur la structure du système humain.

#### IV.9 - Synthèse et conclusions

L'opérateur mathématique reliant les variables d'entrée X et de sortie Y doit introduire les différentes relations fonctionnelles explicitées et qui font intervenir les principes fondamentaux suivants :

- . continuité des phénomènes observés en visions frontale et périphérique, modification des valeurs des paramètres du système humain en fonction de l'excentricité de l'image stimulus par rapport à l'axe optique :  $F(\theta)$ ,  $F(\epsilon)$  (figure 4.11).
- . interaction entre les systèmes visuel et auditif :  $F(a)$
- . possibilités d'obtenir diverses réponses du système à une même entrée X : introduire du bruit  $b(t)$ .
- . influence prédominante du régulateur central, le cerveau, amenant à considérer un étage supérieur ; pondération P attribuée aux différents stimulus :  $F(P)$  (tâches principale, secondaire).
- . appréhension des entrées liées à une incertitude en dessous de laquelle il ne peut pas y avoir de réponses : seuil  $\Delta$ .

En d'autres termes, à un ensemble d'entrées possible correspond une action soumise aux contraintes  $F(\theta)$ ,  $F(a)$ ,  $F(P)$ ,  $\Delta$ .

Du modèle général (figure 4.11) découle un ensemble de modèles représentatifs plus particulièrement d'un comportement donné, les figures 4.12 a et b illustrent l'un d'eux.

#### Conclusions

L'analyse du système visuel fait apparaître une distinction entre la fonction visuelle en tant que capteur d'informations et le système oculo-moteur permettant une réception optimale du stimulus. Si cette dernière propriété n'est pas satisfaite, le trajet des informations captées est perturbé et la sortie du système manuel est entachée d'erreur.

Le modèle du système humain contient la "fonction visuelle" elle-même avec ses non-linéarités et les différentes propriétés définies dans ce chapitre, le système oculo-moteur est considéré comme un sous-système du comportement de l'opérateur humain non lié aux réactions manuelles (décoordination des systèmes).

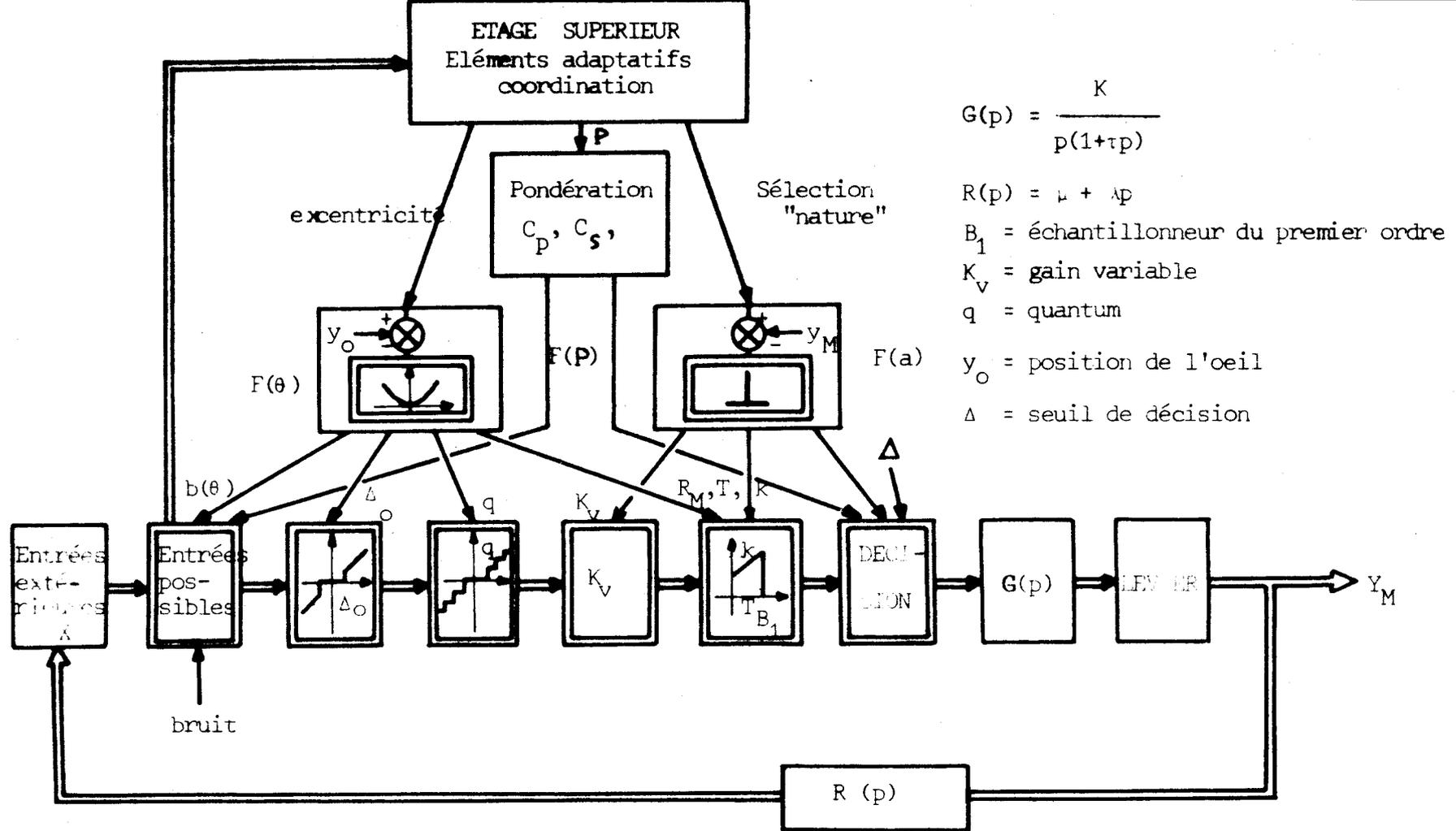


Figure 4.12 (a) : Modèle de l'opérateur humain effectuant un travail manuel.  $R_M$  = temps de latence ;  $T$  = période d'échantillonnage ;  $\Delta_0$  = seuil visuel ;  $b$  = bruit ;  $F(\theta)$  = excentricité ;  $F(P)$  = pondération ;  $F(a)$  = sélection "nature"



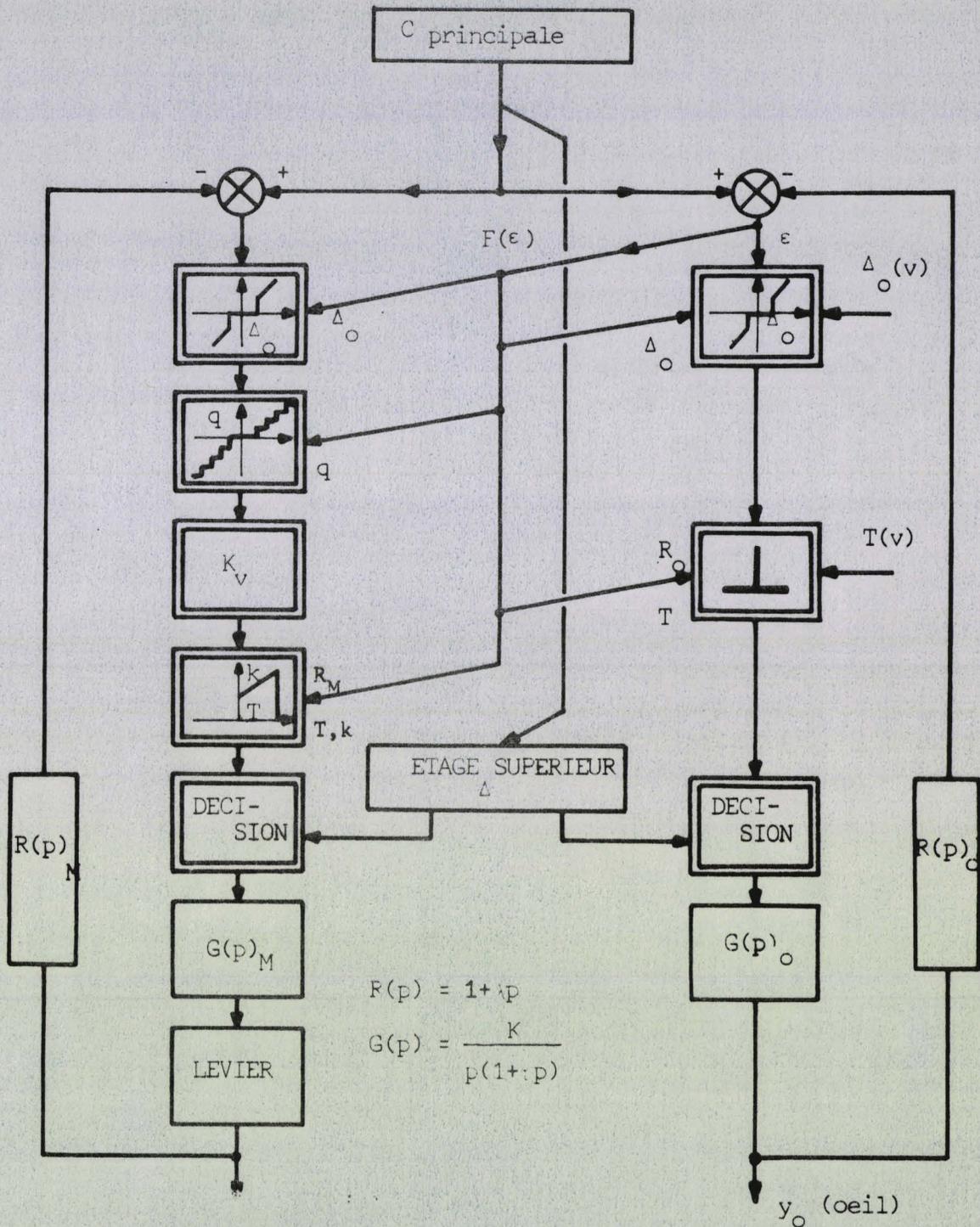


Figure 4.12 (a) : Réponse d'un système à une stimulation simultanée

oeil-main d'un stimulus "lumineux" en vision frontale.

$\Delta_0$  = seuil visuel ;  $q$  = quantum ;  $R$  : temps de latence ; indice  $c$  = manuel ;  $V$  = vitesse du stimulus ;  $\epsilon$  = erreur.

Le modèle de l'homme réalisant un travail peut être classé dans la classe des systèmes non-linéaires, discrets, auto-adaptatifs et multivariables, la caractérisation des réponses étant essentiellement fonction de la localisation, de la nature et de la pondération des entrées ; l'échantillonnage des informations pouvant être non seulement réflexe mais aussi volontaire et lié à l'étage supérieur.

Le chapitre suivant expose les propriétés adaptatives de l'homme et illustre la simulation d'un algorithme d'apprentissage de l'opérateur en vision extra-fovéale, les données de ce chapitre sont introduites dans le modèle en définissant la fonction "floue" et l'étage supérieur.

Chapitre V

MODELES ADAPTATIFS DE L'OPERATEUR HUMAIN

Les analyses précédentes révèlent le comportement adaptatif de l'opérateur humain lié aux différents modes d'estimation effectués au niveau du cerveau. Ceux-ci ont pour but essentiel d'identifier l'action extérieure et d'élaborer une commande interne permettant à l'opérateur d'améliorer la réponse correspondant au travail demandé. Cette étude souligne la "variabilité" des réactions de l'homme en fonction de la nature du stimulus, de sa forme, de sa localisation dans le champ visuel et des caractéristiques propres au signal (luminosité, contraste, vitesse ..) Notre interprétation est basée sur l'introduction dans le modèle précédent d'une fonction "floue" et d'un étage supérieur élaborant des corrections adaptées.

V.1 - Aspects prédictifs de la réponse de l'opérateur et caractéristique de l'échantillonneur

Les diverses réponses du système humain (annexe A.5) mettent en évidence une anticipation du mouvement de l'oeil ou de la main, au cours d'un travail donné fonction non seulement du temps de présentation des signaux et du degré de complexité de la tâche à réaliser mais aussi de l'amplitude des déplacements du stimulus. Toutefois la simulation sur ordinateur du système visuel (annexe A.5) révèle que l'introduction de cette propriété relative à l'amplitude du déplacement de la cible dans le modèle au moyen d'un échantillonneur du premier ordre ( $B_1$ ) n'apporte que peu d'amélioration à propos de l'erreur existant entre les réponses du modèle et celle du système oculo-moteur ; les mouvements oculaires étant en effet peu amples dans nos conditions expérimentales (de quelques degrés à six environ). Par contre, dans le modèle du système manuel l'adjonction d'un terme "prédictif" simulé à l'aide d'un échantillonneur du premier ordre ( $B_1$ ) amène une nette diminution de l'écart entre les sorties : Homme-modèle (Annexe A.5). Cette prédiction s'exprime au moyen de la relation :

$$y_{nT+t} = \alpha(G) \left[ \epsilon_{nT} + \frac{k}{T} (\epsilon_{nT} - \epsilon_{(n-1)T}) \right]$$

$\alpha(G)$  = transmittance non-linéaire de l'opérateur (fig. 4.12)

$\epsilon_{nT}$  = erreur manuelle commise à l'instant  $nT$

$k$  = coefficient proportionnel à l'anticipation fonction de l'apprentissage du sujet.

La période d'échantillonnage  $T$  est fonction de l'angle latéral de vision de l'objet et de la nature du signal d'entrée (chapitre IV).

Caractéristiques de l'échantillonneur introduit dans le modèle du sujet en vision périphérique : Rappelons que dans ces conditions expérimentales l'identification du comportement de l'homme a révélé (chapitre III.2) la nécessité d'un "calcul interne" avant une mise en action de la main ; le processus d'action étant basé sur une prise d'information pendant une séquence de travail estimée à la période d'échantillonnage et égale à environ 0,5 à 1 seconde. Ceci peut s'interpréter selon la figure 5.1 en mettant en évidence pendant la séquence  $T$  la prise d'information  $T_i$  ainsi que l'intervalle de temps  $T - T_i$  où le système peut être considéré comme "ouvert" (chapitre III.2) pendant l'élaboration des consignes internes destinées à corriger l'essai suivant. Indiquons que la prise d'information est liée à la quantité de "flou" (§ suivant V.2), notion liée à une période  $T$  variable en fonction de l'apprentissage (petite correction pendant une même stabilisation manuelle à un stimulus § III.2)

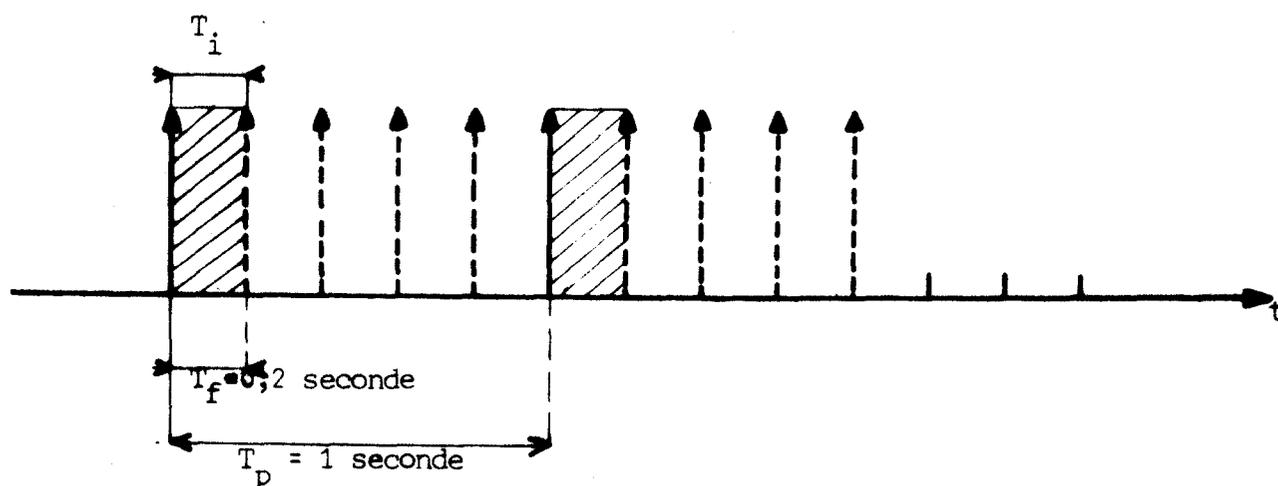


Figure 5.1 : Echantillonnage et prise d'information.

La simulation sur ordinateur hybride en accord avec nos résultats expérimentaux indique un temps de prise d'information voisin de  $T_i = 0,2$  seconde (Annexe A.5). Or les périodes d'échantillonnage des systèmes manuels en vision frontale  $T_f$  et périphérique  $T_p$  sont respectivement de l'ordre de 0,2 seconde et 0,5 à 1 seconde (chapitre IV). On peut alors supposer un temps de prise d'information  $T_i$  pratiquement identique dans les deux cas, la variable modifiée étant la valeur de l'intervalle de temps séparant ces prises d'informations fonction des temps nécessaires aux calculs internes et aux temps de décision.

$$\frac{T_i}{T_f} \text{ proche de } 1 \text{ en vision frontale}$$

$$\frac{T_i}{T_p} \text{ voisin de } 0,2 \text{ à } 0,4 \text{ en vision latérale } \theta = 35^\circ$$

Ces résultats apparus lors de la vérification des données expérimentales sur le modèle simulé sur ordinateur sont toutefois difficilement interprétables du point de vue physiologique. Néanmoins on peut supposer que l'effort de "localisation" et de "calcul" effectué par l'opérateur amène une perte de l'information en provenance directe de l'entrée, entraînant une propriété relative à un système en boucle ouverte par rapport à ces entrées pendant l'intervalle de temps  $T - T_i$ .

#### En conclusion :

Ces considérations ajoutées à celles concernant les différentes valeurs de la période d'échantillonnage, du temps de latence, du gain variable ... fonction de la nature des signaux (chapitre IV) conduisent à imaginer dans l'étage supérieur (figure 4.12) du modèle du régulateur humain un second "niveau" adaptatif situé au dessus de celui ayant le rôle de sélectionner et de capter les informations d'entrée ; le but global /54/ du système humain étant défini en outre par un étage de coordination des différentes actions effectuées par l'opérateur réalisant le travail demandé. Nous aboutissons alors au concept de système hiérarchisé /55/ (Annexe A.5).

#### V.2 - Fonction "floue"

Pour une fixation visuelle correspondant à une direction du regard  $y_0$ , introduisons dans le champ visuel de l'opérateur un ensemble de points  $X_i$  représentatif des tâches principale et secondaire.

Celui-ci est capté par une rétine supposée parfaite, équivalente au champ de vision possible (chapitre II) et matérialisée par un ensemble image  $r_i$  des points  $X_i$  (figure 5.2) tel que :

$$r_i = F_i \left( x_i, \frac{\partial x_i}{\partial t}, L_i \right) = F_i(X_i)$$

$x_i$  = image du point extérieur  $X_i$  sur la rétine

Le plan de référence est défini par la direction du regard (vers la région de la tâche principale) ainsi que par la position des deux fovéas.

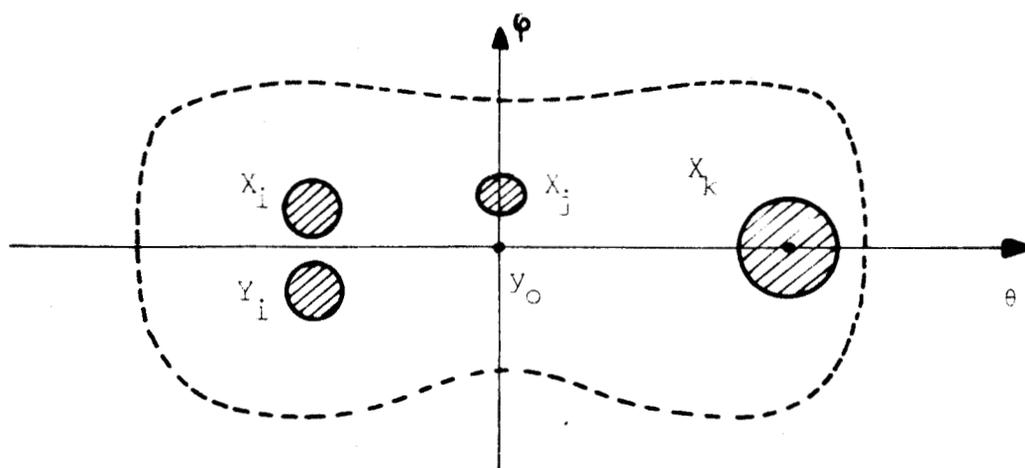


Figure 5.2 : Rétine équivalente au champ de vision

Dans un test de pistage manuel d'un stimulus  $X_i$ , on a alors :

Point objet :  $X_i \rightarrow r_i = F(X_i)$

Point suiveur:  $Y_i \rightarrow r_i = F(Y_i)$

le résultat de la visée de l'opérateur est mis en évidence dans l'ensemble flou /56/ :

$$F(X_i) \cup F(Y_i)$$

avec  $F(X_i) \cap F(Y_i) \neq \phi$

En conséquence, tant que  $F(X_1) \cap F(Y_1) = \emptyset$  le sujet est sollicité à corriger son action  $Y_1$  au cours de ses actions répétées (chapitre III.2) et à s'adapter à l'environnement extérieur. L'effet adaptatif des réponses de l'opérateur (diminution de l'erreur permanente, du temps de latence ...) consiste à minimiser cet ensemble flou de manière à obtenir  $X_1 = Y_1$ . Il est difficile d'apporter davantage de rigueur dans cette interprétation compte tenu des connaissances du phénomène /56/ et de la dispersion relative aux sujets. Toutefois nous pouvons prétendre que la quantité de "flou" associée à l'image  $x_1$  du point  $X_1$  est essentiellement fonction des coordonnées et de la luminosité du point  $X_1$  (chapitre II) ; l'imprécision étant minimum quand  $x_1$  est proche de la fovéa et maximum lorsque  $x_1$  se trouve aux limites du champ visuel. Les résultats précédents conduisent à proposer une fonction  $F(X_1)$  basée sur la formulation du temps de détection  $T_D$  d'un mobile dans le champ latéral de l'opérateur et à ne considérer que la variable  $\theta_1$  pour la détermination de  $F(X_1)$  ; l'angle  $\varphi_1$  (figure 5.2) très faible dans nos conditions expérimentales par rapport à  $\theta_1$  permet de supposer une symétrie locale des propriétés de la rétine (annexe A.5).

$$r_1 = F(\theta_1) = \frac{K_1'(\theta_1)}{K_2'^2(\theta_1) - \theta^2}, \quad F(\theta_1) > 0 \text{ et } |\theta_1| < K_2'$$

Il convient en outre d'introduire un seuil au dessus duquel la quantité d'information est insuffisante pour déclencher une prise d'information (cas des non-appuis manuels et des non-réponses en vision périphérique).

$$|F(\theta_1)| < \delta(\theta_1) \text{ Fonction essentiellement de l'aptitude de l'opérateur au travail.}$$

### V.3 - Pondération des tâches

Les conditions de travail du sujet introduisent une contrainte liée à l'exécution prioritaire de la tâche principale qui intervient par l'intermédiaire d'une pondération (figure 4.12) de l'ensemble des points  $X_1$  attribuant à ceux-ci une échelle de priorité de choix amenant une décision de mise en action, (celle-ci peut être fonction des coordonnées des  $X_1$ , de leur luminosité  $L_1$ , de leur couleur, ...). Compte tenu de nos conditions d'expérience la pondération des points  $X_1$  est naturellement liée à la coordonnée latérale  $\theta_1$  des points objets étant donné que le sujet oriente son regard vers la région privilégiée de l'espace où se déroule la tâche principale  $C_p$  de travail.

Or nous avons vu (chapitre II) que cette priorité d'action pour la tâche  $C_p$  n'était pas systématique, elle peut fluctuer selon l'attention que porte le sujet à son travail. La solution proposée consistait alors à considérer un critère de pondération associé à l'erreur  $|\epsilon|$  consécutive à l'exécution de la tâche principale. Afin d'effectuer une simulation du phénomène nous avons choisi:

- $|\epsilon| < \epsilon_1 = 5\%$  entraîne une priorité d'action à  $C_p$  amenant une diminution de la performance de l'opérateur concernant la tâche secondaire de 10% (augmentation de  $T_D$  de 10%)
- $|\epsilon| > \epsilon_2 = 10\%$  (saccade, inattention) provoque une priorité de correction (si le sujet s'en aperçoit) à la tâche principale  $C_p$ . Ceci provoque une diminution de la performance du sujet par rapport à sa tâche secondaire de 10%.
- $\epsilon_1 \leq |\epsilon| \leq \epsilon_2$  (état de "moyenne" attention) amène une pondération pouvant dans certains cas rendre prioritaire la tâche secondaire et entraîner un conflit dans le processus d'action.

Notons que lors d'un conflit nous attribuons, étant donné nos conditions expérimentales, la priorité à  $C_p$  par rapport à  $C_s$ .

Définissons alors une fonction de satisfaction  $\tau_s$  indiquant la possibilité d'un choix de l'opérateur,

$$\tau_s \quad C \quad g = F(\theta_i) \times P(\epsilon)_{y_0}$$

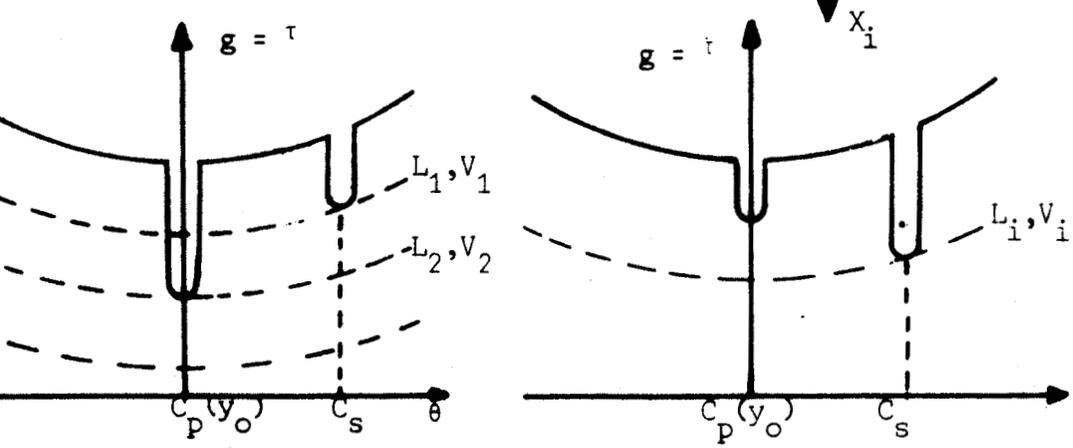
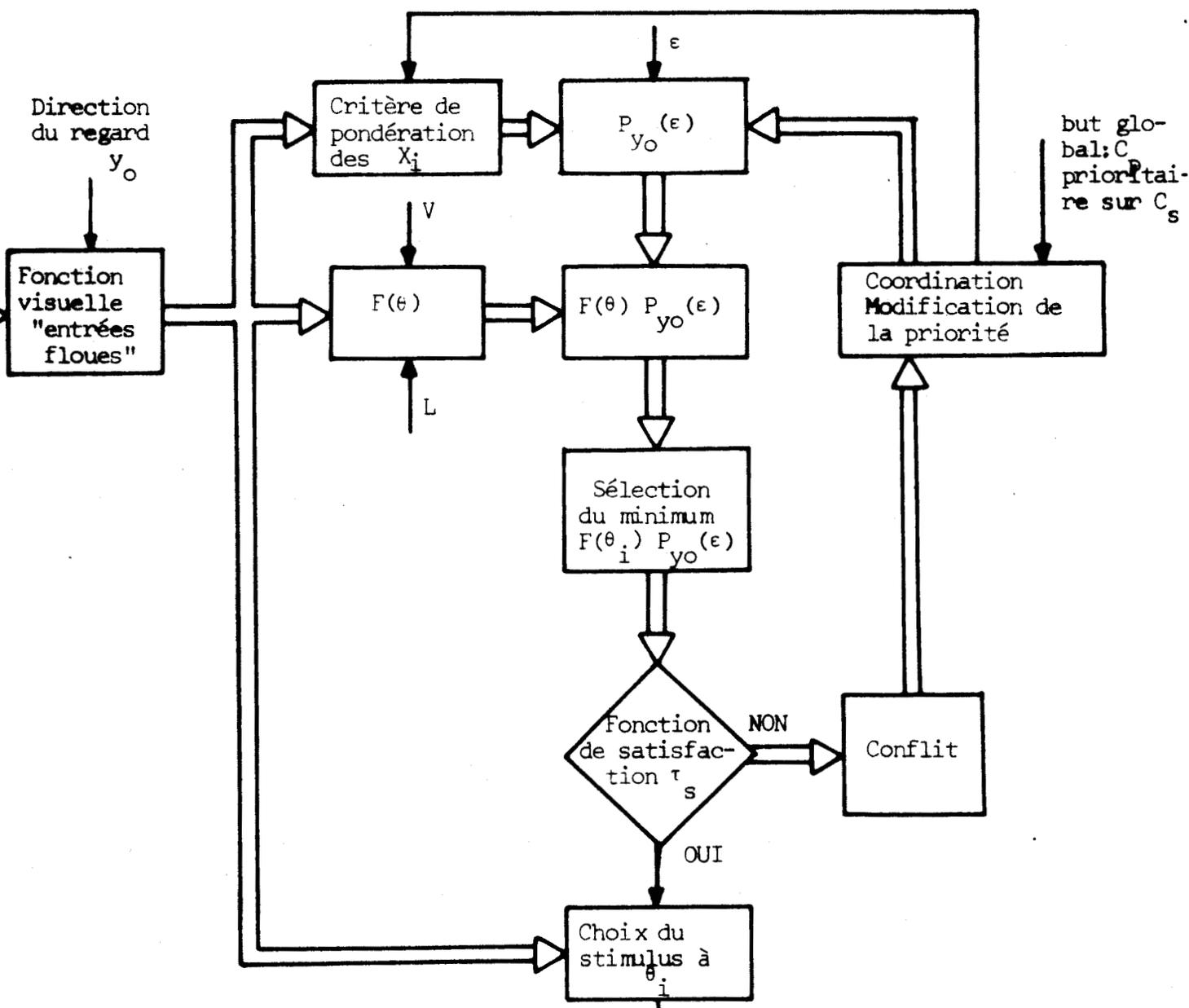
$F(\theta_i)$  : fonction floue précédente

$P(\epsilon)_{y_0}$  : Pondération relative à la tâche principale située en vision frontale à  $\theta_i = 0$  (direction du regard  $y_0$ )



les fonctions  $\tau_s$  représentent un sous-ensemble des fonctions  $g$  n'amenant qu'un seul minimum absolu, autrement dit le processus d'action n'entraîne pas de conflit; une intervention du "coordinateur" figure 5.3 attribuant la priorité à  $C_p$  lors d'un conflit (annexe A.5). Ces considérations peuvent s'interpréter par l'intermédiaire du schéma de la figure 5.3.

En résumé : Cette représentation (figure 5.3) met l'accent sur une propriété importante des actions de l'homme réalisant un travail : le résultat d'une action est subordonné à des contraintes sur les actions possibles et basé sur une estimation des entrées (se référer § III.2).



$|\epsilon| > \epsilon_2$   
 $|\epsilon| < \epsilon_1$   
 $g(C_p) < g(C_s)$   
 Priorité à  $C(p)$

$\epsilon_1 \leq |\epsilon| \leq \epsilon_2$   
 $g(C_p) > g(C_s)$   
 Priorité à  $C_s$



Figure 5.3 Processus de mise en action de l'opérateur et représentation de quelques situations possibles.

V.4 - Algorithme d'apprentissage de l'opérateur humain en vision périphérique

L'annexe A.5 expose d'une manière plus complète notre proposition basée sur un dispositif réalisant un choix  $X_i^j$  de l'entrée bruitée  $X_i$  (floue) et une "adaptation" ayant pour but de donner la meilleure image possible de l'information  $X_i$  présentée à  $\theta_i$  de manière à annuler l'erreur permanente de la réponse manuelle. Dans ce cas le sujet perçoit le déplacement  $X_i$  et vise une position  $X_i^j$  la plus probable dans un secteur délimité par l'angle d'imprécision  $\alpha$  (angle solide  $\Omega$ ) figure 5.4.

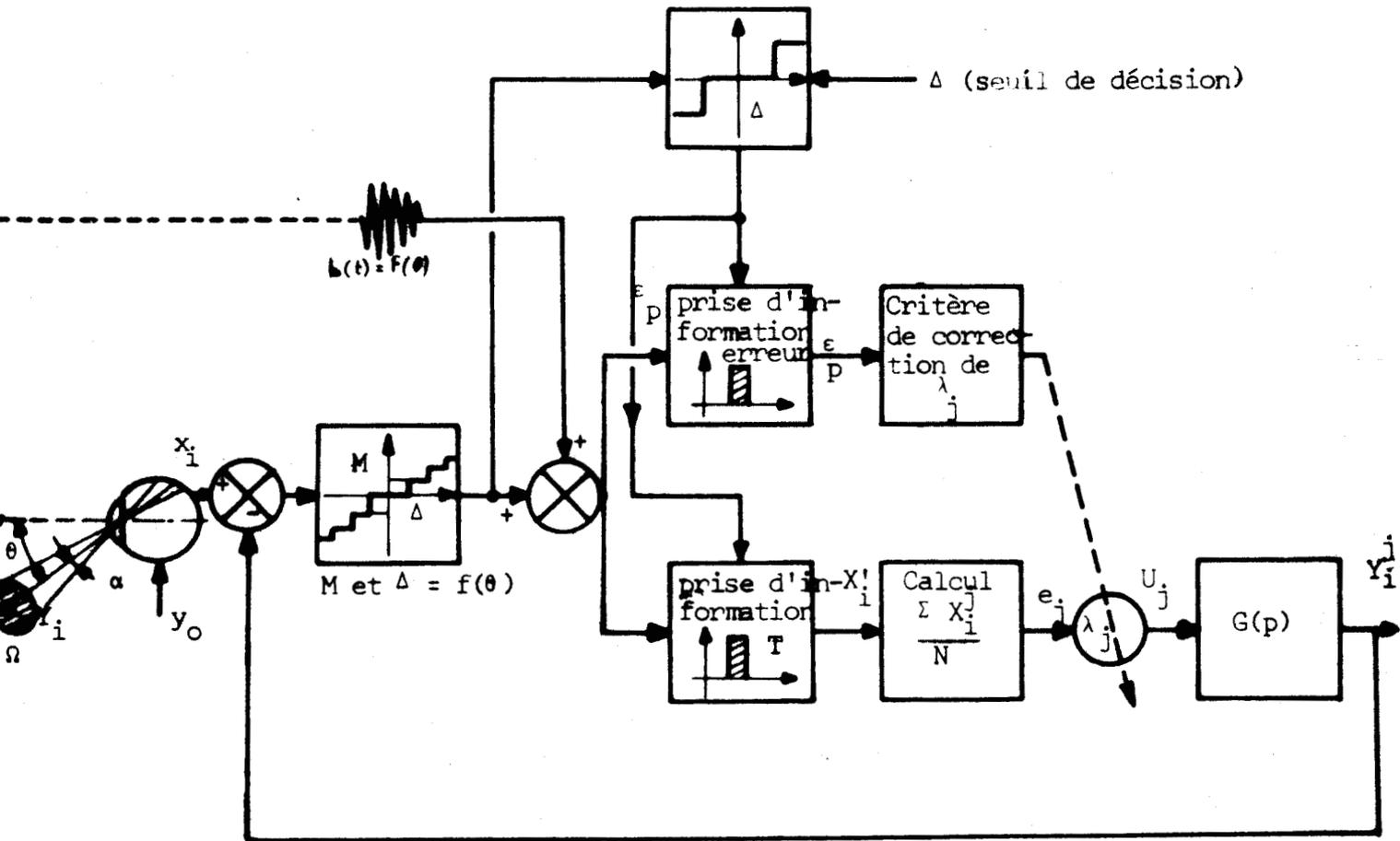


Figure 5.4 : Modèle adaptatif de l'opérateur humain effectuant une poursuite manuelle en vision floue

V.4.1 - Modèle adaptatif du sujet (informations visuelles floues)

Les résultats du chapitre précédent peuvent se concrétiser par le modèle de la figure 5.4 dont le schéma de simulation est présenté en annexe A.5. Celui-ci est lié à la représentation du modèle général de l'opérateur humain (figure 4.11) et l'on reconnaît les propriétés du capteur non-linéaire, ainsi que l'influence de l'étage supérieur pour une prise d'information à partir de laquelle la boucle adaptative améliore l'indice de performance I du sujet lié ici à la valeur absolue de l'erreur permanente manuelle  $|\epsilon_p|$ .

La consigne interne  $e_j$  tend vers la valeur réelle  $X_i$  au moyen de la relation :

$$e_j = \frac{\sum_{j=1}^N X_i^j}{N}$$

$\lambda_j$  (§ suivant) est ajusté de manière à annuler l'erreur permanente  $\epsilon_p^j$ .

L'amplitude de la commande résultante  $U_j$  est :

$$U_j = \lambda_j e_j$$

V.4.2 - Comparaison opérateur-modèle

Le comportement adaptatif du sujet est schématisé figure 5.6, pour le  $j^{\text{ième}}$  essai. Il comprend :

- le choix de l'information  $X_i^j$  dans le bruit  $b(t)$  (fonction floue)
- la décision d'une action et la visée manuelle  $Y_i^j$
- la perception de l'erreur commise  $\epsilon_p^j$  dans le bruit  $b(t)$  et la correction  $\lambda_j$  pour l'essai suivant.

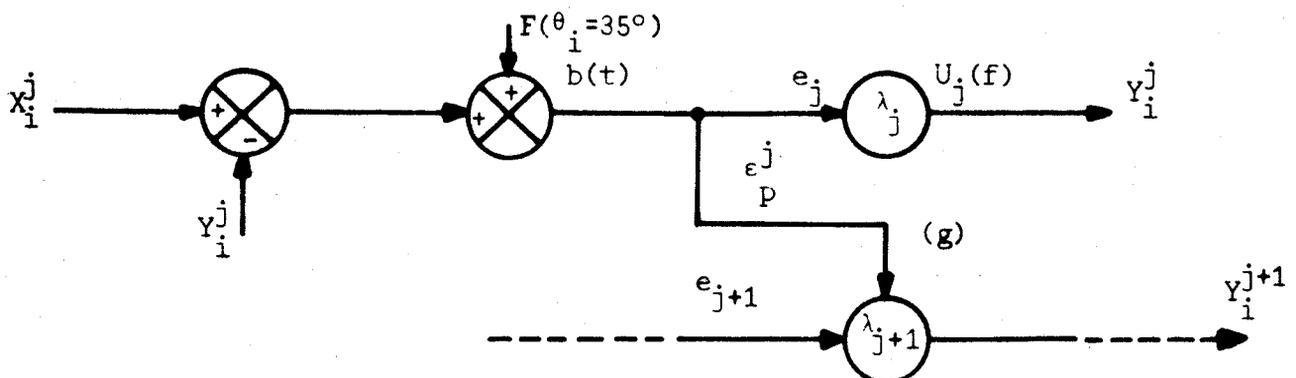


Figure 5.6 : Algorithme d'apprentissage du sujet

La caractéristique non-linéaire (g) (§III.2) élaborant à partir de l'erreur floue  $\epsilon_p^j$  la correction  $\lambda_{j+1}$  pour l'essai suivant est fonction de l'aptitude du sujet au test. De plus les enregistrements expérimentaux (chapitre III et annexe A.3) soulignent que le "mode" d'adaptation pendant la période d'apprentissage peut être très différent non seulement selon les sujets (opérateurs "prudents", "habitués" ; cas de non réponse pour une meilleure localisation ...) mais aussi selon le temps et la "stratégie" choisie par l'opérateur (amélioration simultanée des paramètres  $R_M$ ,  $\epsilon_p$ ,  $t_{mM}$  ou diminution de  $R_M$  puis de  $\epsilon_p$  ... ou inversement ...). Il résulte de ceci que nos essais d'identification en temps réel selon le schéma de la figure 4.1 ont été très difficiles à réaliser et n'ont pas abouti à une vérification "réelle" de notre modèle en considérant la variabilité de la stratégie choisie par le sujet dans le temps. Toutefois, nous présentons figure 5.7 quelques enregistrements du modèle obtenu en remarquant que les principaux phénomènes (diminution de l'erreur permanente en particulier) sont en accord avec nos résultats expérimentaux.

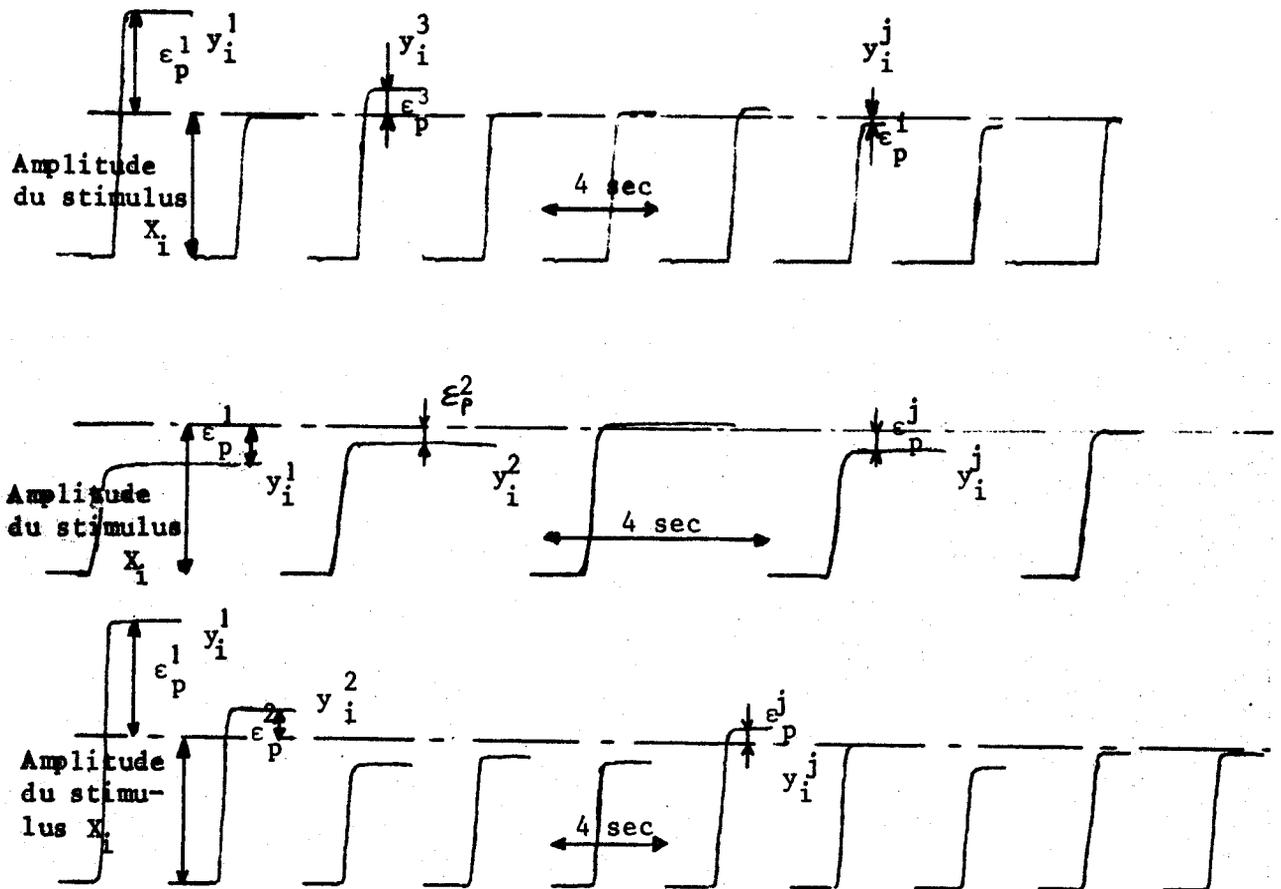


Figure 5.7 : Réponses du modèle (figure 5.4) mettant en évidence l'évolution de l'erreur permanente  $\epsilon_p$  en fonction du nombre de tests.

## Conclusions :

Le modèle proposé figure 5.4 présente les caractéristiques d'un système en "boucle ouverte" aux instants  $T-T_1$ , le "calculateur" interne isolant en quelque sorte la réponse manuelle de l'entrée pendant l'effort de localisation et de calcul de l'opérateur. Les propriétés principales des réponses du modèle sont en accord avec nos hypothèses expérimentales bien que l'identification n'ait pas été effectuée en temps réel.

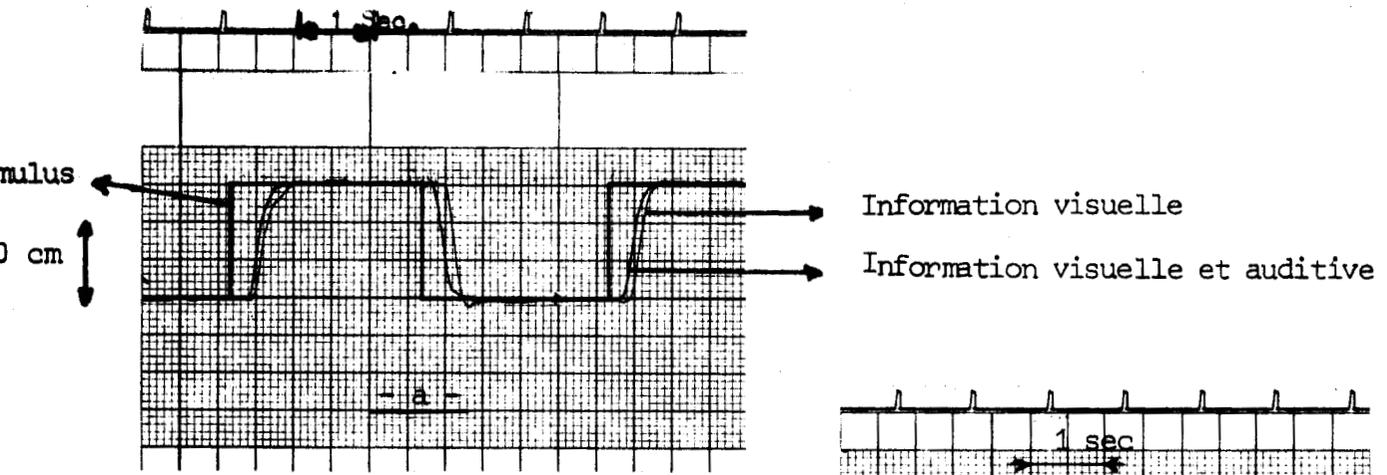
L'essai de synthèse relatif à diverses entrées (échelons de position et de vitesse, sinusoïdes) s'est révélé très compliqué à obtenir. Rappelons que l'étude expérimentale souligne la complexité d'une caractérisation des réponses de l'opérateur et n'a permis de déceler que les propriétés non-linéaires (seuil, saturation, quantification).

### V.5 - Modèle d'opérateur lors d'un régime d'apprentissage en vision fovéale

L'opérateur est ici sollicité à réaliser des tests identiques, ayant l'aspect d'échelon de position, de sinusoïde et de dents de scie, les signaux pouvant être de nature lumineuse et sonore.

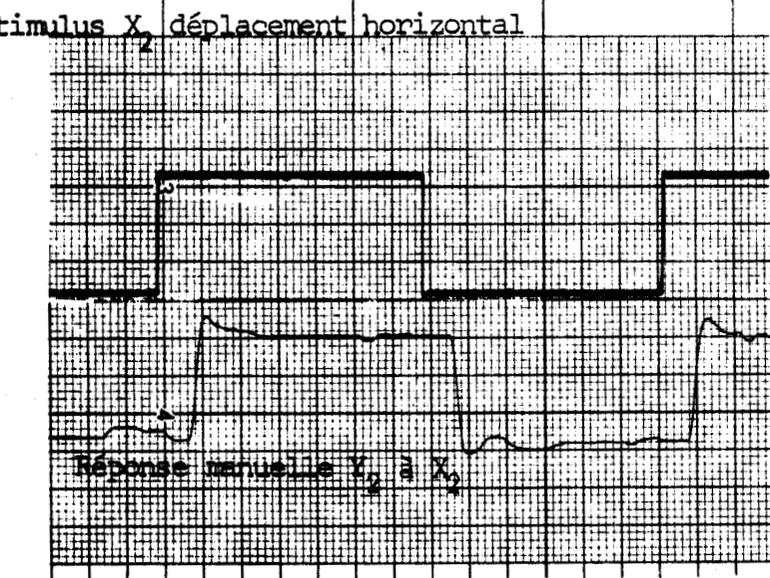
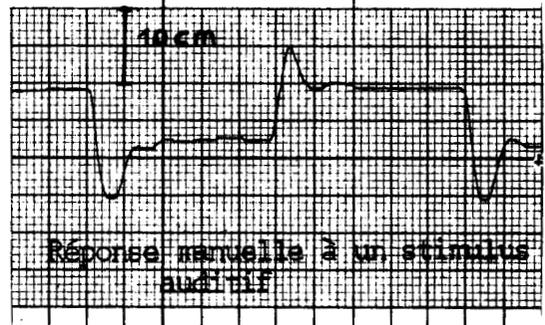
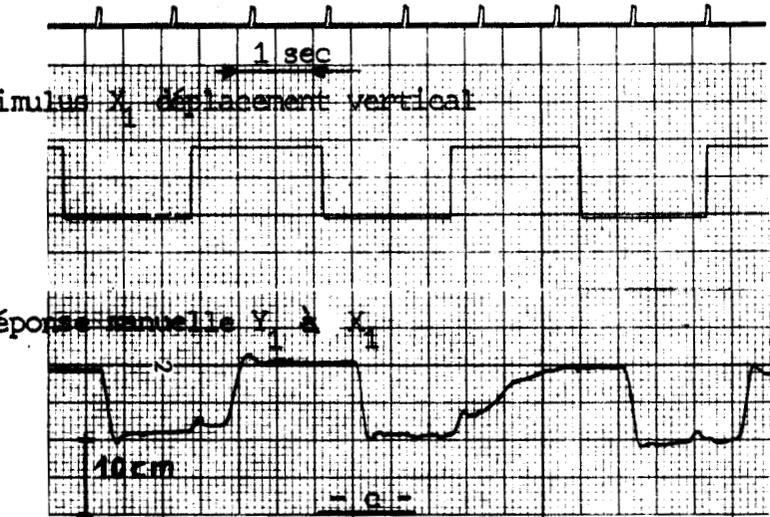
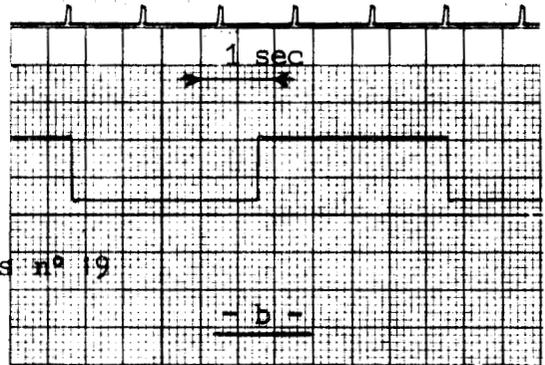
#### V.5.1 - Etat adapté de l'opérateur

Contrairement au phénomène adaptatif précédent où l'amélioration de la performance du sujet s'effectuait très lentement (l'état adapté pouvant être obtenu à partir d'un nombre d'essais voisin de 10) nous observons ici dès le deuxième ou troisième signal identique une réponse caractérisée par la recherche d'un état adapté du sujet. En outre rappelons (§ III.1) que l'adaptation de l'opérateur est plus rapide lors de la combinaison de signaux visuels et auditifs (annexe A.5) ; les minimums du retard  $R_M$  et du temps de stabilisation  $t_{AM}$  étant obtenus lorsque ces signaux sont présentés simultanément. L'examen de l'enregistrement figure 5.8 met en évidence les différences obtenues lors de poursuites avec entrées visuelles et auditives (tracé a). Remarquons (tracé b) le dépassement encore important lors du stimulus n° 19 de nature sonore rappelant le principe de la priorité de l'information visuelle pour une stabilisation fixe de la main. Il est intéressant de remarquer (tracé c) des réponses manuelles tendant à devenir identiques aux précédentes lorsque le sujet poursuit deux cibles  $X_1$  et  $X_2$  à l'aide des deux composantes de son levier manuel. L'adaptation de l'opérateur à ce test peut être atteint au bout d'un nombre d'essais élevé (10 à 20).



Réponses manuelles à des stimulus visuels et auditifs

stimulus n° 19



Réponses manuelles à deux stimulus visuels  $X_1$  et  $X_2$

Figure 5.8 : Différentes réponses de l'opérateur humain en régime adapté.

### V.5.2 - Modèle de l'opérateur et comparaison homme-modèle

En englobant les résultats du paragraphe précédent (vision extra-fovéale) l'identification des réponses manuelles révèle que pour chaque protocole expérimental l'opérateur humain recherche un état quasi optimal par rapport à l'environnement extérieur et au travail demandé. Les différences des comportements se situent essentiellement au niveau de l'étage supérieur : en vision frontale et pour une seule tâche le cortex ne fait pas intervenir les phénomènes de pondération, de choix (§ V.2). En effet, la simplicité du travail et la quantité d'information étant suffisante (minimum de la fonction floue, pouvant même être négligé dans le modèle), l'étage supérieur n'apporte sa contribution qu'en modifiant les coefficients de la voie de transfert des informations (se référer modèle figure 4.12 (a)). Le modèle est simulé (annexe A.5) à l'aide de non-linéarités dynamiques dont les caractéristiques s'adaptent en fonction du nombre d'essais. Au démarrage de l'entraînement la fonction "mémoire" (éléments adaptatifs dans l'étage supérieur de la figure 4.12 (a)) de l'opérateur a une influence nulle et la transmission est "perturbée" (quantum  $q$  de la non-linéarité dynamique important et diminuant avec le nombre d'essais). Nous présentons figure 5.9 et 10 les différents tracés des réponses du modèle et celles du sujet. Précisons qu'il ne faut pas exagérer outre mesure l'erreur Homme-modèle ( $\epsilon_{H.M}$ ) étant donné que l'opérateur ne répond pas toujours avec une égale précision au cours d'une série de stimulus. Précisons que les réponses figures 5.9 et 10 ont été obtenues sans aucune modification des paramètres du modèle quelle que soit la forme du signal d'entrée. Ces résultats ont été obtenus à l'aide de la simulation du modèle figure 4.12 (a) ayant les caractéristiques suivantes :

$X = 3,5$  volts (de forme quelconque)

$\Delta_0 = 0,2$  volts (seuil de la non-linéarité visuelle)

$T = 0,2$  seconde ;  $k = 1$  (paramètres de l'échantillonneur  $B_1$ )

$R_M = 0,2$  ou  $0,3$  seconde (pouvant être modulé à l'aide d'un intégrateur impulsionnel)

$q = 0,5$  Volt à  $0$  volt (quantum diminuant en fonction de l'apprentissage)

$K = 4,5$  ( $K_V$  variant de  $6,3$  à  $3,2$  pour une amplitude de  $X$  variant de  $1$  à  $3,5$  volts)

$\tau = 0,1$  seconde (constante de temps)

$\mu = 1$  et  $\lambda = 0,03$  (retour tachymétrique)

$\Delta = 0$  (seuil de décision)

$b(0) = 0$  ("flou" nul en vision fovéale)

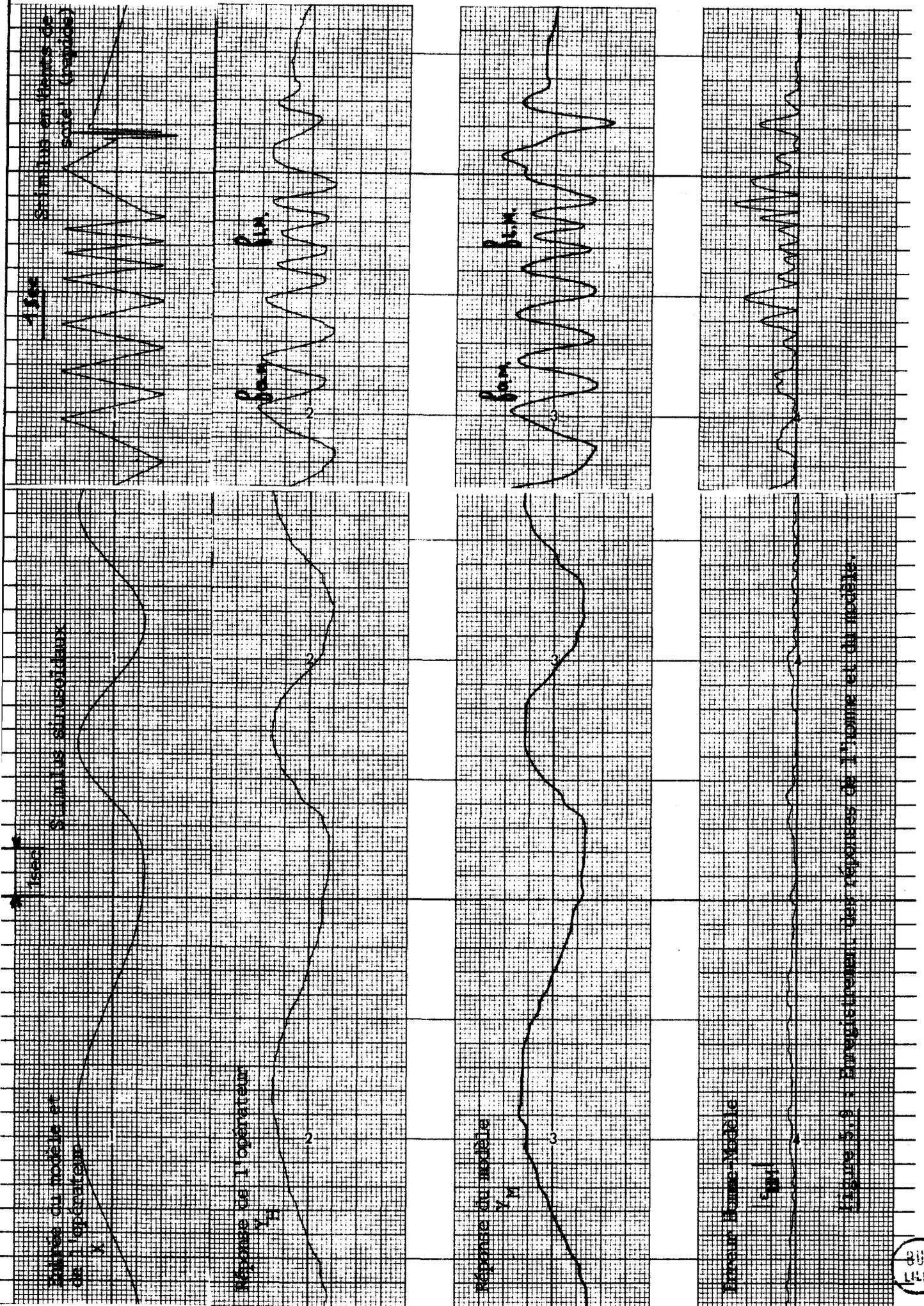


Figure 5.9 : Enregistrement des réponses de l'homme et du modèle.

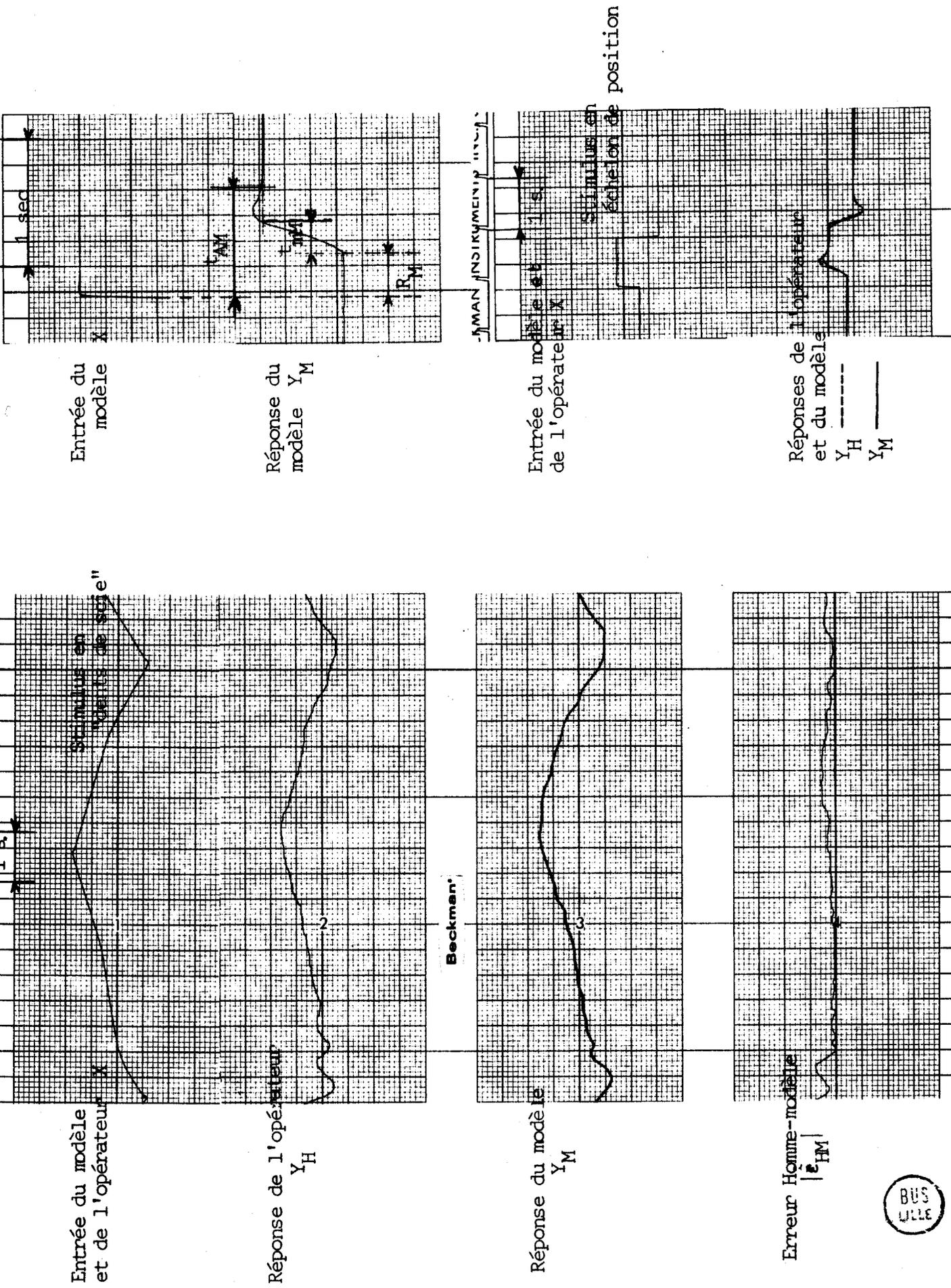


Figure 5.10: Enregistrements des réponses de l'homme et du modèle



Conclusions

Le comportement du modèle proposé reproduit les principales propriétés décelées au cours de l'identification expérimentale pour la totalité des tests de l'opérateur sans aucune modification des paramètres de la simulation (quel que soit le stimulus présenté au sujet). Il met en évidence le principe du modèle "unique" de l'opérateur en fonction des entrées et de la localisation de celles-ci (les paramètres étant modifiés selon la valeur de  $\theta$ ).

Chapitre VI

ESSAI DE SYNTHÈSE DES MODÈLES DE L'OPÉRATEUR

Les chapitres précédents ont montré la complexité du système humain effectuant une tâche de **poursuite**. L'objectif des paragraphes ci-dessous consiste en une tentative de mise en évidence du processus d'action chez l'homme à partir des résultats des chapitres IV et V.

### VI.1 - Difficulté d'une formulation rigoureuse

Nos analyses ont révélé les aspects multivariable, non-linéaire et adaptatif de l'homme lors de l'accomplissement des tâches considérées dans cette étude. La représentation mathématique des diverses réactions obtenues présente alors des difficultés étant donné que ce processus physiologique ne nous permet pas de justifier certaines approximations permettant la formulation mathématique rigoureuse du système humain (différents capteurs d'informations, appréhension floue, plusieurs fonctions de sortie, vision centrale et périphérique, adaptation, pondération des tâches, environnement expérimental,...).

Ces difficultés présentent néanmoins un intérêt non négligeable si l'on considère la "richesse du complexe" et la diversité des fonctions de commande interne du système régies par un "calculateur flou".

### VI.2 - Information appréhendée par l'homme

Les informations conduisant à l'exécution de la poursuite manuelle considérée sont principalement visuelles et caractérisées par leur position dans le champ de vision, leur luminosité et leur contraste, leur vitesse en amplitude et en signe, et leurs différents déplacements dans une région déterminée. Ces entrées ne constituent en réalité qu'une faible partie des stimulus possibles du système humain. Il suffit pour cela de réfléchir à la conduite d'un véhicule dans un environnement donné : informations visuelles, sensibles, auditives.

Le mode d'appréhension des entrées fonction de la localisation du signal dans le champ visuel et de sa nature (chapitre IV) définit une stratégie et une structure globale du système humain : la poursuite manuelle en vision périphérique a fait apparaître la mise en jeu de "circuits" corticaux amenant la prépondérance d'un comportement volontaire du sujet ; l'association d'un stimulus sonore à l'entrée visuelle a révélé une "séquence" dynamique différente du comportement de l'opérateur.

Rappelons (chapitre III.2) les différentes "stratégies adaptatives" des sujets en vision extra-fovéale pendant la période d'apprentissage : diminution du temps de latence, amélioration de la visée manuelle, décroissance de l'erreur permanente s'effectuant dans un ordre variable ou simultanément après une reconnaissance de l'entrée.

L'interprétation de ces phénomènes ne peut trouver de solution sans la présence d'un coordinateur (figure 6.1) ayant le rôle de "coordonner" ces différentes entrées en fonction d'un degré d'"utilité" et d'attribuer au

système une stratégie pouvant se modifier de manière à satisfaire le but à atteindre grâce à une pondération des tâches associées aux divers degrés d'urgence et de signification de celles-ci. De plus, ces phénomènes non-systématiques (chapitre V) doivent nécessairement être liés à une fonction "floue" représentative des différentes possibilités d'action du sujet-opérateur.

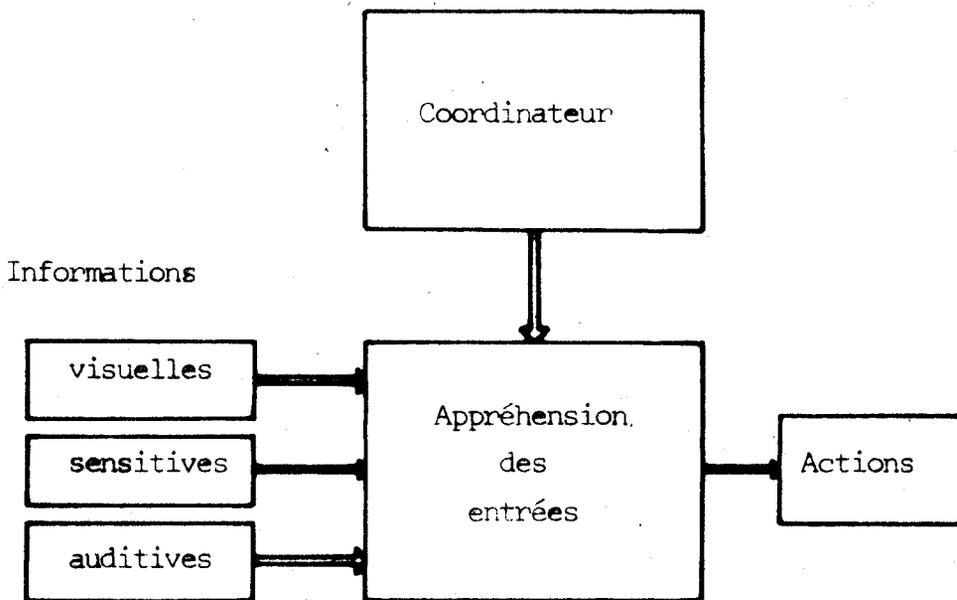


Figure 6.1 : Principales informations pouvant être utilisées par l'opérateur humain effectuant un travail manuel.

### VI.3 - Concept des systèmes hiérarchisés appliqué à l'opérateur humain

#### VI.3.1 - "Critère" de commande interne du système humain

Si l'on considère les propriétés fonctionnelles (chapitre IV) du comportement de l'homme, associées à un degré de "qualité" ou de sensibilité d'amélioration entraînant la satisfaction d'un objectif global, la minimisation pondérée des différentes erreurs commises par l'opérateur avec un minimum d'effort (choix d'une stratégie) peut s'exprimer par la fonction :

$$E = F \left( P_a \left[ p_a^W (f,t) \mid \epsilon_a^W (f,t) \right] \right)$$

a = tâche considérée

- w = nature de l'information : visuelle, auditive, sensitive
- P = coefficient (positif) de priorité (conditions expérimentales)
- p = coefficient (positif) de pondération de l'information (appréhension du signal)
- $\epsilon$  = erreur commise
- f = caractérise le "flou" ; t = temps

Cette formulation, bien qu'arbitraire permet d'interpréter les phénomènes apparus dans l'analyse du comportement de l'homme. La fonction F est une "évaluation" par la sujet de l'intégrale des erreurs pondérées pendant une séquence définie par un "échantillonneur supérieur" (chapitre IV). Celui-ci permet à l'étage coordinateur d'attribuer des valeurs aux coefficients de pondération, pendant les intervalles de temps de la séquence dynamique globale du système. Dans le cas d'une simultanéité des informations visuelles et auditives lors d'une seule tâche de poursuite manuelle par exemple, les premiers instants de la réponse du système humain correspondent à une valeur maximale du coefficient de pondération auditive,  $0 < t < t'$ , tandis que pendant l'ajustement précis du point suiveur sur l'objet (le but) le maximum du coefficient de pondération est visuel pour  $t'' < t < t'''$  ( $t', t'', t'''$ ...étant définis par le coordinateur).

On peut penser que la contribution du coefficient de pondération sensitive intervient chez le pilote lors d'accélération ou dans la conduite d'un véhicule en dérapage (stimulus sensitifs vestibulaire, labyrinthique). L'examen de plusieurs travaux à l'aide d'une seule nature d'information (chapitre II) conduit à donner aux coefficients  $P_1, P_2, \dots$  une valeur représentative de la priorité des tâches demandées et aux  $p_1, p_2 \dots$  une valeur fonction du "flou" appréhendé (chapitre V) lui-même fonction des paramètres du stimulus.

Le critère de hiérarchie d'une "fonction" sur l'autre peut alors être interprété par un "degré" fonction de la minimisation de l'expression E satisfaisant l'objectif global selon la procédure d'action choisie par l'opérateur.

- . Les priorités  $P_a$ , définies par les conditions expérimentales, sont prédominantes sur l'enchaînement des diverses fonctions pouvant être mises en jeu : rôle du coordinateur.
- . Les pondérations  $p_a^w$  représentatives du degré d'"utilité" de l'information déterminent une structure du comportement de l'opérateur et un mode d'adaptation ; ceci est lié au coordinateur donnant les valeurs  $p_a^w$  et évitant les conflits possibles (classement, priorité).

- Les appréhensions des erreurs  $\varepsilon_a^w$  donnent, dans la structure déjà définie, des valeurs aux coefficients du modèle (seuil  $\Delta_0$ , quantum  $q_0$ , période T, gain K, fonction de l'excentricité de l'image stimulus sur la rétine, de la nature des signaux).

VI.3.2 - Proposition d'un modèle hiérarchisé de l'opérateur humain

La "modélisation" des propriétés ci-dessus peut être représentée par un système à quatre niveaux hiérarchisés fonction de ce degré de "qualité" ou de "sensibilité d'amélioration" de la performance de l'opérateur relative à son objectif global soumis aux contraintes fixées par le travail demandé (figure 6.2). Le critère de supériorité d'un "niveau" sur l'autre étant défini par de degré d'amélioration minimisant au maximum l'expression E pour une modification de la procédure d'action du sujet. En conséquence le "paramètre" changement de nature du signal correspond à une entrée de niveau supérieur à celui de l'adaptation (se référer chapitre V).

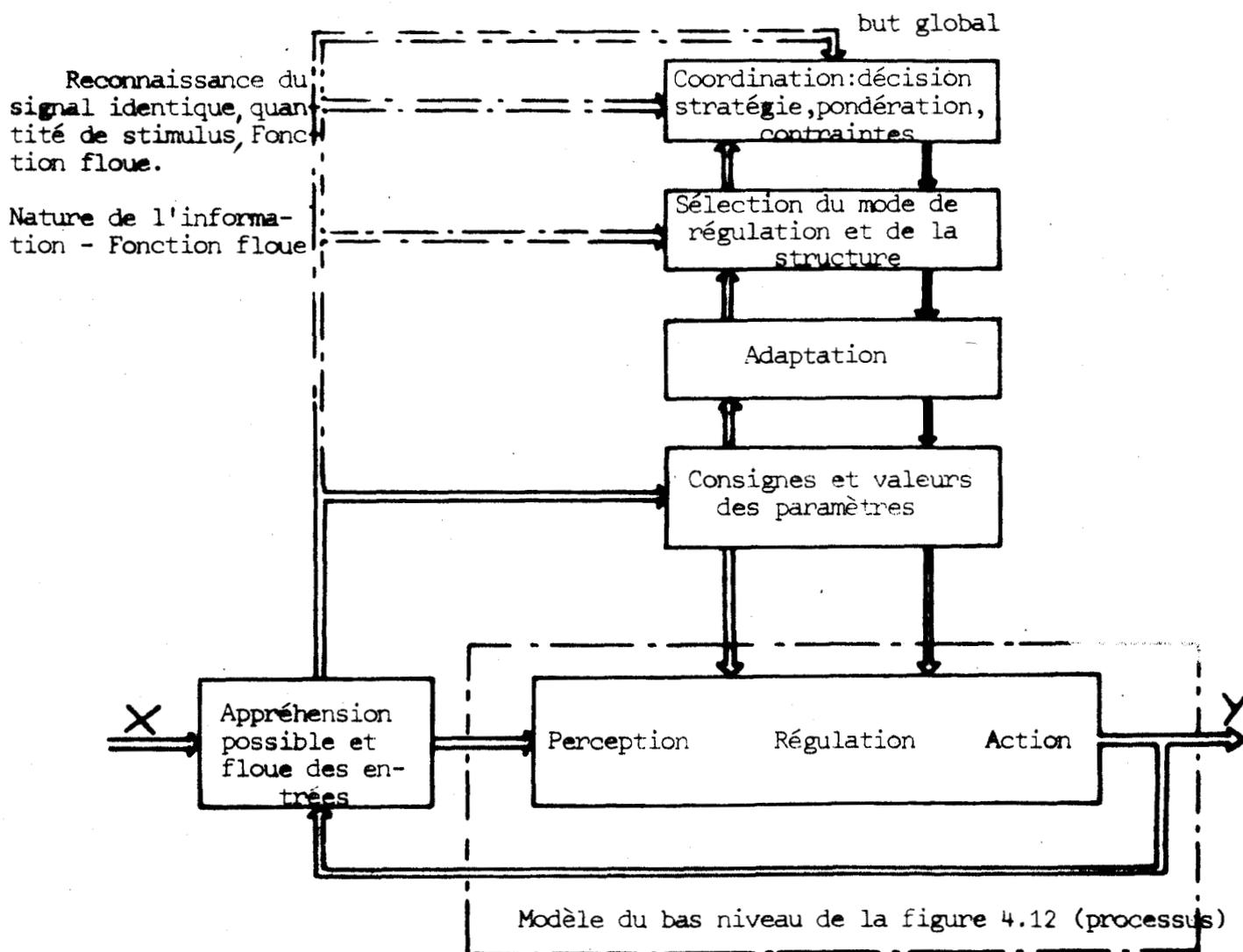


Figure 6.2 : "modélisation" hiérarchisée des modèles représentés principalement figures 4.11 et 12, 5.3 et 4.

On reconnaît figure 6.2 les principales propriétés fonctionnelles définies précédemment : coordination permettant de choisir la stratégie de l'adaptation (diminution du temps de latence, réglage du gain ...), adaptation fonction de la nature et du flou du signal appréhendé, attribution des valeurs aux paramètres du modèle structuré représentatives du comportement "réflexe" (bas niveau)...

Cette représentation a l'avantage d'une "mise en forme", dans un esprit de synthèse, des propriétés décelées chez l'homme effectuant un travail. Toutefois le caractère "flou" des interactions entre ces niveaux ne doit pas être négligé, même dans son ordre de hiérarchie, amenant une prudence dans toute recherche d'une formulation des commandes internes chez l'opérateur humain.

#### VI.4 - Conclusion

L'étude des diverses réactions de l'homme met en évidence la nécessité d'introduire dans le modèle du comportement de l'opérateur humain effectuant un travail manuel, un étage supérieur ayant pour rôle de coordonner le système global en fonction d'un "critère de satisfaction". La stratégie de perception optimale du système visuel (minimum de flou) présente des contraintes lorsque la charge de travail est composée de plusieurs tâches (degré de priorité  $P_a$ ). L'étage supérieur doit alors définir les priorités et les pondérations d'"utilité" des informations liées à la satisfaction du but défini par le coordinateur.

La proposition d'un modèle représentatif des diverses réponses possibles de l'homme dans les différentes conditions de travail nous a conduit à caractériser l'opérateur humain au moyen des principales propriétés de "continuité" des phénomènes obtenus en vision frontale et périphérique (modification des paramètres et de la structure de commande en fonction de l'excentricité de l'image sur la rétine), de "pondération" attribuée aux stimulus fonction des contraintes liées au travail et à la nature des informations, de "variabilité" observée dans les réponses du système humain en fonction du signal d'entrée introduisant la fonction floue, de "recherche" d'un état adapté du comportement de l'homme quel que soit le protocole expérimental proposé à l'opérateur. Mentionnons pour terminer que ce chapitre n'avait pour but que d'ouvrir un débat, de réfléchir, discuter à propos d'une tentative d'explication de nos résultats.

## CONCLUSION GENERALE

La détection d'un stimulus dans le champ visuel et la caractérisation des sorties dynamiques de l'oeil et de la main à différentes entrées visuelles, localisées en vision frontale et périphérique, mettent principalement en évidence l'importance du système visuel comme capteur d'informations et comme régulateur des réactions manuelles de l'opérateur.

La poursuite manuelle est d'autant plus entachée d'erreur que l'excentricité du stimulus image par rapport à l'axe optique est grande. La trajectoire du déplacement de la main est liée à la valeur de la différence des retards visuel et manuel. La contribution non-linéaire de la vitesse du déplacement du mobile est prépondérante non seulement en vision frontale, mais aussi en vision périphérique.

La simulation sur ordinateur du modèle "unique" proposé révèle un comportement de l'opérateur humain représentatif d'un système complexe à structure essentiellement variable ; le fonctionnement est "perturbé" lors d'une poursuite extra-fovéale, le processus adaptatif consistant à localiser l'objet dans une région floue "corrige" la visée manuelle à partir d'une estimation de l'erreur commise par l'opérateur. L'état adapté du sujet dépend principalement de la quantité, de la nature des informations appréhendées et du travail demandé.

Les propriétés multivariées du système humain permettent de supposer l'existence d'un dispositif réalisant un choix "judicieux" des informations pour la réalisation d'une tâche dans un environnement donné. Ce dispositif situé au niveau du régulateur central, le cerveau, introduit la formulation proposée basée sur un modèle à plusieurs niveaux hiérarchisés. Ces propriétés apparues lors de l'élaboration du modèle de l'opérateur mettent en relief la nécessité d'introduire dans le système un étage supérieur qui attribue un degré d'utilité et d'urgence aux informations captées par le sujet en tenant compte des contraintes consécutives à la tâche demandée. Toutefois les diverses analyses expérimentales montrent la difficulté d'interpréter le processus de mise en action de l'opérateur à l'aide d'opérations mathématiques rigoureuses et conduisent à proposer un modèle basé non seulement sur une imprécision de la "prise" d'information mais encore sur un traitement "flou" des données s'effectuant au niveau du cerveau.

Le modèle présenté n'a certainement pas la "complexité" du dispositif vivant mais peut, dans une première approximation, éclairer les phénomènes apparus lors de l'analyse expérimentale ; l'étude sur ordinateur permet en effet de vérifier nos hypothèses. Les résultats exposés peuvent de plus contribuer aux études concernant le domaine de l'ergonomie et à la recherche d'une nouvelle formulation applicable dans le domaine de l'Automatique Industrielle.

L'étendue des domaines de variation des grandeurs d'entrée du système humain encore connue de façon incomplète autorise néanmoins à dégager les lois probables des processus physiologiques mis en jeu. Il conviendrait en particulier d'approfondir le domaine de variation du contraste du mobile, de modifier davantage la charge de travail et d'augmenter les expérimentations aux limites du champ visuel.

Des recherches plus approfondies peuvent également s'orienter vers l'étude du système perceptif des informations visuelles, auditives et sensibles codées différemment, et des relations entre les différents "liens" fonctionnels chez l'opérateur en introduisant les systèmes hiérarchisés et les systèmes flous.

Une perspective consiste aussi à réaliser un système de traitement de données physiologiques prélevées en temps réel sur l'opérateur exécutant une tâche ; il permettrait une intervention sur le sujet ou une modification éventuelle du travail demandé. Ces essais éviteraient une détérioration de la performance de l'opérateur (cas des non-réponses par exemple) lors d'une variation de l'attention, de la fatigue, du niveau de vigilance et amèneraient une plus grande sécurité dans la performance du sujet. Physiologistes et Automaticiens peuvent retirer de cette étude une connaissance "fonctionnelle" du régulateur humain, système automatique non-linéaire, discret, multivariable, auto-adaptatif à structure variable.

Néanmoins, cette analyse de système ne constitue que l'une des clés de la connaissance de l'homme.

BIBLIOGRAPHIE

- /1/2/ D.T. Mc RUER and E.S. KRENDEL  
Dynamic response of human operators  
WADC Tech. Rept. 56.524, 1957.  
The human operator as a servo system element - J. Franklin Inst, Vol 267,  
pp.381-403 and pp. 511-536, 1959
- /3/ A. TUSTIN  
The nature of the operator's response in manual control and its impli-  
cations for controller design  
J.IEE, Vol 94, pp 190-202, 1947.
- /4/ L.R. YOUNG and L. STARK  
Variable feedback experiments testing a sampled data model for eye  
tracking  
I.E.E.E. Trans. Prof. Tech. Group on the human factors in Electronics  
Vol. 4, n°38, 1963.
- /5/ L. STARK and S.F. STANTEN  
A Biological stochastic process (pupil noise)  
Automat remote control III Proc. 3 rd. Congr. Inter., London 1966
- /6/ T.B. SHERIDAN  
The human operator in control instrumentation  
Prog. Control engineering, Vol 1, pp 141-187, 1962.
- /7/ J.C. RAOULT  
Etude de l'opérateur humain en tant qu'élément d'un système asservi  
Thèse de Docteur ès-Sciences, Toulouse, 15 Décembre 1962.
- /8/ G.V. SOUKHODOLSKI  
L'homme utilisé comme système de surveillance  
Automaticheskije sistemy, Moskva, p. 233-237, 1966.
- /9/ R.W. WILDE and J.H. WESTCOTT  
Characteristics of the human operator engaged in a tracking task  
Automatica vol 1, 1963 (in biological control systems analysis,  
J.H. MILSUM, Mc GRAW-HILL, BOOK Company).

- /10/ A.P. FIRLA et J. MORAWSKI  
Identification des propriétés dynamiques de l'homme en tant qu'opérateur  
dans les systèmes à commande manuelle  
Arch. Automat. Telemach. Polska, t. 14, n°1, p. 103-129, 1969.
- /11/12/ W.H. LEVISON and J.I. ELKIND  
Two dimensional manuel control systems with separated displays  
I.E.E.E, trans human factors électron., t. 8, n°3, p. 202-209, 1967.
- /13/ G. JOHANNSEN  
The design of a nonlinear multi-parameter model for the human operator  
Research Institute for human Engineering, Meckenheim, The federal Republic of Germany, 1970.
- /14/15/ G. VOSSIUS, J. WERNER  
The functional control of the Eye-Tracking-System and its Digital  
simulation  
4<sup>ème</sup> Congrès I.F.A.C, Warszawa, session 70, p. 3.19, 1969.
- /16/ C. RASHBASS  
The relationship between saccadic and smooth tracking eye movements  
J. Physiol., vol 159, p. 326-338, 1961.
- /17/ L.E. JOHNSON  
Dynamic analysis of visual tracking, systems research center  
Case Institute of technology, Cleveland, Ohio, SRC 28.B.63.6, 1963.
- /18/ P.J. DALLOS  
Learning phenomena during tracking eye motions  
Digest 15 th, Annual conf. Eng. in medicine and biology, Chicago,  
Vol 5.7, p.33, 1962.
- /19/ K.U. SMITH, J.GOULD and L. WARGO  
Sensory feedback analysis in medical research (spatial organization of  
neurobehavioral systems) J. Physical Med, vol 43, n°2, p.49-84, 1964.
- /20/ P. NAYRAC, G. MILBLED et N. MALVACHE  
Pistage manuel et pistage visuel  
Bul. Ac. Nat. de Médecine, 156, n°19, pp.615-619, 1972.

- /21/ N. MALVACHE  
Analyse corrélative des système visuel et manuel, et identification de l'opérateur - Thèse de Docteur-Ingénieur, Lille, 22 Avril 1970.
- /22/ N. SUGIE  
A model of predictive control in visual target tracking  
I.E.E.E. trans. Syst. man and cyber., vol 1, n°1, 1971.
- /23/ L. STARK, G. COOK and B.L. ZUBER  
Horizontal eye movements studied with the online computer  
Arch. Ophthal, vol 76, n°4, pp. 589-595, 1966.
- /24/ P. FRANCOIS, G. MILBLED, N. MALVACHE et G. DHEDIN  
Analyse du système oeil-main  
Arch. Ophthal., t.30, n°12, pp.861-864, 1970.
- /25/ M. LECLERCQ  
Dispositif d'étude et modèle analogique du système oculo-moteur chez l'homme  
Thèse de Docteur-Ingénieur, Lille, 11 Janvier 1969.
- /26/ G. DHEDIN  
Enregistrement des mouvements des yeux par une méthode opticoélectronique  
Thèse de doctorat en Médecine, Lille, 5 Novembre 1969.
- /27/ R. TILLOY  
Troubles de la motilité oculaire conjuguée dans la chorée de Huntington  
Thèse de doctorat en Médecine, Lille, 1971.
- /28/ J.C. HACHE, P. DUBOIS, G. BERTOLACCI, E. VETU and N. MALVACHE  
New method of stimulation for the study of photoreceptors  
The visual system, pp. 273-276, 1971.
- /29/ F. DUPAS  
Dispositif de mesure du système binoculaire  
D.E.A. d'Automatique, Lille, Juin 1971.

- /30/ J.M. JACQUESSON et G. MILBLED  
Analyse des composantes initiales du tracking d'échelons de position aléatoire  
Lille médical, t. 16, n°4, pp 557-561, 1971.
- /31/ N. MALVACHE , G. MILBLED et P. VIDAL  
Perception visuelle : champ de vision latérale, modèle de la fonction du regard - Rapport de synthèse finale du contrat D.R.M.E n°71/251, 1972
- /32/ E. CALLARVAY and C.L. YEAGER  
Relationship between reaction time and electroencephalographic alpha phase - Science, n° 132, 1960.
- /33/ E. JALOVISTO, A.FORSEN, C.LINDQUIST, T.MAKKONEN and M. TALIIQUIST  
Age and the simple reaction time in response to visual, tactile and proprioceptive stimuli.  
Annales Acad. Sc., Helsinki, série A, 1962.
- /34/ N. MALVACHE et J.M. JACQUESSON  
Sur les propriétés auto-adaptatives de l'opérateur humain  
Symposium I.F.A.C, Bruxelles, 1971.
- /35/ G. MILBLED, N. MALVACHE, J.M. JACQUESSON, R. HIRTZ  
Perception de l'opérateur humain : réponse manuelle en fonction de la localisation du stimulus sur la rétine.  
Conf. IRIA Journées d'informatique médicale, pp. 409.430, 1971.
- /36/ C. DOCHE, J. MAX, S. GARREL, Y. MEYRIEUX  
Nouvelles méthodes d'investigation dans la mesure et l'exploitation des temps de latence et du tracking oculaire.  
Génie biologique et médicale, Vol 1, n°1, 1970.
- /37/ J.H. TAYLOR  
Factors underlying visual search performance  
NATO Symp. on Image Evaluation, Munich, PP. 175.201, 1969.
- /38/ G.W. MENZER and J.B. THURMOND  
From Identification in peripheral vision  
Perception and psychophysics, vol 8(4), pp. 205-209, 1970.

- /39/ H.H. MATTESON  
Effects of surround luminance on perceptual latency  
J. Optic, Vol 60, n°8, 1970.
- /40/ F.W. CAMPBELL and L. MAFFEI  
Electrophysiological evidence for the existence of orientation and  
size detectors in the human visual system  
J. Physiol, vol 207, pp. 635.652, 1970.
- /41/ H.R. BLACKWELL  
Contrast thresholds of the human eye  
J. Ophthal, Soc. Amer., vol 36, pp. 624-643, 1946.
- /42/ R.G. COSTELLO  
The surge model of the well-trained human operator in simple manual  
control - IEEE Trans. on Man, Machine Systems, vol 9, n° 1, 1968.
- /43/ P.H. SKINNER  
Tracking the pitch of pulsed and continuous tones  
Audiol internation, (Pays Bas), t. 9, n°1, pp. 5.10, 1970.
- /44/ G.W. LANGE  
Représentation of the human operator as a sampled data system  
Proc. Instit. Electr. Engrs. (G.B), t.115, n°2, pp. 342-354, 1968.  
D.G. LAINIOTIS  
Sequantial structure and parameter - Adaptative pattern recognition  
Part I : Supervised learning - I.E.E.E trans. on inf. Theory, vol 16  
n°5, 1970
- /45/ L. STARK, G. VOSSIUS and L.R. YOUNG  
Predictive control of eye movements  
Prog. Report n°62, Research laboratory of electronics, Massachussets,  
Inst. Tech, Cambridge, 1961.
- /46/ A. RAULT, J. RICHALET et R. POULIQUEN  
Identification and sensibility  
Symp. I.F.A.C , Dubrovnick, 1968.

- /47/ C.A. DESOER and M.Y. WU  
Input Output properties of multiple-input, multiple-output discrete systems - J. Franklin Institute, Vol 290, n°1, 1970.
- /48/ K.N. LEIBOVIC, E. BALSLEV and T.A. METHIESON  
Binocular space and its representation by cellular assemblies in the brain - J. Physiol, 1970.
- /49/ P. VIDAL  
Automatique complexe - A.E.A d'Automatique, Lille, 1970.
- /50/ N. MALVACHE, F. DUPAS, G.F. FERNANDEZ et G. MILBLED  
Le système visuel dans sa fonction de détection de stimulus  
Cong. Nat. AEIA, I.F.A.C, I.F.I.P, Barcelona, 1972.
- /51/ F. DUPAS, N. MALVACHE et D. WILLAEYS  
Simulation de l'opérateur humain à l'aide d'un calculateur analogique et hybride - Cong. Int. de Calcul hybride (AICA), Gliwice, 1972.  
  
N. MALVACHE, G. MILBLED et P. VIDAL  
Etude du système visuel en tant que régulateur de comportement de l'opérateur humain - J. Physiol., t.62, PP. 295.296, 1970.
- /52/ M. BOURTON, F. LAURENT et P. VIDAL  
Sur la simulation de l'influx nerveux  
C.R. Ac. Sc., t.262, pp. 450-453, 1966
- /53/ N. MALVACHE, G. MILBLED et J.M. TOULOTTE  
Adaptation de l'opérateur humain aux informations visuelles floues  
Symp. Kynetike Aspekty problemov identifikacie, Bratislava, 1971
- /54/ A. TITLI  
Contribution à l'étude des structures de commande hiérarchisées en vue de l'optimisation des processus complexes.  
Thèse de docteur ès Sciences, Toulouse, 19 Juin 1972.
- /55/ M.F. MESAROVIC, D. MACKO and Y. TAKAHARA  
Theory of hierarchical, Multilevel systems - Math. in Sci and Engi., Vol 68, Ed. R. BELLMAN
- /56/ S.S.L CHANG and L.A. ZADEH  
On fuzzy mapping and control - IEEE Trans. Syst. man and Cyber., Vol 2 n°1, 1972.

ANNEXE A.I

Fixation du regard

Les points de fixation du regard sont placés sur une circonférence (rayon un mètre) horizontale et sur deux bâtis rectangulaires verticaux : l'un est rapproché et petit (10 à 15 cm), l'autre est plus éloigné et plus grand (100 cm). Ce même dispositif peut être utilisé en vue d'un examen clinique du nystagmus visuel dans les diverses directions du regard définies par les points de fixation (stimulus fixe).

Précisons que nos différentes expériences ont été réalisées lorsque la direction du regard correspond à celle de la position de "repos" de la tête (cas -a- figure A.I.1). De plus cette direction est identique à celle du positionnement "normal" du corps et de la main de l'opérateur, dirigés vers la tâche principale.

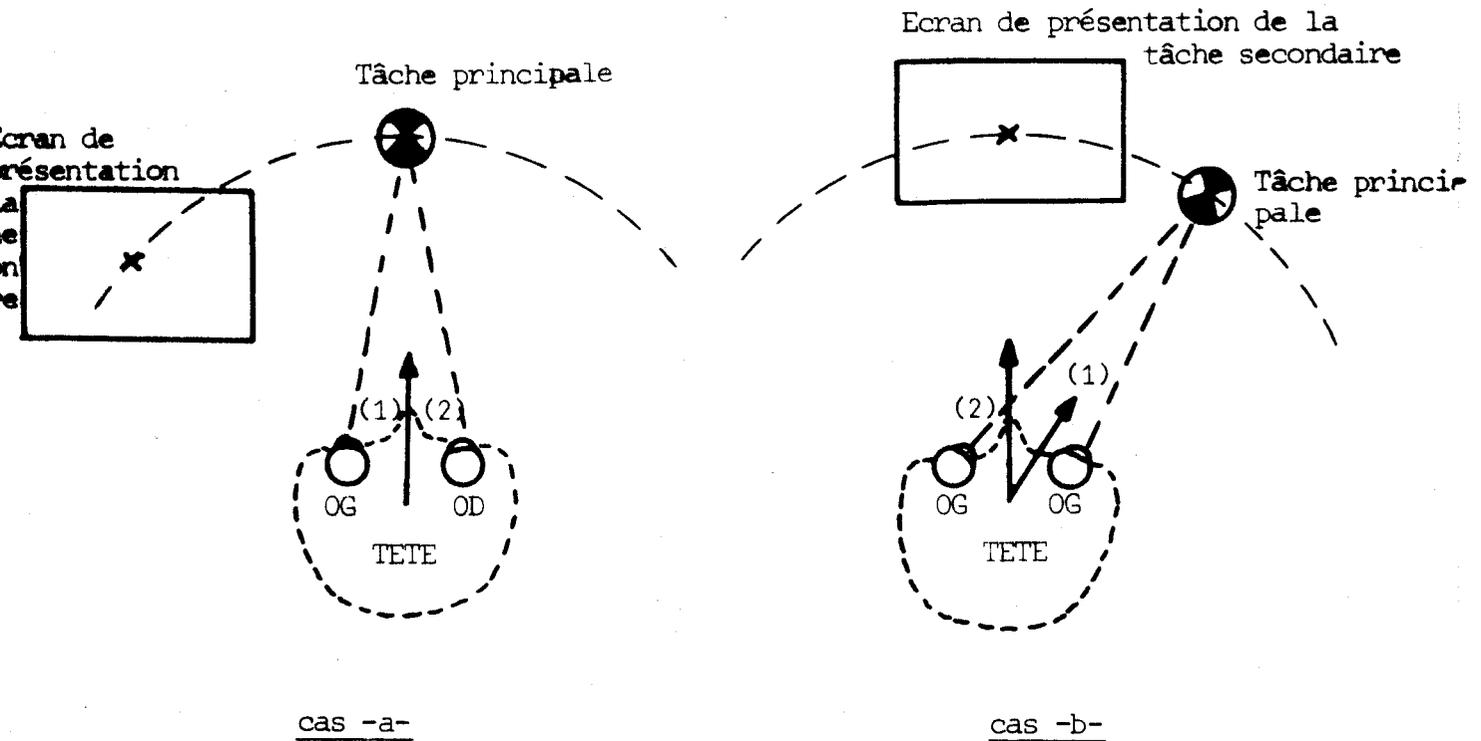


Figure A.I.1 : Positionnement de la direction du regard → (1) par rapport à celui de la tête → (2).

Le dispositif choisi pour éviter les mouvements conjugués de la tête et des yeux, de la main et de la tête est constitué par un support en plâtre dans lequel l'opérateur est prié de mettre la tête soutenue alors par les mâchoires. Cette solution évite des signes d'inconfort en particulier une salivation excessive lorsque l'expérience est de longue durée. Toutefois une bonne fixité est obtenue pour les expériences courtes (10 minutes) à l'aide d'appuis bucal, frontal et occipital.

Caractéristiques du transducteur électro-mécanique (levier manuel)

Potentiomètres utilisés

résistance : 10 K $\Omega$   
nombre de spires : 2.220 spires  
couple de rotation : 5 cm/g  
masse : 80 g

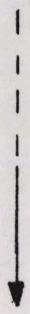
Système mécanique

deux degrés de liberté (x et y)  
longueur de levier : 36 cm

La linéarité du système dépend de la direction du déplacement dans le plan ; dans nos conditions expérimentales la rotation du levier n'excède pas  $\pm 15^\circ$  par rapport à sa position de repos et l'on peut supposer le transducteur linéaire à 1,5 % près.

Séquence d'apparition des cibles dans le champ visuel de l'opérateur humain effectuant un travail principal en vision frontale

Début =



C <sup>-10</sup>	1	C <sup>-20</sup>	C <sup>+30</sup>	C <sup>+40</sup>	C <sup>+70</sup>	C <sup>+100</sup>	C <sup>-50</sup>	C <sup>+80</sup>	C <sup>+60</sup>	C <sup>+90</sup>
C <sup>-10</sup>	2	1	C <sup>+30</sup>	1	1	1	1	1	1	1
C <sup>-10</sup>	C <sup>+1</sup>	1	1	C <sup>+40</sup>	C <sup>+70</sup>	2	2	C <sup>+80</sup>	2	C <sup>+90</sup>
1	1	C <sup>-20</sup>	2	1	2	C <sup>+100</sup>	C <sup>-50</sup>	2	C <sup>+60</sup>	2
2	C <sup>+1</sup>	2	2	1	2	C <sup>+100</sup>	C <sup>-50</sup>	C <sup>+80</sup>	C <sup>+60</sup>	2
C <sup>-10</sup>	2	2	C <sup>+30</sup>	2	C <sup>+70</sup>	2	2	2	2	C <sup>+90</sup>
C <sup>-10</sup>	C <sup>+1</sup>	C <sup>-20</sup>	C <sup>+30</sup>	C <sup>+40</sup>	1	1	C <sup>-50</sup>	C <sup>+80</sup>	1	1
1	1	C <sup>-20</sup>	1	C <sup>+40</sup>	C <sup>+70</sup>	C <sup>+100</sup>	1	C <sup>+80</sup>	C <sup>+60</sup>	C <sup>+90</sup>
C <sup>+10</sup>	2	1	2	2	1	1	C <sup>-50</sup>	2	1	2
1	C <sup>+1</sup>	C <sup>-20</sup>	C <sup>+30</sup>	C <sup>+40</sup>	C <sup>+70</sup>	C <sup>+100</sup>	C <sup>+50</sup>	C <sup>-80</sup>	C <sup>+60</sup>	1
C <sup>+10</sup>	1	2	C <sup>+30</sup>	C <sup>+40</sup>	2	C <sup>-100</sup>	C <sup>+50</sup>	1	2	C <sup>+90</sup>
2	2	C <sup>+20</sup>	1	1	C <sup>-70</sup>	1	1	C <sup>-80</sup>	C <sup>-60</sup>	C <sup>-90</sup>
2	C <sup>+1</sup>	1	2	C <sup>-40</sup>	1	2	2	1	1	C <sup>-90</sup>
C <sup>+10</sup>	1	1	C <sup>-30</sup>	1	C <sup>-70</sup>	C <sup>-100</sup>	C <sup>+50</sup>	C <sup>-80</sup>	1	2
C <sup>+10</sup>	C <sup>-1</sup>	C <sup>+20</sup>	1	2	1	C <sup>-100</sup>	C <sup>+50</sup>	2	C <sup>-60</sup>	C <sup>-90</sup>
1	2	2	C <sup>+30</sup>	C <sup>+40</sup>	C <sup>-70</sup>	2	1	1	C <sup>-60</sup>	1
2	C <sup>-1</sup>	2	2	C <sup>-40</sup>	2	C <sup>-100</sup>	C <sup>+50</sup>	C <sup>-80</sup>	2	C <sup>-90</sup>
C <sup>+10</sup>	1	C <sup>+20</sup>	C <sup>-30</sup>	2	C <sup>-70</sup>	2	1	C <sup>-60</sup>	C <sup>-90</sup>	C <sup>-90</sup>
	1	C <sup>+20</sup>	2	2	2	1	C <sup>-80</sup>	1		
	C <sup>-1</sup>	1	2	C <sup>-40</sup>	2	C <sup>-100</sup>		C <sup>-60</sup>		
	C <sup>-1</sup>	C <sup>+20</sup>	C <sup>-30</sup>		C <sup>-70</sup>					
	2	2								
	1	1								
	C <sup>-1</sup>									

Fin



Intervalle de temps approximatif en seconde séparant deux pressions manuelles sur le bouton-poussoir de la poignée du manche à balai (travail secondaire)

C <sup>+10</sup>	C <sup>-10</sup>	C <sup>-20</sup>	C <sup>+20</sup>	C <sup>-30</sup>	C <sup>-50</sup>	C <sup>-80</sup>	C <sup>+40</sup>
1 45s	1 6s	2 4s	2 6s	C <sup>+40</sup> 10s	C <sup>+50</sup> 43s	C <sup>+60</sup> 15s	C <sup>+70</sup> 14s
2 2	C <sup>+10</sup> 19	C <sup>+20</sup> 6	1 19	1 5	C <sup>+50</sup> 7	1 12	1 45
C <sup>+1</sup> 31	1 6	1 5	C <sup>+30</sup> 6	C <sup>+40</sup> 5	1 5	2 4	C <sup>+70</sup> 7
1 12	C <sup>+10</sup> 4	1 4	C <sup>+30</sup> 10	1 5	2 5	C <sup>+60</sup> 3	2 4
C <sup>+1</sup> 7	2 4	C <sup>+20</sup> 2	1 4	1 5	C <sup>+50</sup> 11	C <sup>+60</sup> 6	2 6
2 10	2 3	2 7	2 6	2 6	C <sup>+50</sup> 13	2 9	C <sup>+70</sup> 4
C <sup>+1</sup> 8	C <sup>+10</sup> 4	2 4	2 5	C <sup>+40</sup> 5	1 6	1 4	1 7
1 10	C <sup>+10</sup> 6	C <sup>+20</sup> 3	C <sup>+30</sup> 2	C <sup>+40</sup> 4	C <sup>+50</sup> 6	C <sup>+60</sup> 3	C <sup>+70</sup> 5
2 3	1 5	C <sup>+20</sup> 7	C <sup>+30</sup> 7	2 5		1 7	1 5
C <sup>+1</sup> 10	2 3	1 5	1 5	C <sup>+40</sup> 4		C <sup>+60</sup> 5	C <sup>+70</sup> 4
1 10	C <sup>+10</sup> 3	C <sup>+20</sup> 2	2 4				
2 4			C <sup>+30</sup> 6				
C <sup>+1</sup> 8							
C <sup>+50</sup>	C <sup>-60</sup>	C <sup>-70</sup>	<p>On remarque un temps plus important au début de chaque séquence ; ceci afin de séparer davantage l'influence des différentes vitesses de la cible x(t).</p>				
C <sup>+80</sup> 16s	C <sup>+90</sup> 12s	C <sup>+100</sup> 19s					
1 5	1 6	1 5					
C <sup>+80</sup> 8	C <sup>+90</sup> 6	2 4					
2 7	2 5	C <sup>+100</sup> 5					
C <sup>+80</sup> 5	2 5	C <sup>+100</sup> 7					
2 6	C <sup>+90</sup> 4	2 6					
C <sup>+80</sup> 4	1 9	1 4					
C <sup>+80</sup> 6	C <sup>+90</sup> 5	C <sup>+100</sup> 4					
	2 5	1 5					
	1 6	C <sup>+100</sup> 4					
	C <sup>+90</sup> 4						

ANNEXE A.II

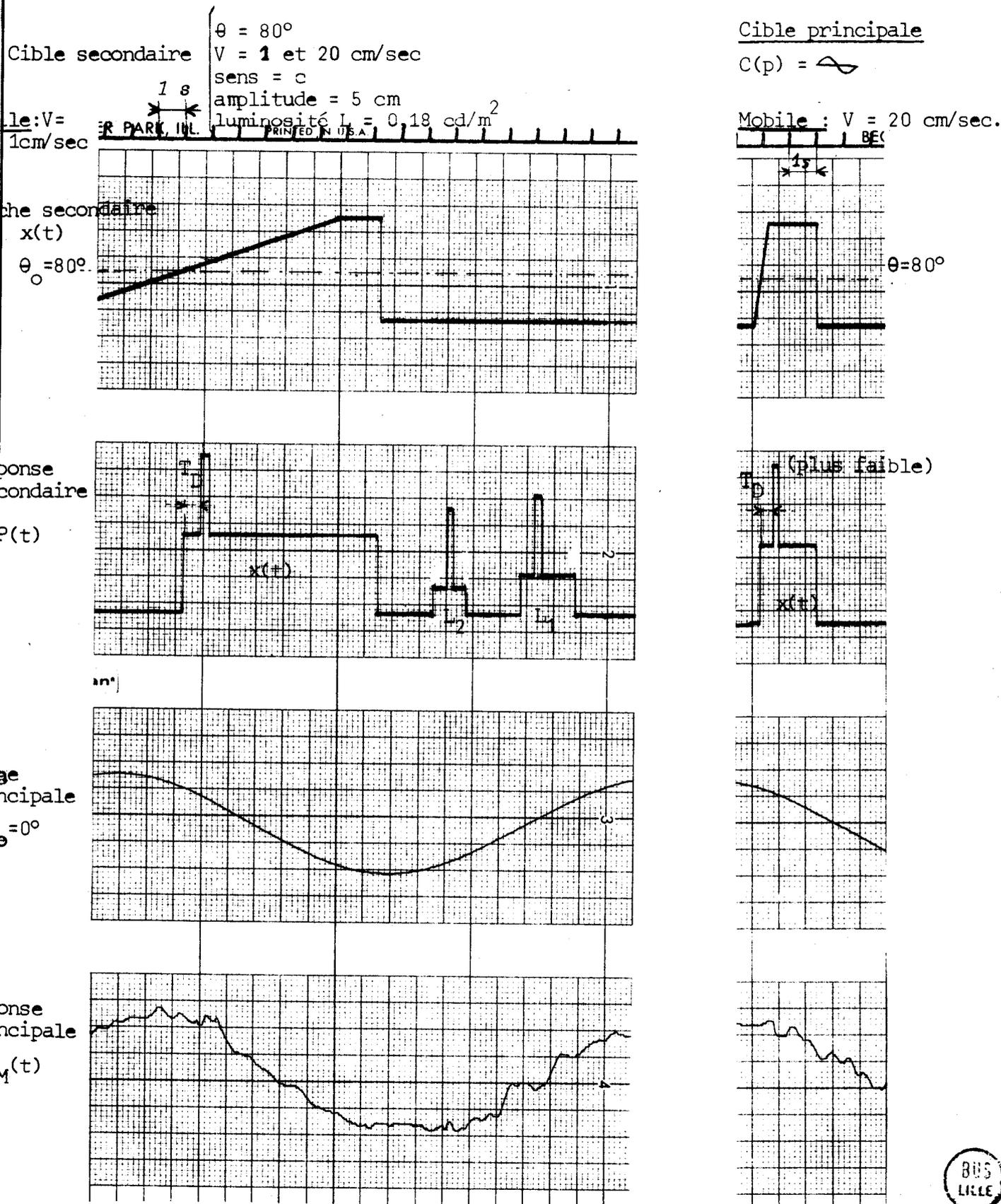


Figure A.II.1 : Enregistrement des réponses principale  $Y_M(t)$  et secondaire  $P(t)$  de l'opérateur humain (sujet du groupe A) : Influence de la vitesse du déplacement du mobile  $x(t)$ .



Les variations du temps de détection  $T_D$  en fonction de la vitesse de déplacement du mobile situé à un angle  $\theta$  dans le champ visuel n'autorisent pas à considérer avec rigueur l'interprétation donnée au chapitre II en raison des remarques signalées. De plus précisons que  $T_D$  est représentatif d'un temps global **fonction du** temps de perception proprement dit et des temps de transmission de l'information, de décision, de liaison sensori-motrice... ainsi que **du** temps d'apparition lui-même du point en mouvement sur l'écran. A ce sujet présentons figure A.II.2 le temps d'apparition du mobile  $x(t)$  en fonction de la vitesse  $V$  de l'objet à détecter où nous mentionnons deux zones :

- l'une correspondant à un temps de présentation sur l'écran supérieur à un  $T_D$  moyen
- l'autre inférieur à un  $T_D$  moyen (traits pointillés).

Ceci peut contribuer aussi à l'interprétation des propriétés relatives au temps de détection  $T_D$  en fonction de la vitesse du point (le déplacement du mobile étant de 5 cm).

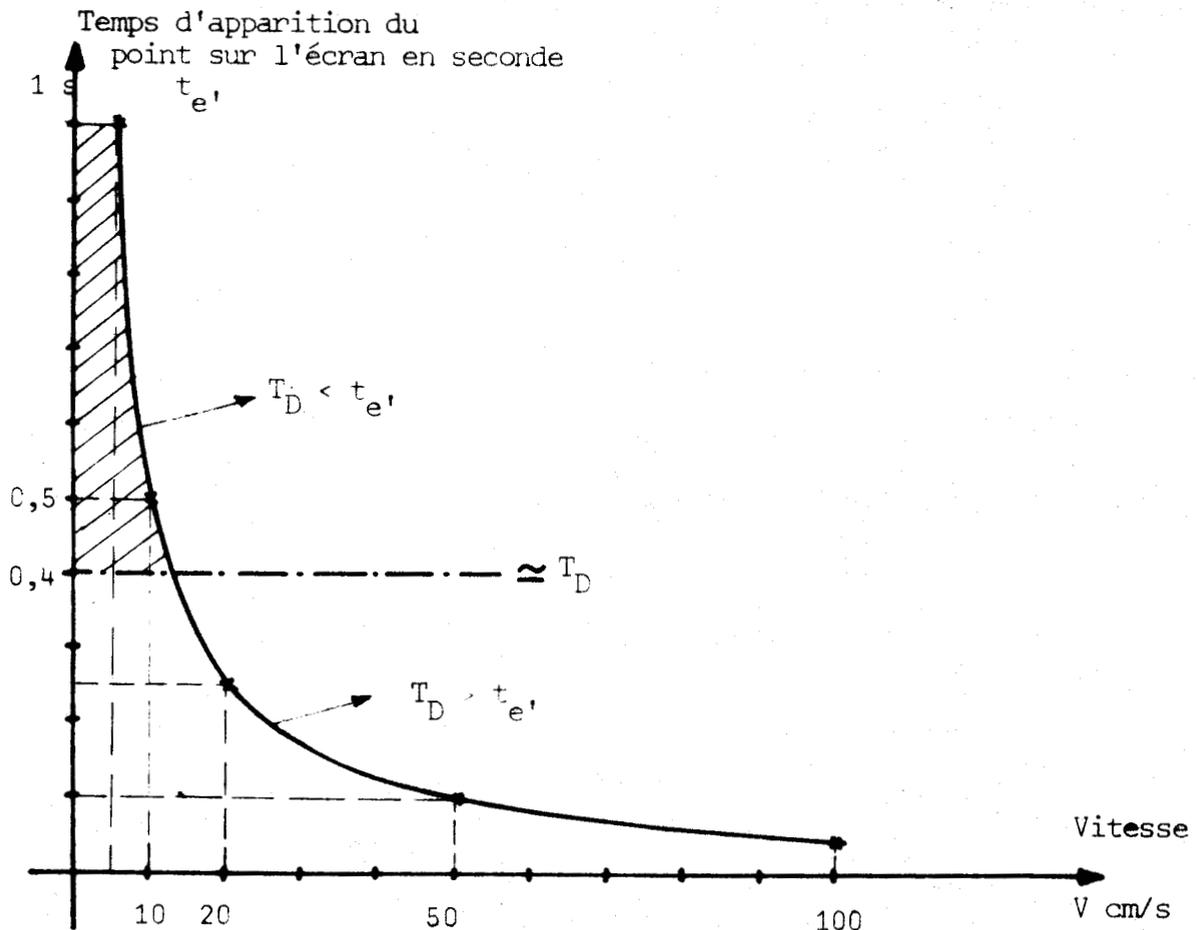


Figure A.II.2 : Temps d'apparition du mobile sur l'écran en fonction de la vitesse communiquée au déplacement.

Dispersion des mesures et attention du sujet à sa tâche principale

L'observation détaillée des réponses principale et secondaire du sujet fait apparaître une "interaction" entre les performances réalisées par l'opérateur relatives aux deux tâches  $C_p$  et  $C_s$ , c'est-à-dire concernant le minimum de l'erreur manuelle principale et le minimum du temps de détection à la cible secondaire. Cette "liaison" entre ces deux systèmes peut être interprétée par le fait que le champ visuel possible de l'opérateur est lié à l'attention que porte celui-ci à l'exécution de sa tâche prioritaire. Un effort supplémentaire de l'opérateur améliorant sa performance principale entraîne alors une réponse secondaire moins rapide.

Cette hypothèse peut être difficilement formulée étant donné le caractère aléatoire de ce niveau d'attention (imprévu, variabilité du comportement de l'homme ...).

Ceci permet d'expliquer en partie la dispersion des résultats obtenus concernant les différentes mesures du temps de détection  $T_D$ , nous présentons figure A.II.3 une image de la dispersion obtenue pour les stimulus  $L_1$  et  $L_2$ . On remarque que celle-ci est plus faible lors d'une tâche principale de surveillance, elle croît sensiblement lorsque le travail demandé est une poursuite manuelle de stimulus sinusoïdaux. Cette croissance pouvant être interprétée par le phénomène explicité ci-dessus (corrections manuelles).

- a) — Pistage manuel d'un stimulus sinusoïdal - temps de réponse à l'allumage de la lampe  $L_1$  ( $\theta = 0^\circ$ ).
- b) - - - Surveillance de Lampe  $L_1$  - temps de réponse à l'allumage de la lampe  $L_2$  ( $\theta = 20^\circ$ )
- c) Le trait vertical à 0,7 seconde représente 6 temps de réponse supérieurs à 0,7 sec, il n'y a pas de temps inférieur à 0,3 sec.

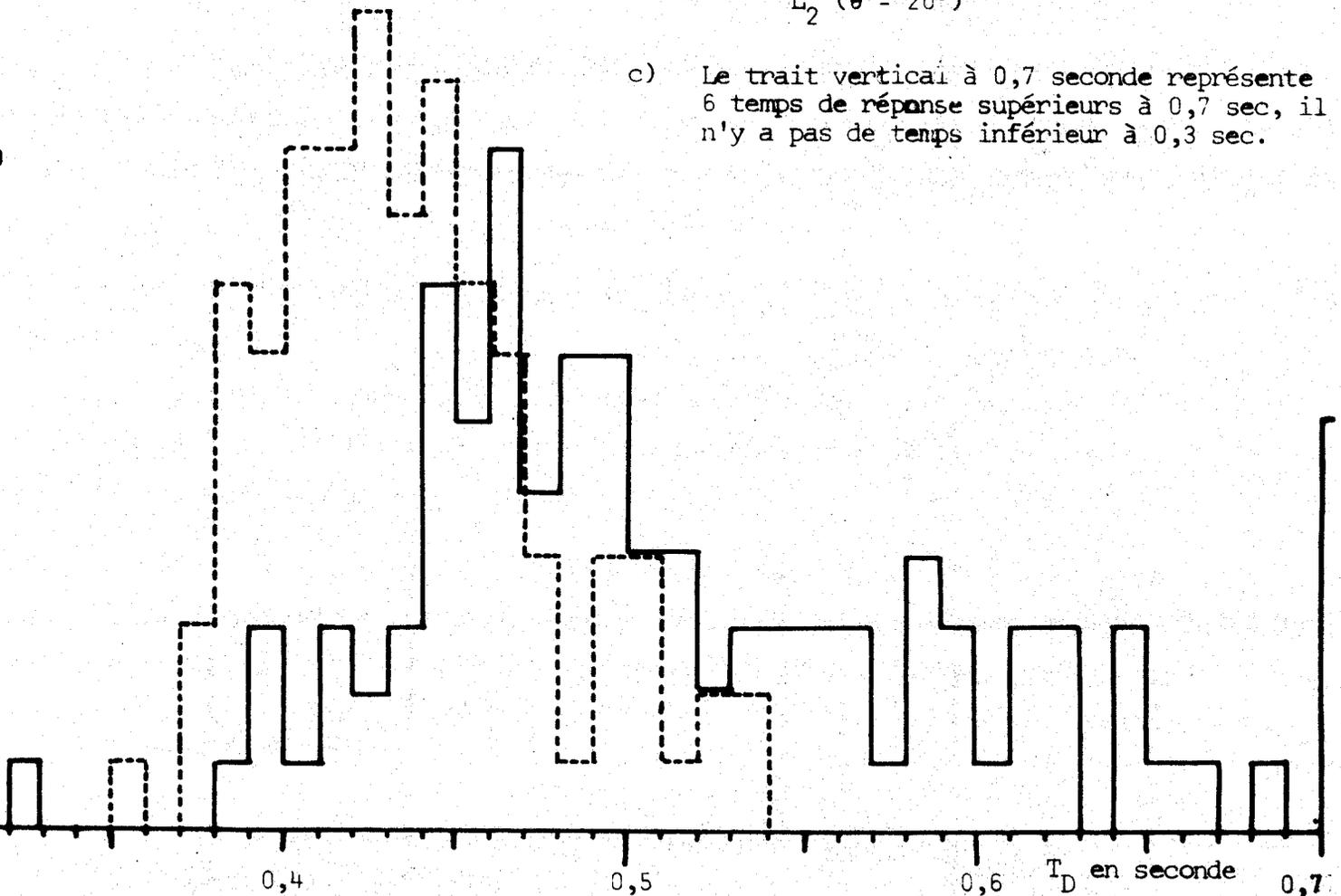


Figure A.II.3 : Distribution du temps de détection  $T_D$  d'un sujet à un stimulus lumineux dans le cas de 2 charges de travail (poursuite manuelle et surveillance)  
N. = nombre de mesures identiques.

VISION FRONTALE

Analyse des principaux paramètres des réponses visuelles et manuelles à des stimulus visuels

L'étude statistique (tableau Fig. A.III.1.1) met en évidence les propriétés suivantes :

. le temps de latence visuel  $\bar{R}_O=0,27$  s., supérieur au temps de réaction manuel  $\bar{T}_R=0,23$  s., est généralement inférieur au temps de latence manuel  $\bar{R}_M=0,35$  s. bien que nous ayons rencontré dans nos expériences cinq cas sur soixante où  $R_O$  est supérieur à  $R_M$ .

. L'étude de la dispersion des mesures révèle fig. A.III.1.2 une sélectivité moins importante des variations de  $R_M$  que celles du temps de latence visuel  $R_O$ . La réaction manuelle présente un aspect moins réflexe que celle de l'oeil et fait davantage appel à l'aptitude, la collaboration et l'attention de l'opérateur.

. L'écart  $\delta$  des temps de latence manuel et visuel et la vitesse moyenne de montée manuelle au cours de la réaction ont un coefficient de variation  $V$  trop important pour justifier la réalité des valeurs de  $\bar{V}_M$  et de  $\delta$  exigeant une analyse plus précise du phénomène.

Cette dernière variable est explicitée par les fig. A.III.1.3 et 4 mettant en évidence le comportement semi-optimal de la réponse manuelle de l'opérateur ( $\delta = 0,07$  sec.) : lorsque l'écart  $\delta$  est faible ou même négatif, l'opérateur ne contrôle pas suffisamment sa trajectoire manuelle amenant un dépassement et d'éventuelles oscillations autour de sa nouvelle position d'équilibre. Ce mode de comportement se rapproche d'une "visée" manuelle en vision extra-fovéale étant donné que le démarrage de la réponse manuelle peut s'effectuer avant celui de l'oeil. Les différents comportements de la main en fonction de l'écart  $R_M - R_O$  mettent en évidence un optimum relatif au temps de coïncidence stable oeil-main  $t_c$  (fig.AIII14)

	T. réaction manuel $T_R$ (sec)	T. de latence visuel $R_O$ (sec.)	T. de latence manuel $R_M$	T.Coïncidence main oeil $t_c$ (sec)	V. de montée manuel $V_M$ (mm/s)	Ecart T de latence $R_M - R_O$ (s)
leur moyenne $\bar{M}$	$T_R=0,23$	0,27	0,35	0,73	237	0,08
écart maximum	$\Delta T_R=0,09$	0,10	0,17	0,28	263	0,10
variance $\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\Delta)^2}{n}}$	$\sigma_{T_R}=0,04$	0,049	0,06	0,154	95	0,04
coefficient de variation $V = \frac{\sigma}{\bar{M}}$	$V_{T_R}=0,17$	0,18	0,17	0,21	0,40	0,55

Tableau A.III.1.1 : Tableau récapitulatif de l'étude statistique ;  $\Delta$  = variation autour de moyenne arithmétique, n=nombre de sujets

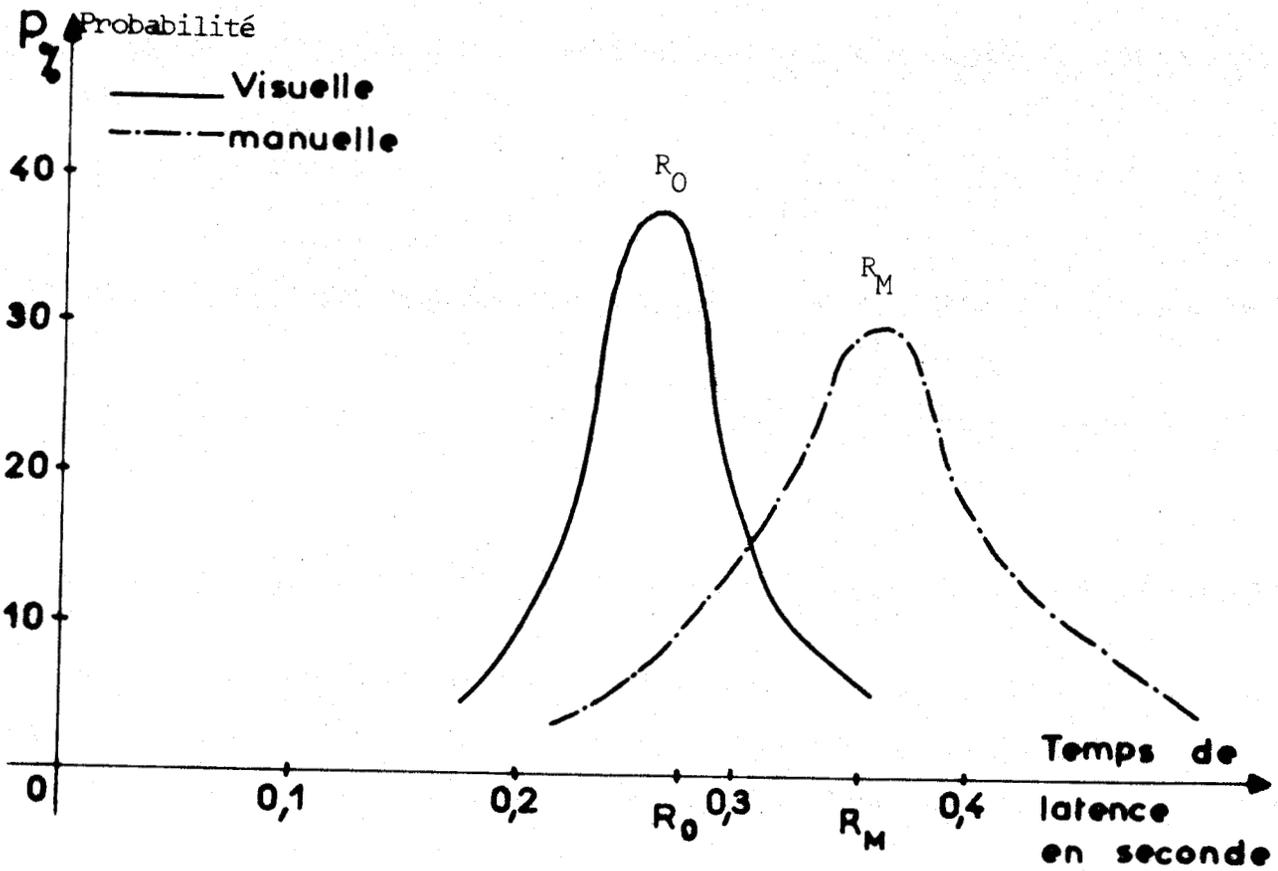


Figure A.III.1.2 : Probabilité de  $R_0$  et de  $R_M$  en fonction des temps de latence.

----- Réponse manuelle      ——— Réponse visuelle

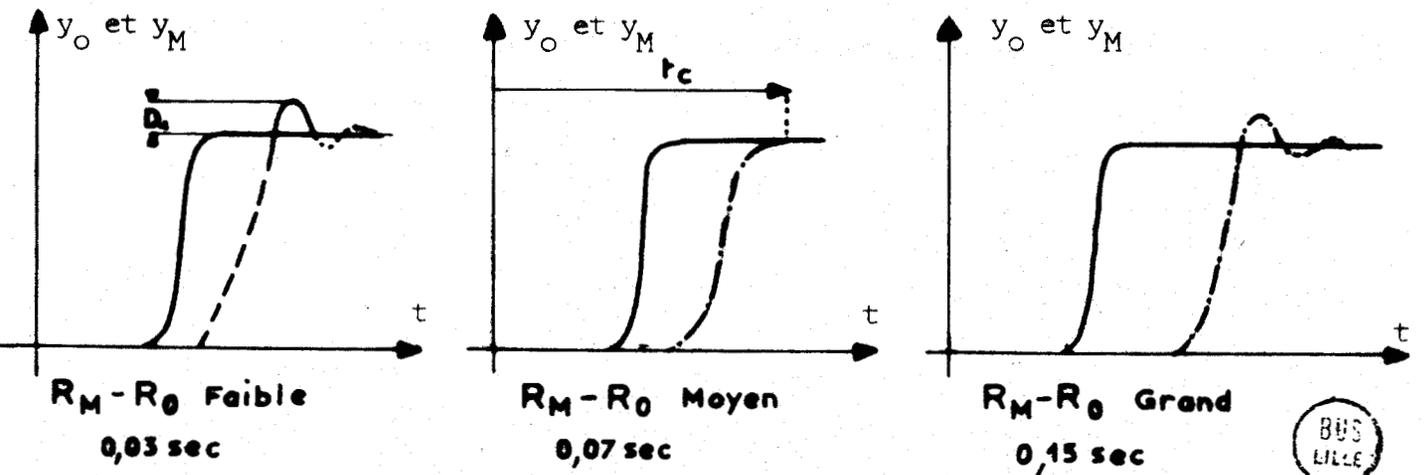


Figure A.III.1.3 : Caractérisation du mouvement manuel à partir d'un enregistrement simultané de l'oeil et de la main.

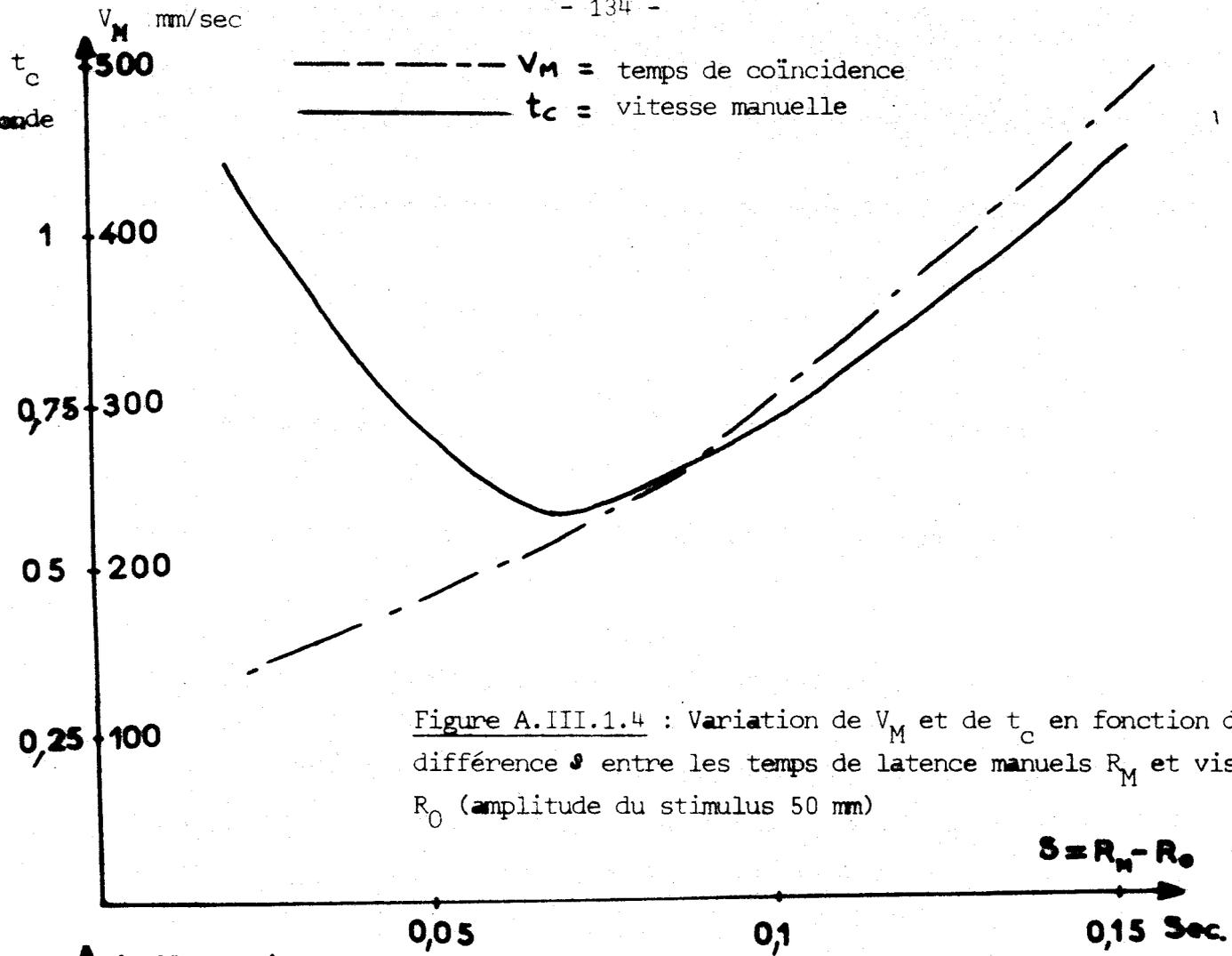


Figure A.III.1.4 : Variation de  $V_M$  et de  $t_c$  en fonction de la différence  $S$  entre les temps de latence manuels  $R_M$  et visuels  $R_0$  (amplitude du stimulus 50 mm)

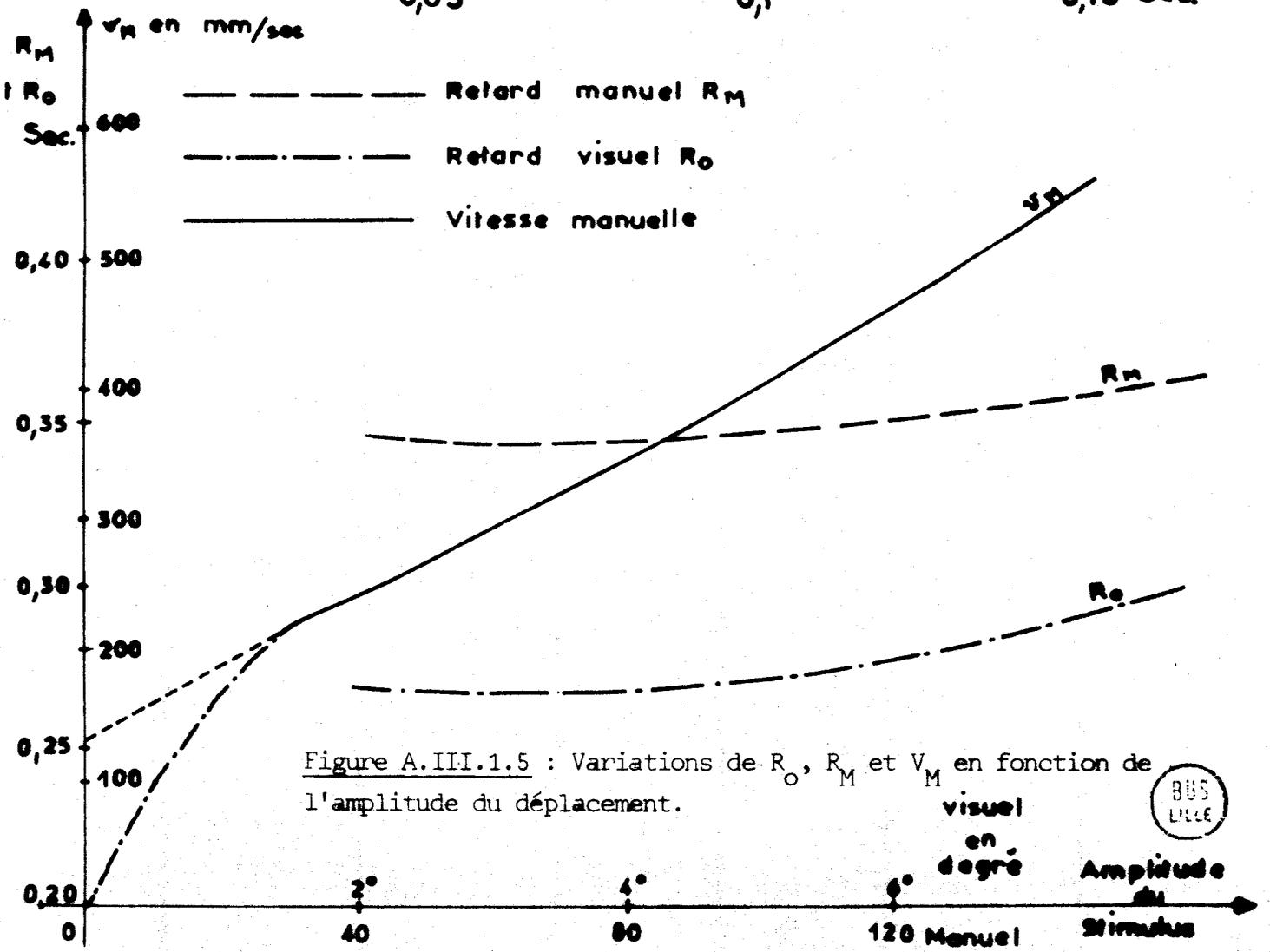


Figure A.III.1.5 : Variations de  $R_0$ ,  $R_M$  et  $V_M$  en fonction de l'amplitude du déplacement.



et une croissance de la vitesse moyenne de la réaction manuelle : plus la main est en retard par rapport à l'oeil, plus elle a tendance à rattraper son retard amenant une vitesse de déplacement manuel plus rapide et entraînant un mouvement oscillatoire autour de la nouvelle position d'équilibre.

L'influence de l'amplitude du stimulus est indiquée figure A.III.1.5 où nous avons indiqué la variation de la vitesse moyenne pendant le temps de montée de la réaction manuelle correspondant à un mode de réponse.

#### Temps de réaction et retard pur (retard variable)

Le retard pur  $R_p$  doit se distinguer du temps de réaction  $\bar{T}_R=0,23$  sec. En effet lors d'une série de présentations de stimulus lumineux, il existe néanmoins, si petit soit-il, un temps de décision pour la mise en action de l'opérateur. Notons à ce sujet que le temps de réaction du pied lors du même protocole d'essai est parfois inférieur au temps  $T_R$  bien que le "parcours" de l'information soit plus grand. Pour se rapprocher de la valeur de  $R_p$  notre proposition est basée sur un point de vue physiologique consistant à supposer la notion de retard variable : à l'instant de mise en action de la main à  $t = R_M$ , le sujet se trouve en régime "dynamique" et tend à rattraper son retard. En outre, après le début de la réaction manuelle on peut admettre qu'il ne peut y avoir une "modification" de la trajectoire qu'après un temps dû à la transmission de l'information de correction (arrêt, point d'inflexion par exemple). Nous avons alors présenté au sujet d'une part des stimulus de forme impulsionnelle et de durée égale ou inférieure au temps de latence, d'autre part un stimulus en échelon de position de grande amplitude précédé de plusieurs échelons d'amplitude plus faible et identique.

Cette analyse permet de proposer une valeur de  $R_p$  voisine de 0,15 à 0,2 seconde. Le choix de la forme du stimulus a pour but de rendre plus évident une correction manuelle sur les tracés expérimentaux. La notion de retard pur est particulièrement intéressante car elle permet de supposer dans cet intervalle de temps que la réponse du système humain s'effectue en "boucle ouverte" étant donné que l'information correctrice due à la boucle de retour n'est pas encore parvenue.

#### Réponses de l'opérateur à des stimulus en échelon de position lumineux et sonore

Précisons que nous avons été amenés à réaliser une série d'expériences identiques aux précédentes (stimulus lumineux seul) pour l'étude comparative des résultats obtenus en fonction de la nature du signal d'entrée. En effet il est parfois difficile de regrouper la même population de sujets pour différentes expériences réalisées séparément ; il ne faut pas alors être étonné que certaines valeurs des paramètres des réponses précédentes ne se retrouvent pas exactement dans celles-ci.

Le tableau figure A.III.1.6 précise les valeurs des paramètres de la réponse manuelle :  $R_M$  est égal à 0,31 seconde, il était de 0,35 seconde pour la population précédente ; ceci est conséquent au choix des sujets. Notons que la valeur du retard pur se conserve (0,15 seconde) lors de signaux auditifs.

L'étude des différentes réponses en fonction de la nature du stimulus permet de supposer une "boucle" supplémentaire dans la fonction de transfert de l'opérateur humain. Les capteurs et les "modes" de transmission étant différents et les enregistrements des réponses révélant une séquence dynamique relative d'une part à l'information auditive (départ rapide en particulier), d'autre part au signal visuel (stabilisation correcte à la nouvelle position d'équilibre), on peut supposer deux "boucles" dans le modèle de l'opérateur: l'une "auditive" l'autre "visuelle". Le temps de transmission de ces informations étant différent et la contribution de celles-ci pouvant être modulée (étage supérieur) pour aboutir à une réponse manuelle quasi optimale, on peut prétendre que la voie auditive agit non seulement sur les paramètres du modèle du sujet, mais encore sur la séquence dynamique de la trajectoire manuelle au cours d'un déplacement.

#### Réactions de l'opérateur humain à des stimulus continus

L'examen des résultats de cette analyse est représenté sur le tableau de la figure A.III.1.7 qui résume l'étude statistique des valeurs caractéristiques des réponses visuelle et manuelle à des stimulus sinusoïdaux et en dents de scie. Le paramètre "sujet" étant prédominant nous obtenons des valeurs du coefficient de variation  $V$  relativement élevées, il faut alors interpréter ces résultats avec circonspection. Remarquons (tracés expérimentaux des réponses visuelles et manuelles figure A.III.1.8) l'aspect non-linéaire du mouvement oculo-moteur illustré par de petits "sauts" et une forme en "escalier" tendant vers un signal carré avant le décrochage du système visuel (mouvement inexistant).

	Retard manuel $R_M$			Temps de coïncidence oeil main $t_c$		
	I.V	I.V.A	I.A.	I.V	I.V.A	I.A
Valeur moyenne en sec.	0,31	0,25	0,25	1	0,9	1,9
Ecart type	0,0122	0,0123	0,0166	0,07	0,036	0,2
Variance V	0,04	0,049	0,067	0,07	0,04	0,11

Figure A.III.1.6 : Tableau récapitulatif des valeurs de  $R_M$  et de  $t_c$  pour différentes natures du signal d'entrée en échelon de position (I=information, V=visuelle, A=auditive)

Fréquence caractéristique	$f_{co}$	$f_{do}$	$f_{sM}$	$f_{aM}$	$f_{LM}$
Valeur moyenne en Hertz	0,88	1,82	-	0,85	2,4
Ecart maximum en Hertz	0,92	1,2	-	1,15	1,6
Variance $\sigma$	0,27	0,46	-	0,37	0,71
Coefficient de variation V	0,3	0,25	-	0,43	0,29
Valeur moyenne en Hertz	0,67	1,82	0,88	1,05	1,94
Ecart maximum en Hertz	0,8	1,1	0,6	0,8	1,06
Variance $\sigma$	0,36	0,51	0,38	0,35	0,56
Coefficient de variation V	0,53	0,28	0,43	0,33	0,28

Stimulus  
sinusoïdal

Stimulus en  
dents de scie



Figure A.III.1.7 : Valeurs caractéristiques des réponses visuelles et manuelles à des signaux sinusoïdaux et en dents de scie

Systeme visuel :  $f_{co}$  : fréquence à partir de laquelle la réponse de l'oeil devient très saccadée.

$f_{do}$  : fréquence correspondant au décrochage visuel.

Systeme manuel :  $f_{sm}$  : fréquence à partir de laquelle la main poursuit la cible sans saccades.

$f_{am}$  : fréquence pour laquelle le mouvement manuel ne contient plus d'oscillations apparentes sur les tracés

$f_{LM}$  : fréquence limite du déplacement de la main.

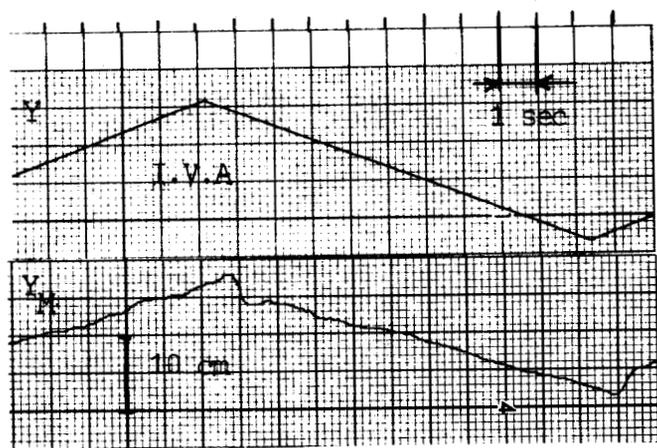
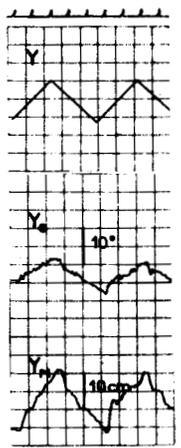
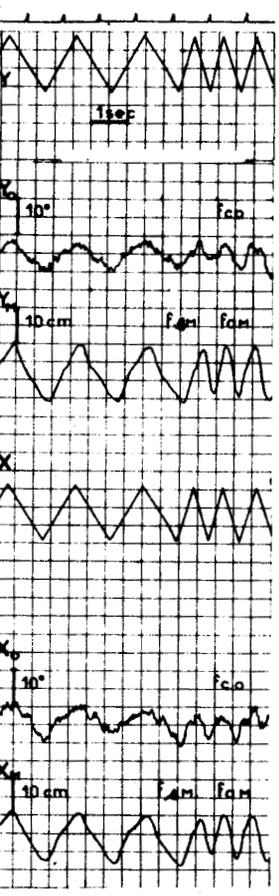
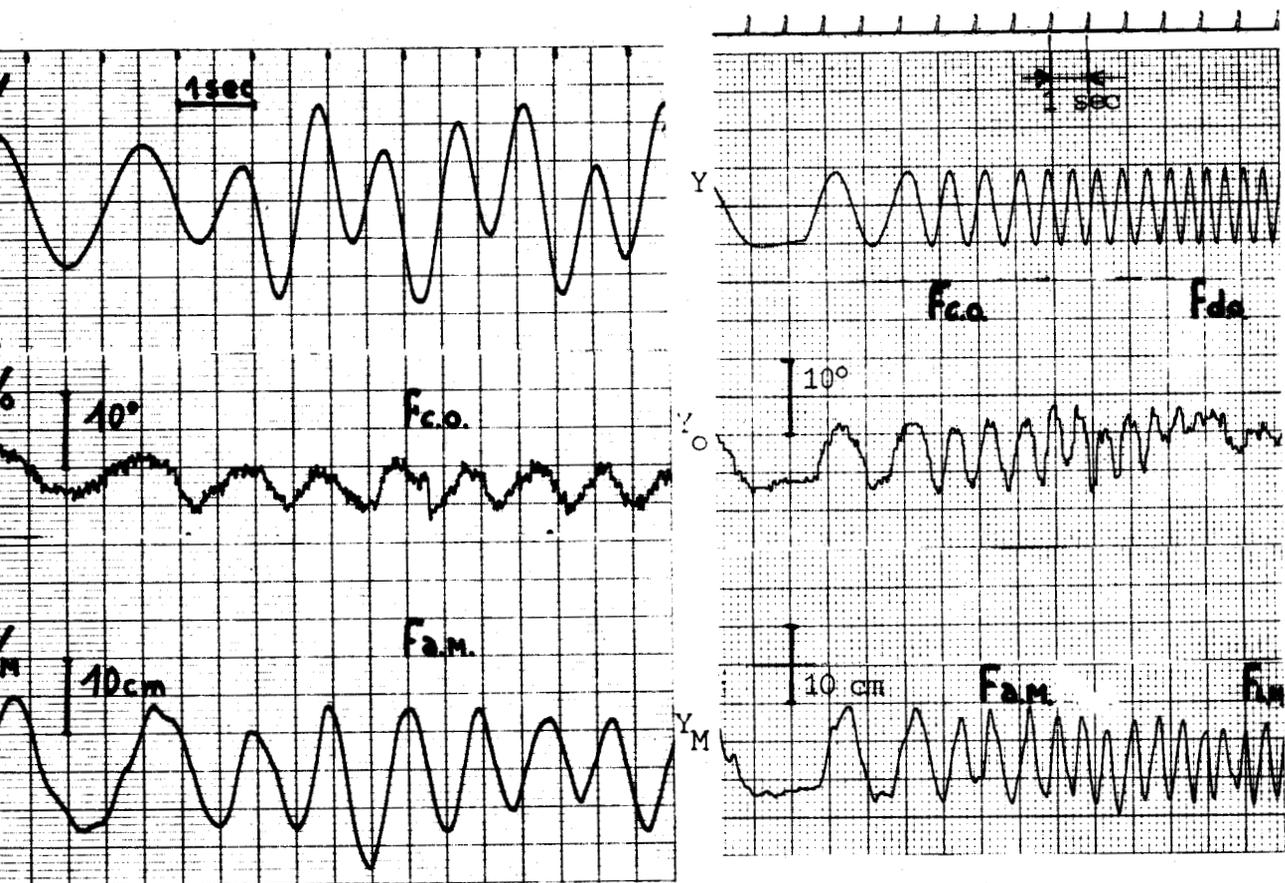


Figure A.III.1.8 : Enregistrements des réponses visuelles et manuelles

Y = composante verticale du déplacement  
 X = composante horizontale du déplacement  
 indice 0 = visuel  
 indice M = manuel

Tracé I.V.A : poursuite manuelle avec informations visuelle et auditive.



ANNEXE A.III.2

Analyse des réponses de l'opérateur en vision latérale

Cette partie d'annexe illustre à l'aide de quelques tracés expérimentaux les différents modes de réponse de l'opérateur humain en vision extra-fovéale mettant en évidence les principales caractéristiques des mouvements effectués par le sujet au cours d'une poursuite (variabilité du seuil de réponse, corrections manuelles lors d'un ajustement, mise en mouvement de la main après une localisation du stimulus...) figure A.III.2.1,2 et 3.

L'analyse comparative des réponses obtenues en vision fovéale et extra-fovéale ( $35^\circ$ ) chez cette population de sujets (assez habitués aux tests) peut se résumer par le tableau figure A.III.2.4 montrant une dispersion plus élevée des valeurs  $R_M$  lorsque l'opérateur réalise un travail en vision extra fovéale

Temps de latence $R_M$ (seconde)	Vision normale $\theta = 0$	Vision extra-fovéale $\theta = 35^\circ$
Valeur moyenne	0,26	0,39
Variance $\sigma$	0,025	0,053
Coefficient de variation V	0,097	0,14

Figure A.III.2.4 : Valeurs du temps de latence à un stimulus en échelon de position en vision centrale ( $\theta=0$ ) et en vision périphérique ( $\theta=35^\circ$ ).

Les enregistrements obtenus à des entrées continues (sinusoïdes, dents de scie) révèlent le phénomène de non-linéarité non seulement en fonction de l'amplitude, mais aussi en fonction de la fréquence du signal : la rapidité ou la vitesse du mouvement de la cible modifie le "seuil" de réponse de l'opérateur. L'examen des enregistrements figure A.III.2.5 et 6 révèle que la poursuite manuelle en vision de côté s'effectue difficilement, et est entachée d'une erreur non négligeable.

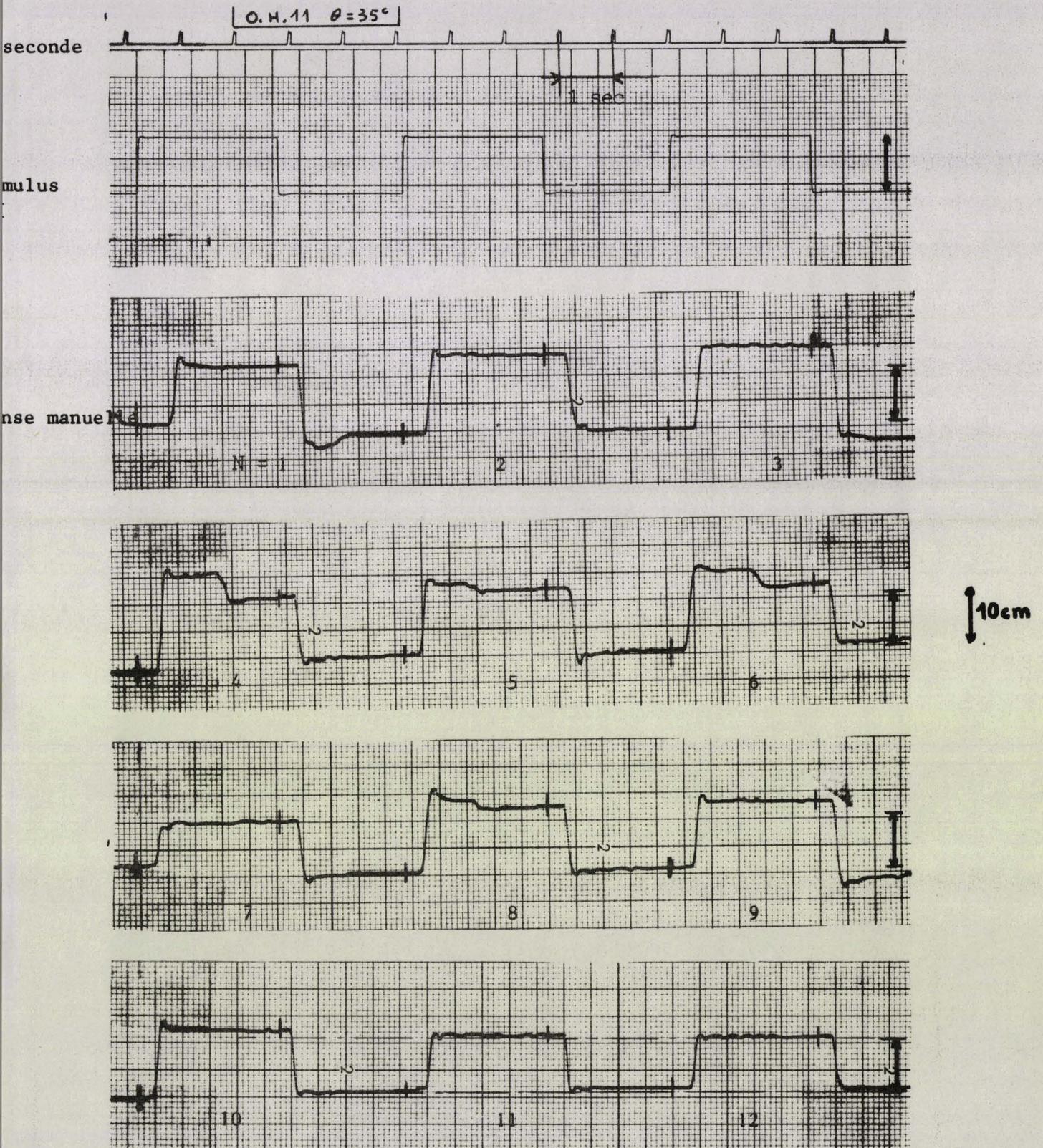


Figure A.III.2.1 : Réponse manuelle de l'opérateur humain en vision latérale à des stimulus échelon identiques. (Adaptation).

BUS  
LILLE

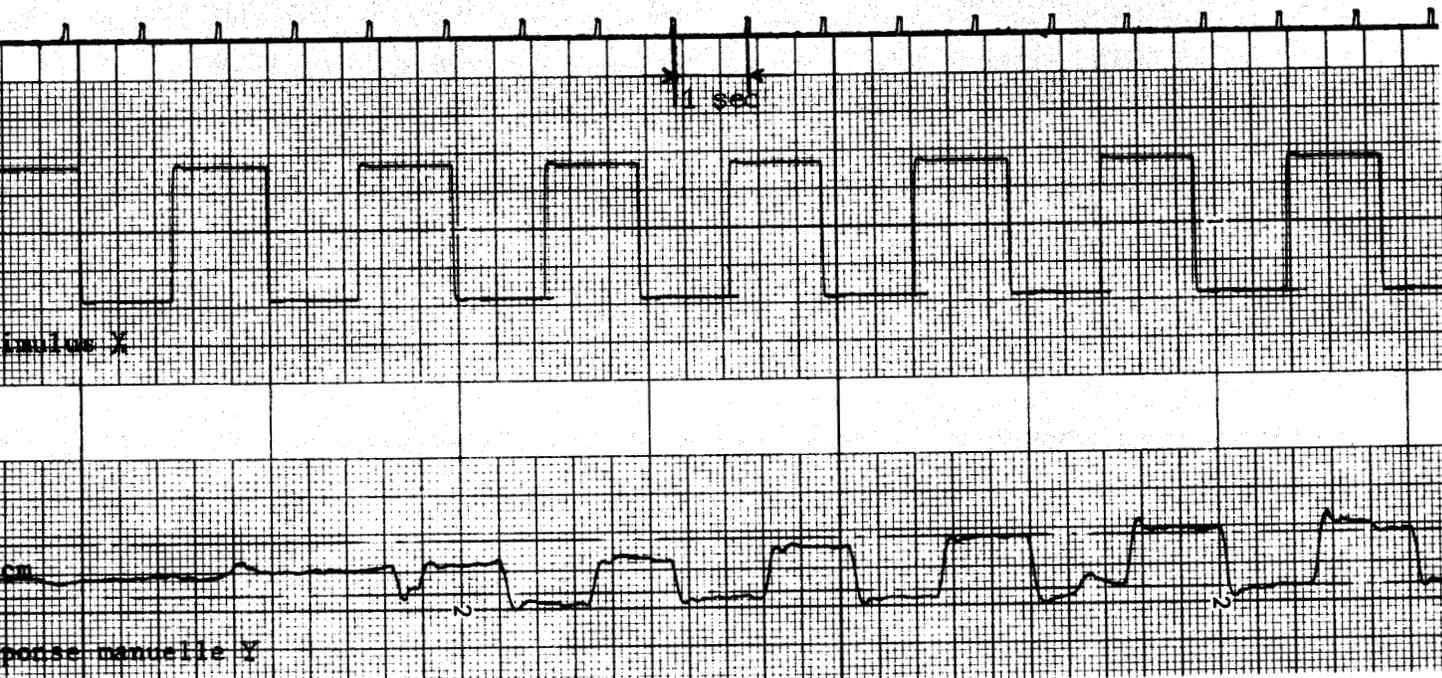


Figure A.III.2.2 : mise en action du mouvement manuel à un stimulus répété

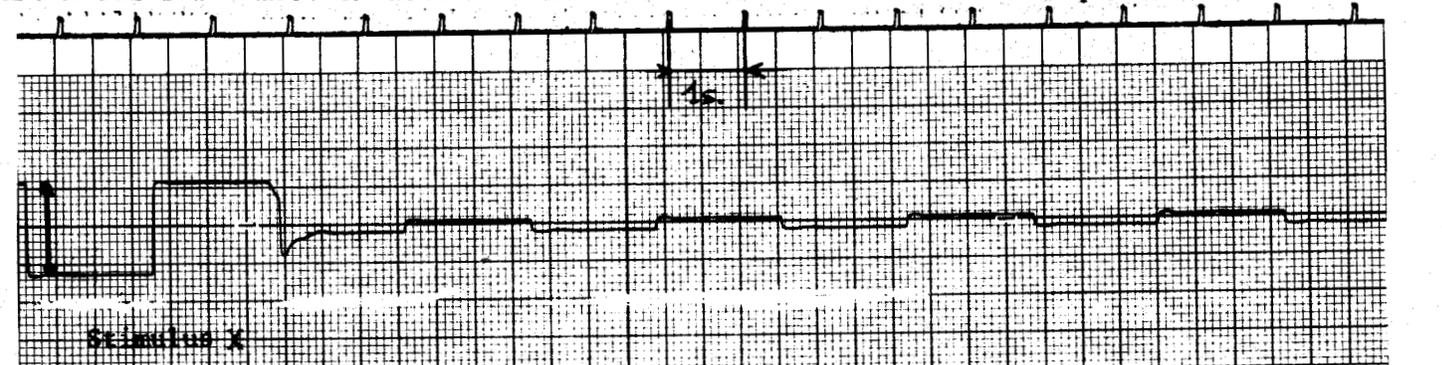


Figure A.III.2.3: Variabilité du seuil de réponse et adaptation

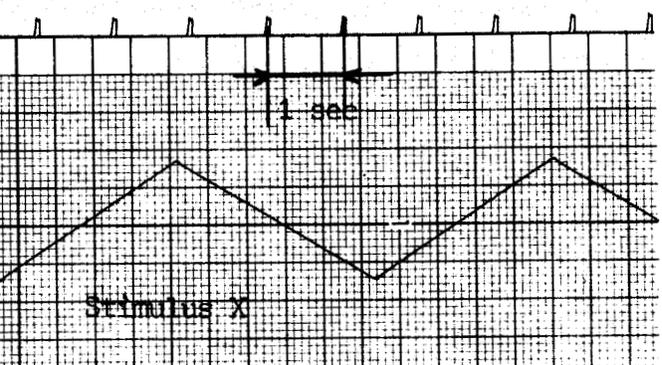
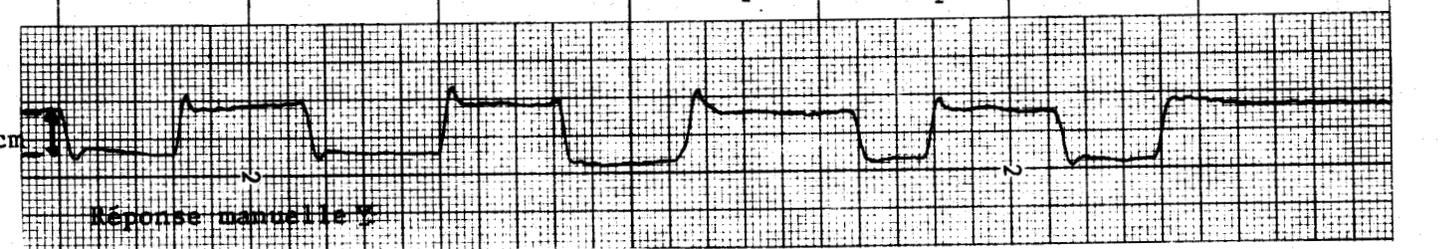


Figure A.III.2.5 : Réponse de la main au cours d'un pistage à  $\theta = 35^\circ$

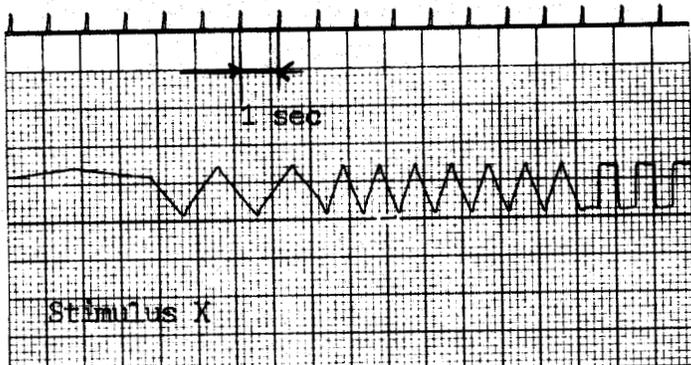
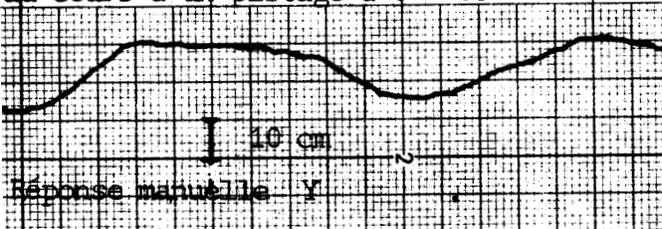
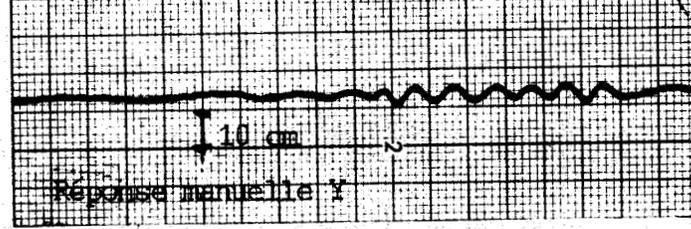


Figure A.III.2.6 : Réponse manuelle en vision latérale  $\theta = 35^\circ$



BUS LILLE

ANNEXE A.IV.1

Structure du système humain

Il est intéressant de constater que le modèle de la commande d'un processus industriel ait une certaine analogie avec le modèle du système humain réalisant un travail (figure A.IV.1.1). L'évolution du système est définie par la variation d'un indice de performance I lié par exemple dans notre cas à l'habileté du sujet :

$$I = f(U, Y, Z)$$

L'application de ce système à celui de l'être humain présente une difficulté étant donné que les mesures possibles sur le processus humain sont limitées à X et Y, et il est à noter la difficulté d'identifier l'entrée réellement appréhendée par le système humain.

Détection des stimulus

La simulation sur ordinateur du système humain amène à rechercher des critères plus "simplifiés" et moins "interdépendants" que ceux qui peuvent être interprétés par la physiologie du système nerveux. C'est pourquoi, tout en tenant compte de ce dernier point de vue, nous caractérisons le phénomène de détection en trois fonctions :

- les "entrées possibles"
- la "détection" proprement dite de ces entrées possibles
- la perception réelle pouvant amener une réaction de l'opérateur.

En ce qui concerne la "détection" proprement dite (figure A.IV.1.2) nous pouvons écrire :

. si la luminance L dépasse le seuil  $\Delta_1$

$$s_1 = \int_0^t l \, dt$$

et à l'instant  $t_1$  défini par :

$$s_1 = \Delta_2 = \int_0^{t_1} l \, dt = l \, t_1$$

la sortie  $s_1$  garde une valeur constante pouvant simuler la saturation des cellules. La remise à zéro de cette intégrateur est utilisée pour simuler une persistance rétinienne du stimulus, en particulier quand le temps d'apparition de celui-ci est très petit.

L'instant  $t_1$  interprète le fait que les conditions initiales de la détection sont "suffisantes" (seuil énergétique).

Le niveau "continu"  $N_1$  de charge de travail intervient en  $s_2$  tel que :

$$s_2 = N_1 = \int_{t_2}^{t_1} \Delta_3 dt = \Delta_3(t_2 - t_1)$$

En accord avec la physiologie cette représentation souligne la possibilité d'une suite de prise d'information du stimulus répétée à la période  $t_2 - t_1$  (intégrateur  $I_2$  avec quantum  $N_1$ )

La valeur de  $t_2$  est donnée par :

$$t_2 = \frac{N_1}{\Delta_3} + t_1$$
$$t_2 = \frac{N_1}{\Delta_3} + \frac{\Delta_2}{\ell} = \frac{N_1(C_p)}{\Delta_3(V)} + \frac{\Delta_2(\theta)}{\ell(\theta)} = f(C_p, \theta, \ell, V)$$

### Echantillonnage des informations

L'analyse expérimentale permet de dégager les observations suivantes :

- l'attention du sujet dans l'accomplissement de sa tâche peut être interprétée par une suite d'échantillonnage principalement fonction de la difficulté du travail.
- la période des échantillons n'est pas constante, elle varie avec l'attention de l'opérateur et avec la localisation du stimulus-cible.

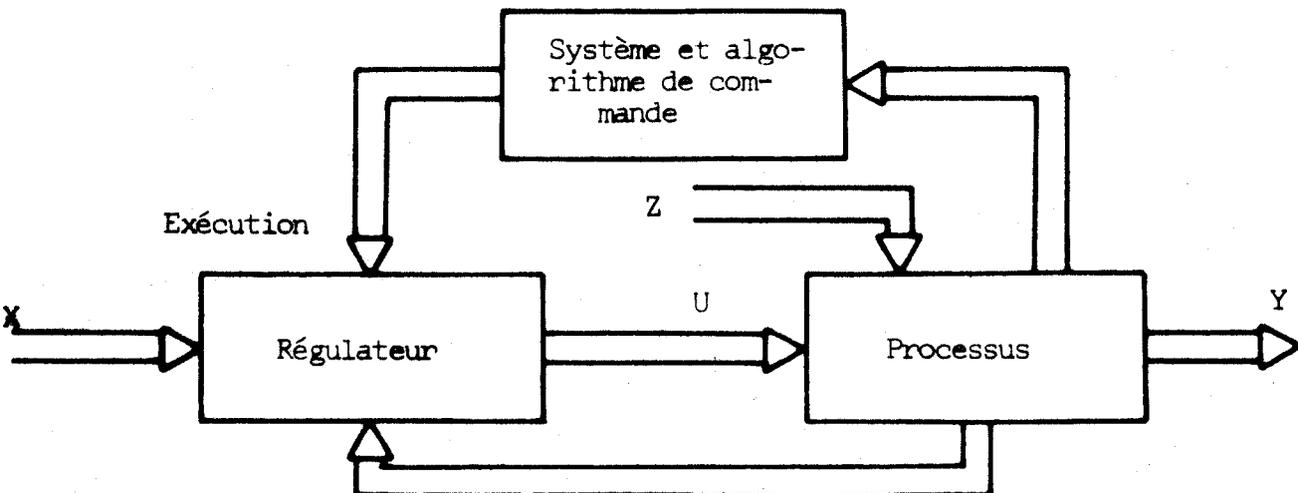


Figure A.IV.1.1 : Modèle d'une commande de processus.

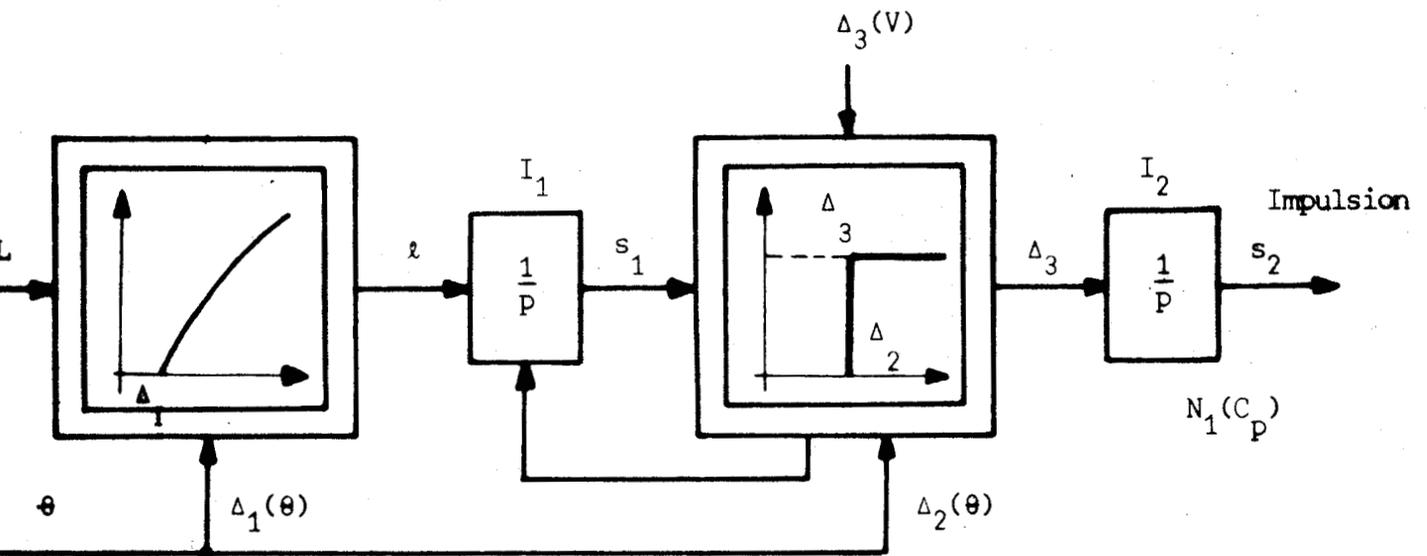


Figure A.IV.1.2 : Modèle de la "détection" proprement dite.

$L$  = luminosité du point extérieur

$l$  = luminosité "perçue"

$\theta$  = angle latéral de vision du point

$\Delta_1(\theta), \Delta_2(\theta)$  = seuils fonction de la position latérale du point.

$\Delta_3(V)$  = amplitude d'entrée de  $I_2$  fonction de la vitesse du mobile, si elle existe.

$N_1(C_p)$  = niveau "continu" de charge de travail

$I_1, I_2$  = intégrateur

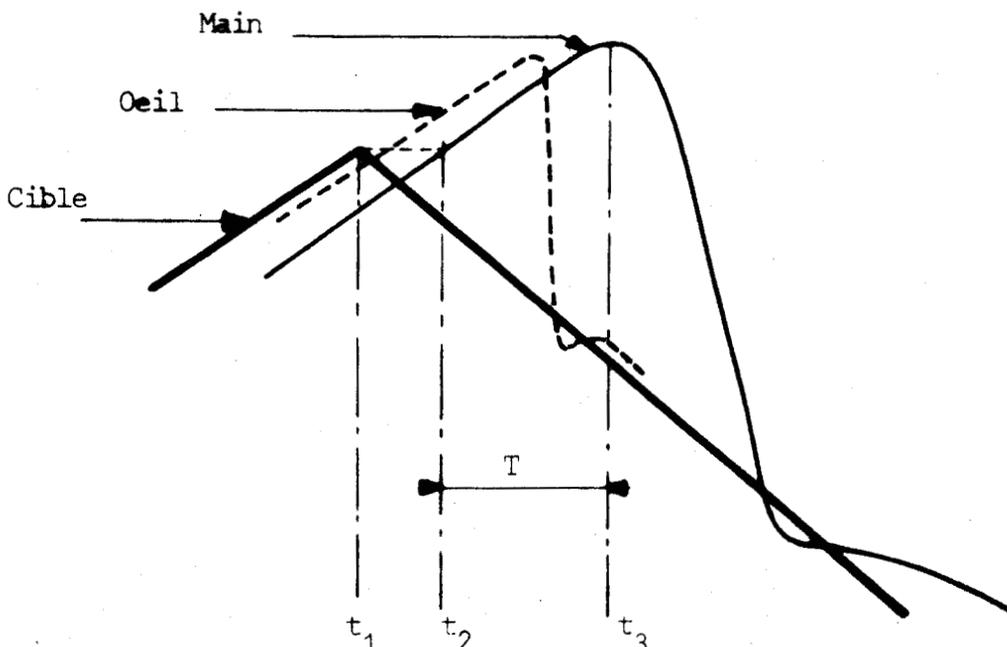


Figure A.IV.1.3 : Réponse caractéristique du sujet à un stimulus en dents de scie.

dans le champ visuel

- les fréquences limite et de décrochage des systèmes manuel et visuel permettent de supposer que le "régulateur" du modèle humain est limité par un seuil de restitution des informations d'entrée.
- le phénomène de "réponse" de système en boucle ouverte apparaît dans la séquence dynamique des mouvements (démarrage, mouvement manuel en vision extra-fovéale).
- Le dépassement très important suivi d'aucune oscillation dans les réponses à un échelon de position.

Ces différentes propriétés illustrent un phénomène d'échantillonnage que nous pouvons interpréter à l'aide d'une réponse caractéristique de l'opérateur (figure A.IV.1.3) mettant en évidence une période minimum des "prises" d'information :  $t_3 - t_2$  ; l'intervalle de temps  $t_2 - t_1$  voisin de 0,15 seconde rappelle la valeur du retard pur  $R_p$ . Notons que cette analyse indique une variation du temps  $T = t_3 - t_2$  fonction de la vitesse de la cible prise en  $t_1$  :  $T$  varie de 0,3 ou 0,4 seconde à 0,2 seconde quand la vitesse augmente. Cette limite  $T=0,2$  seconde rappelle la valeur obtenue à l'aide de la fréquence limite manuelle  $T = \frac{1}{2 \times f_{LM}}$ .

ANNEXE A.IV.2

Transmittance et gain variable dans la fonction de transfert de l'opérateur humain

L'analyse des réponses manuelles de l'opérateur lorsque celui-ci n'a pas la possibilité de capter visuellement l'écart existant entre les points objet (le but) et suiveur (enregistrement figure A.IV.2.1) permet de constater que le système manuel se comporte d'une manière davantage "réflexe" : temps de latence plus petit, erreur permanente considérable (supérieure à celle obtenue en vision latérale), absence d'oscillation d'ajustement (propriété décelée aussi en vision périphérique), .... L'analyse des variations de l'amplitude du mouvement manuel en fonction de celle du stimulus échelon de position conduit à introduire un gain variable dans la fonction de transfert de l'opérateur compte tenu des hypothèses relatives à la mise en action du sujet ; le départ s'effectuant en "boucle ouverte".

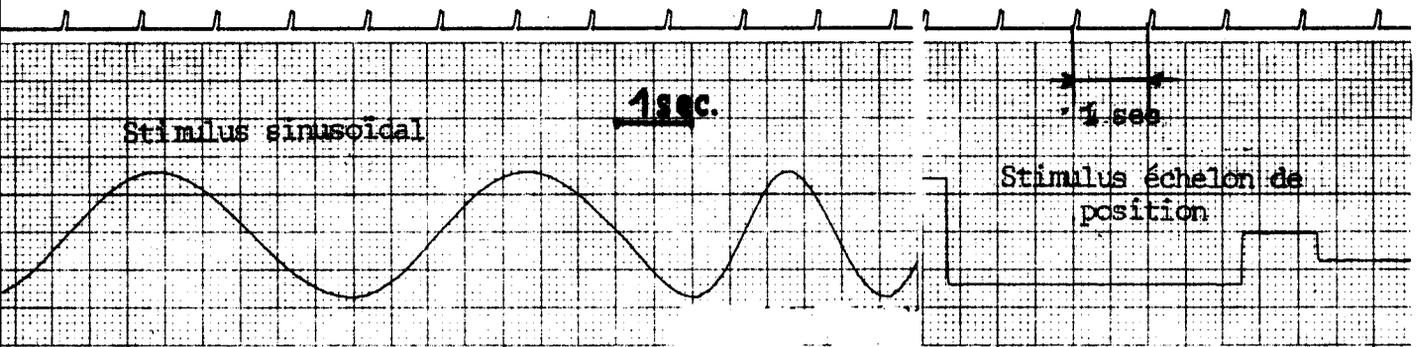
En outre, les résultats présentés (chapitre IV.5) autorisent à proposer une transmittance contenant une ou plusieurs constantes de temps. L'identification sur ordinateur permet de proposer diverses transmittances d'ordre supérieur ou égal à 2 en modifiant la structure du régulateur du modèle de l'opérateur. La nécessité d'introduire "différents comportements" de l'homme en fonction de la localisation du stimulus et de l'apprentissage suggère une structure élaborée du régulateur plutôt qu'une transmittance d'ordre élevé. Compte tenu de l'échantillonneur bloqueur du premier ordre (coefficient  $k$  variable avec le nombre de tests) et de certaines hypothèses de linéarité, l'approximation de la transmittance peut s'écrire :

- .  $L[u(t)]$  = transformée de Laplace de  $U(t)$
- . à une entrée en échelon de position d'amplitude unité et pour  $t \in [0, T]$  ;  
 $T$  = période d'échantillonnage ;  $k$  = paramètre de l'échantillonneur  $B_1$ .

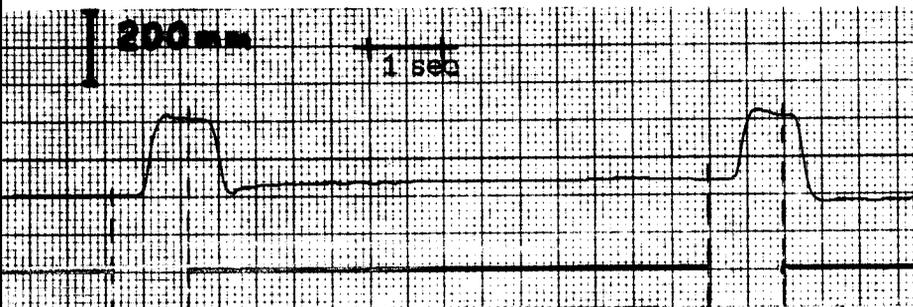
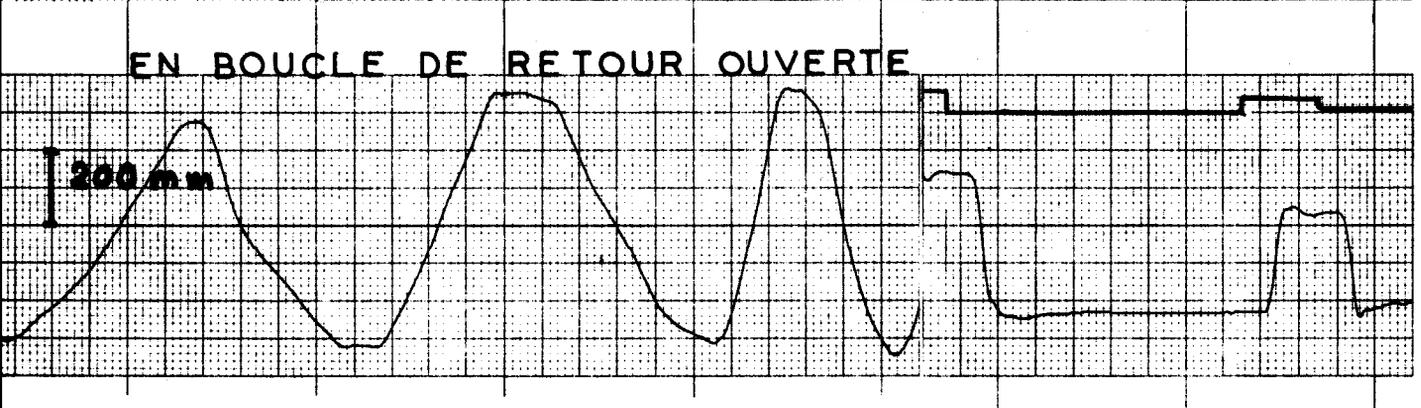
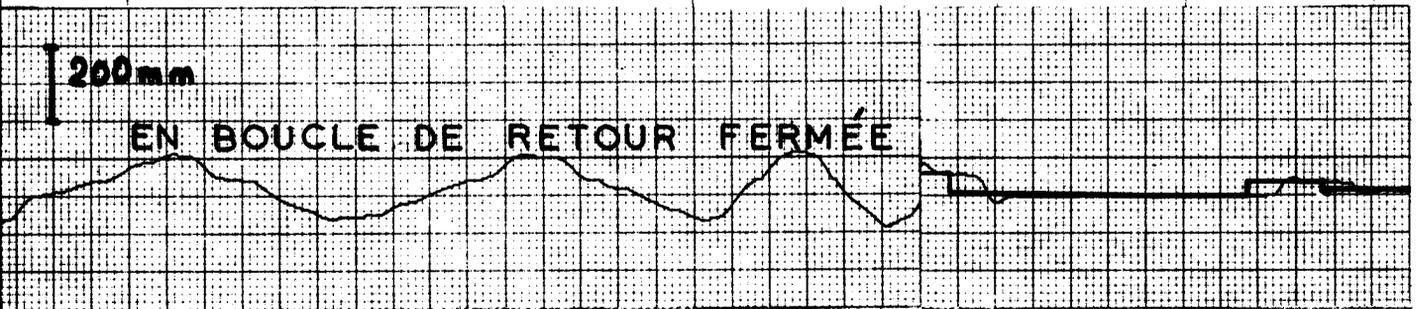
$$L[u(t)] \cdot G(p) = L\left[4,5 t^2\right]$$

$$G(p) = \frac{K}{p(1+\tau p)}$$

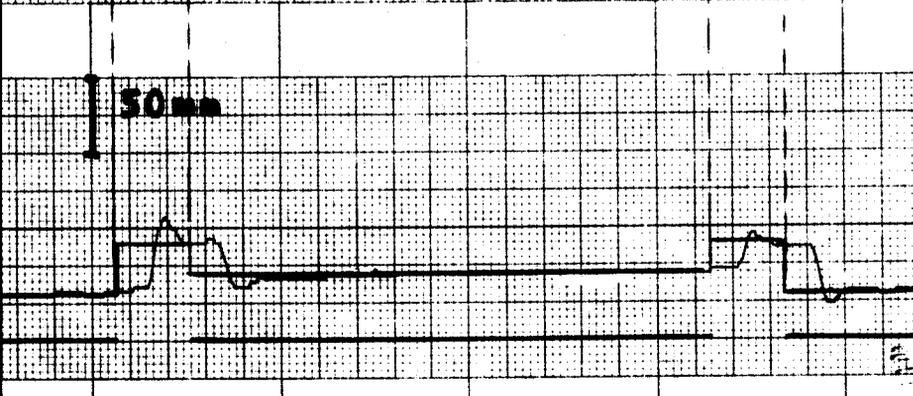
Cette formulation est en accord avec les résultats obtenus en vision extra-fovéale ( $35^\circ$ ) étant donné que lors des premiers essais manuels, à une entrée impulsionnelle, le comportement du sujet est représentatif d'un système en boucle ouverte (la main conservant sa position relative au premier front vertical de l'impulsion).



ENREGISTREMENT DU MOUVEMENT



Déplacement manuel en boucle de retour ouverte.



Déplacement de l'objet et de la main en boucle de retour fermée.



Figure A.IV.2.1 : Enregistrement des réponses manuelles en boucle fermée et en boucle ouverte (1 point objet sur l'écran).

Le système visuel et ses non-linéarités

La présence d'un seuil et d'une saturation est indéniable dans la caractéristique non-linéaire du modèle. La simulation des propriétés décelées en vision périphérique met en évidence la nécessité d'introduire une non-linéarité relevant d'une quantification du signal d'entrée figure A.IV.2.2. Ce type de non-linéarité prévoit la possibilité d'une modification du quantum  $q$  en fonction des sujets et de la localisation des stimulus dans le champ visuel ; cette représentation peut illustrer la "perturbation" amenée lors d'une excentricité de l'image stimulus par rapport au centre du champ de vision. Par ailleurs cette caractéristique non-linéaire se trouve justifiée lors de la simulation du modèle de l'opérateur dans des tests d'apprentissage : diminution du quantum  $q$  en fonction du nombre d'essais effectués, éliminant l'effet de "perturbation" au cours de l'apprentissage.

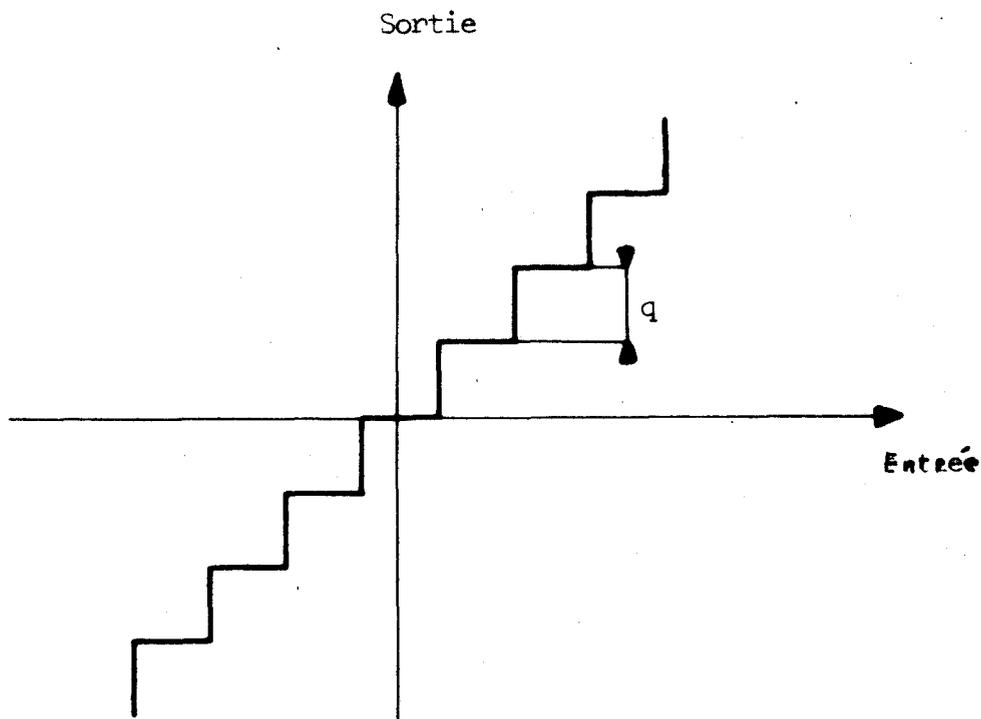


Figure A.IV.2.2 : Quantification dans la fonction de transfert du sujet.

Le phénomène non-linéaire du mouvement de l'oeil est mis en évidence lors d'expériences de poursuite visuelle en boucle réellement fermée (3 points sur l'écran de présentation des signaux). L'examen de l'enregistrement figure A.IV.2.3 illustre un comportement humain essentiellement non-linéaire : arrêts du mouvement de l'oeil suivis d'un déplacement rapide, même lorsque la vitesse de la cible est très faible. Ce test permet de prétendre que le "seuil" de la caractéristique non-linéaire est représentatif d'un "degré" de comportement volontaire, lié à la difficulté du travail demandé.

Signalons que cette expérience s'est avérée toutefois difficile d'une part à cause des différents rayons de courbure de la cornée des sujets et du "bruit" se superposant à la réponse visuelle, d'autre part à cause de l'étonnement des opérateurs à la vue d'un point solidaire du mouvement de l'œil. Certains sujets sont totalement perturbés, d'autres au contraire n'éprouvent aucune difficulté réelle.

### Point de fixation visuelle

Comme nous l'avons signalé, les recherches concernant la définition de l'espace visuel montrent la difficulté d'interpréter les phénomènes de la vision d'une manière systématique. En ce qui nous concerne nous supposons un plan de référence passant par les deux fovéas et la direction du regard ainsi qu'une rétine équivalente au champ de vision possible. Le point  $X_i$  peut alors être défini par deux coordonnées, la distance séparant  $x_i$  (point image de  $X_i$ ) de la "fovéa équivalente" étant l'une des grandeurs essentielles caractérisant le comportement du système. Par ailleurs le chapitre II révèle que le nombre de stimulus "non-vu" peut être fonction de la vitesse de déplacement du mobile, de sa luminosité et de la charge principale de travail de l'opérateur.

Ces phénomènes ne sont pas systématiques, c'est pourquoi nous introduisons dans la formulation du point choisi  $X_{ic}$  un seuil  $\Delta$  lié à l'étage cortical supérieur.

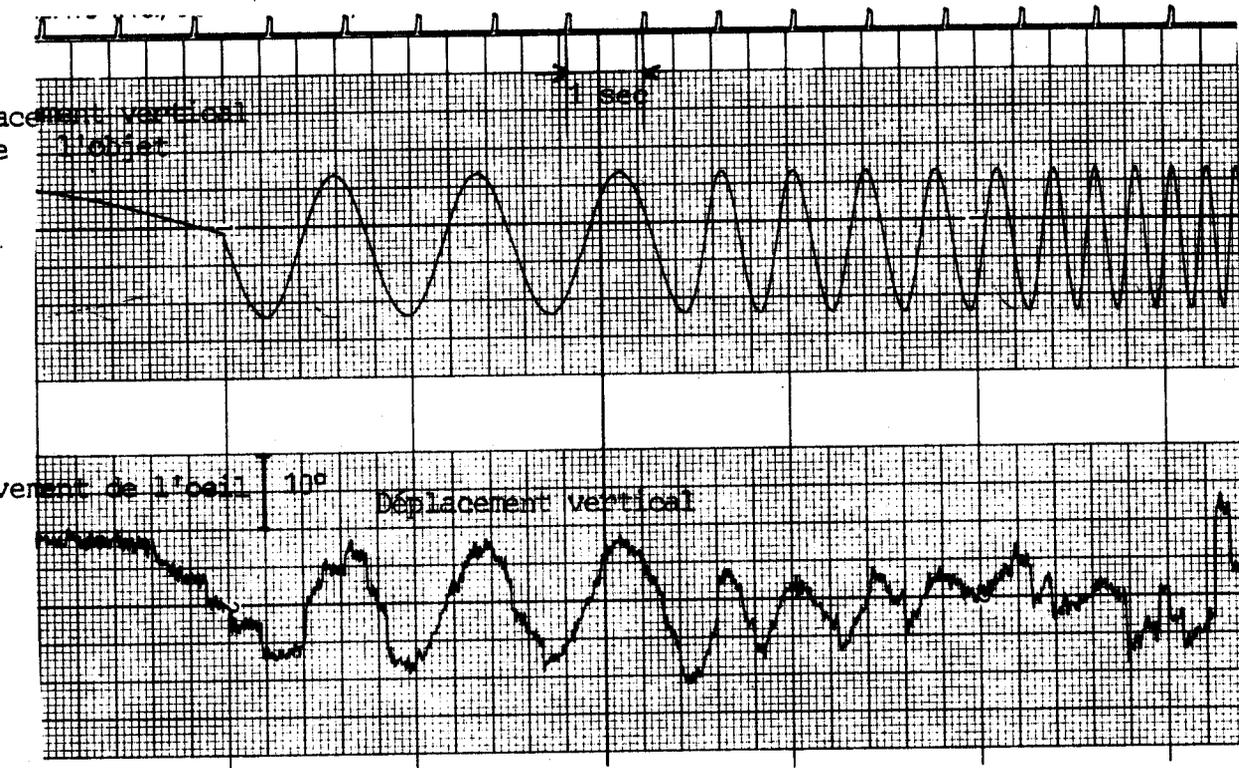
### Caractérisation de l'influence de la vitesse du mobile-objet dans le modèle de l'opérateur

Les analyses expérimentales ont révélé l'influence de ce paramètre en vision frontale et en vision périphérique : seuil  $\Delta_o = g(\theta, f, \eta)$  ;  $T = f(V)$  ; seuil  $\Delta$ .

En vision extra-fovéale ( $35^\circ$ ) particulièrement, l'analyse des résultats met en évidence un seuil de réponse  $\Delta$  non seulement fonction de l'amplitude  $A$  mais aussi de la vitesse  $V$  du stimulus.

$$\Delta = f(A, V, \theta)$$

L'examen des tracés obtenus amène à la variation représentée figure A.IV. 2.4 pour l'un de nos sujets.



Poursuite visuelle d'une cible objet de déplacement sinusoïdal (système visuel en "boucle fermée")

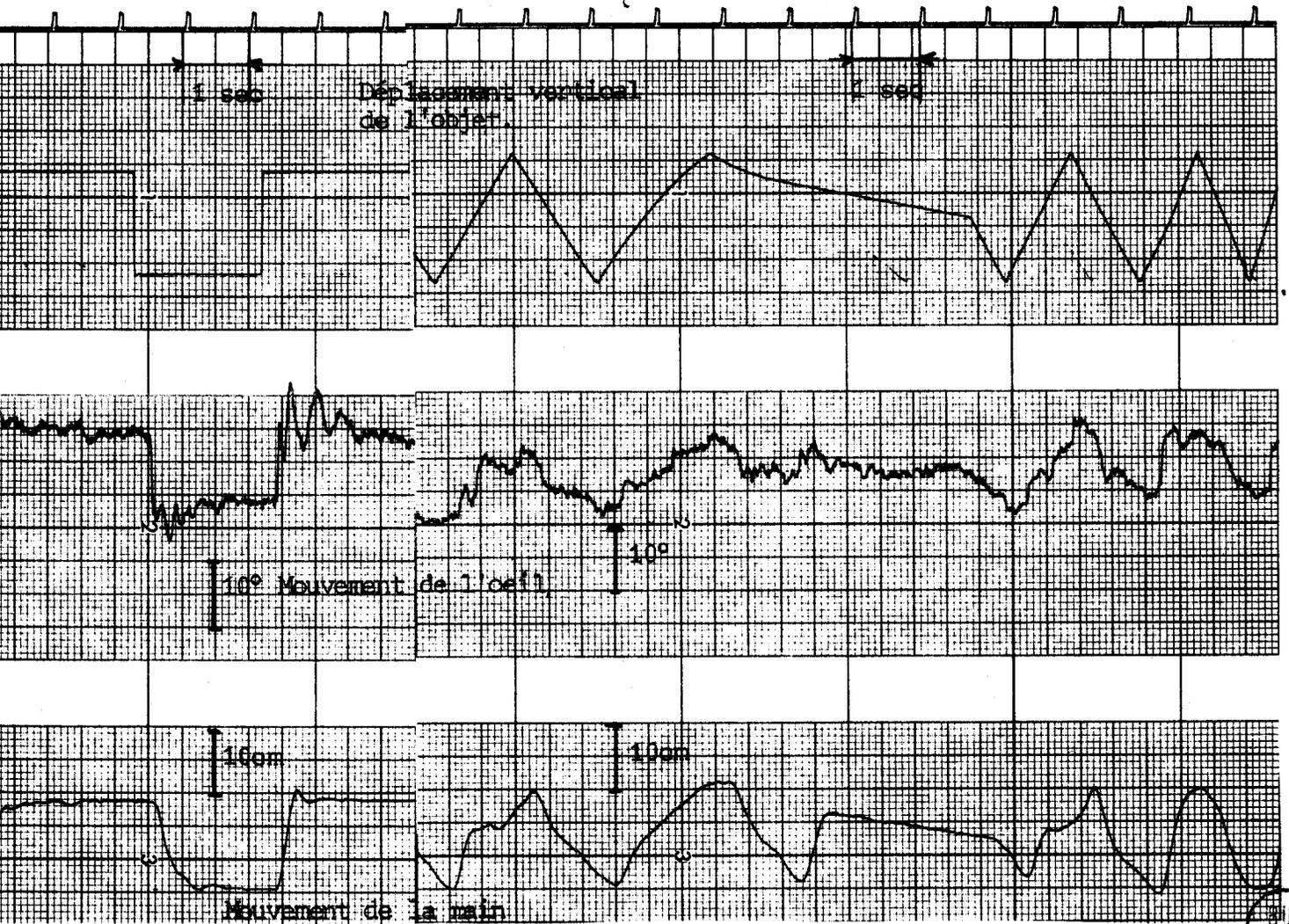


Figure A.IV. 2.3 : Enregistrement des mouvements de l'œil et de la main ; système visuel en "boucle fermée".



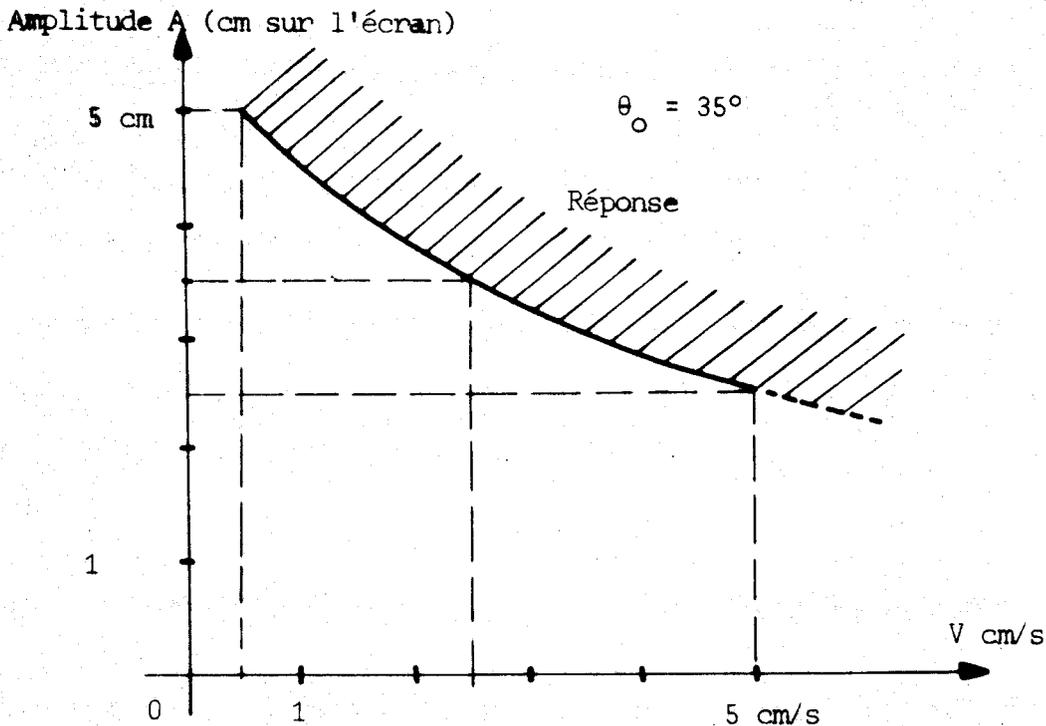


Figure A.IV.2.4 : Seuil de réponse en fonction de la vitesse (stimulus en dents de scie) à  $\theta = 35^\circ$ .

Il est bien entendu qu'une fois ce seuil de réponse atteint, les phénomènes non-linéaires précédents prennent progressivement place en fonction de la vitesse du mobile.

Par ailleurs compte tenu des retours kinesthésiques chez l'homme et de certaines propriétés décelées dans les réponses dynamiques de l'opérateur, nous introduisons un retour tachymétrique  $a_0 + a_1 p$  permettant de minimiser l'écart entre le comportement de l'opérateur et celui du modèle simulé.

#### Interaction du système auditif lors d'une tâche de poursuite manuelle

Si nous supprimons l'information sonore  $\mathcal{E}_a$  juste après le départ de la réaction manuelle, celle-ci se trouve pratiquement inchangée. C'est pourquoi nous avons effectué une série d'expériences dans lesquelles le signal sonore n'est qu'un "top" auditif de durée égale à 0,2 ou 0,3 seconde. Dans ce protocole le sujet n'est alors renseigné auditivement que sur le déplacement de la position du stimulus. Les réponses obtenues (identiques aux précédentes) permettent de supposer que la réaction manuelle est principalement caractérisée, pendant son démarrage, par la contribution du stimulus sonore ( $R_M$  plus faible,  $T$  plus petit,  $K_V$  plus élevé) mais celle-ci disparaît pour laisser place au régulateur visuel permettant un ajustement fin à la nouvelle position d'équilibre.

ANNEXE A.V.

Tracés expérimentaux et schémas  
de simulation

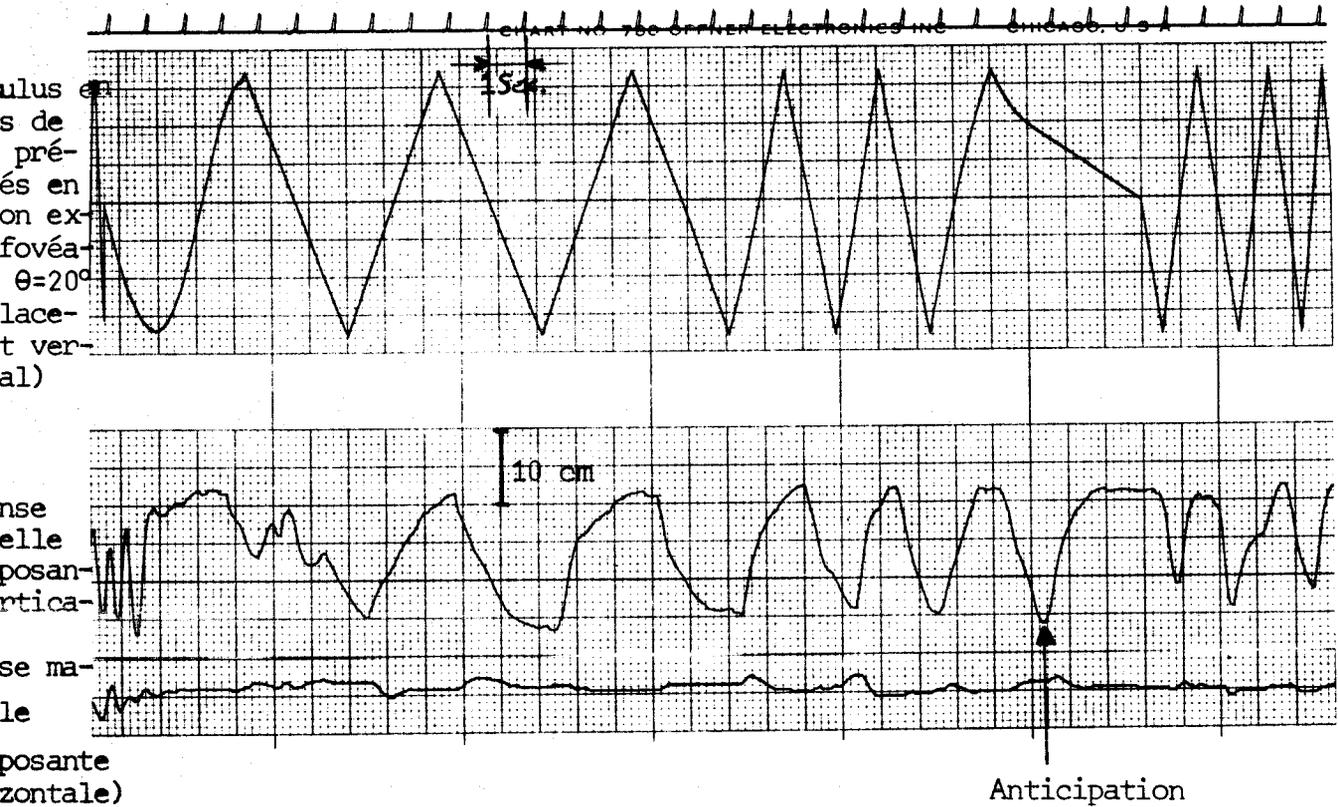


Figure A.V.1 : Enregistrement du mouvement de la main à un stimulus situé en vision extra-fovéale ( $20^\circ$ ), caractérisant une anticipation de la main lors de la poursuite.

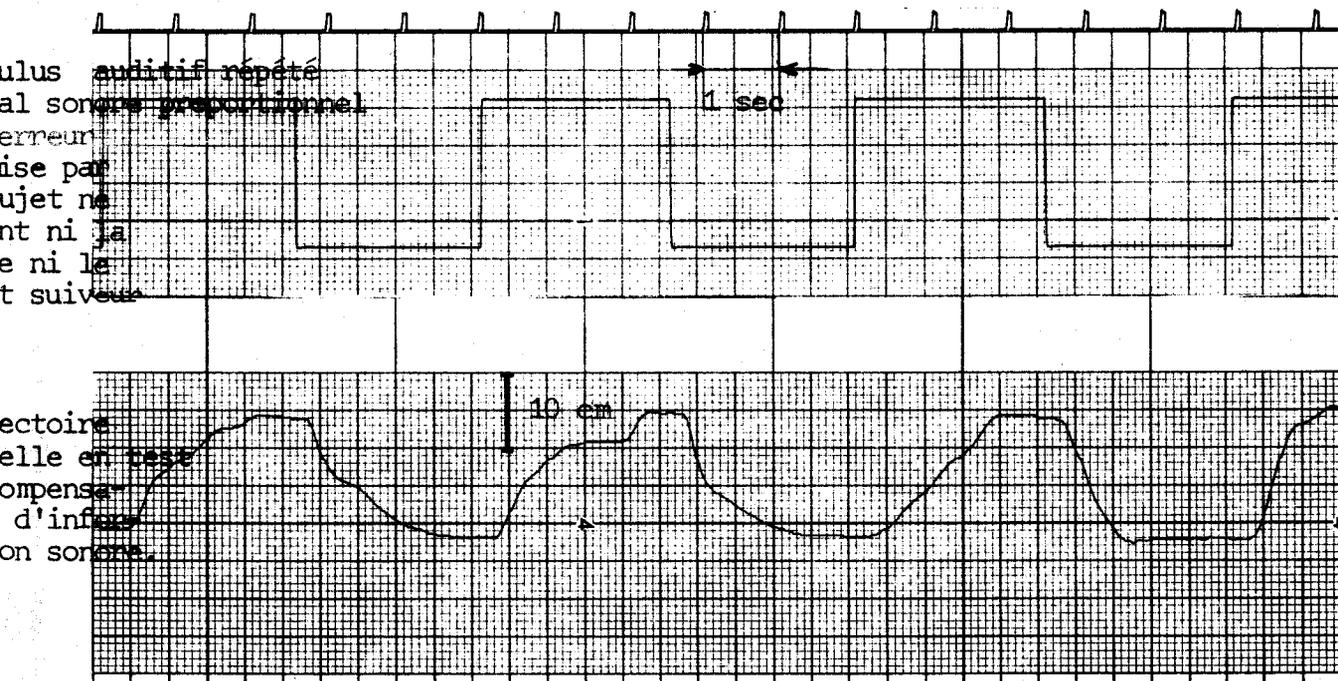


Figure A.V.2 : Déplacement de la main à un stimulus en échelon de position répété, illustrant les propriétés adaptatives de l'opérateur humain (signal de nature sonore en "compensation").

BUS  
LILLE

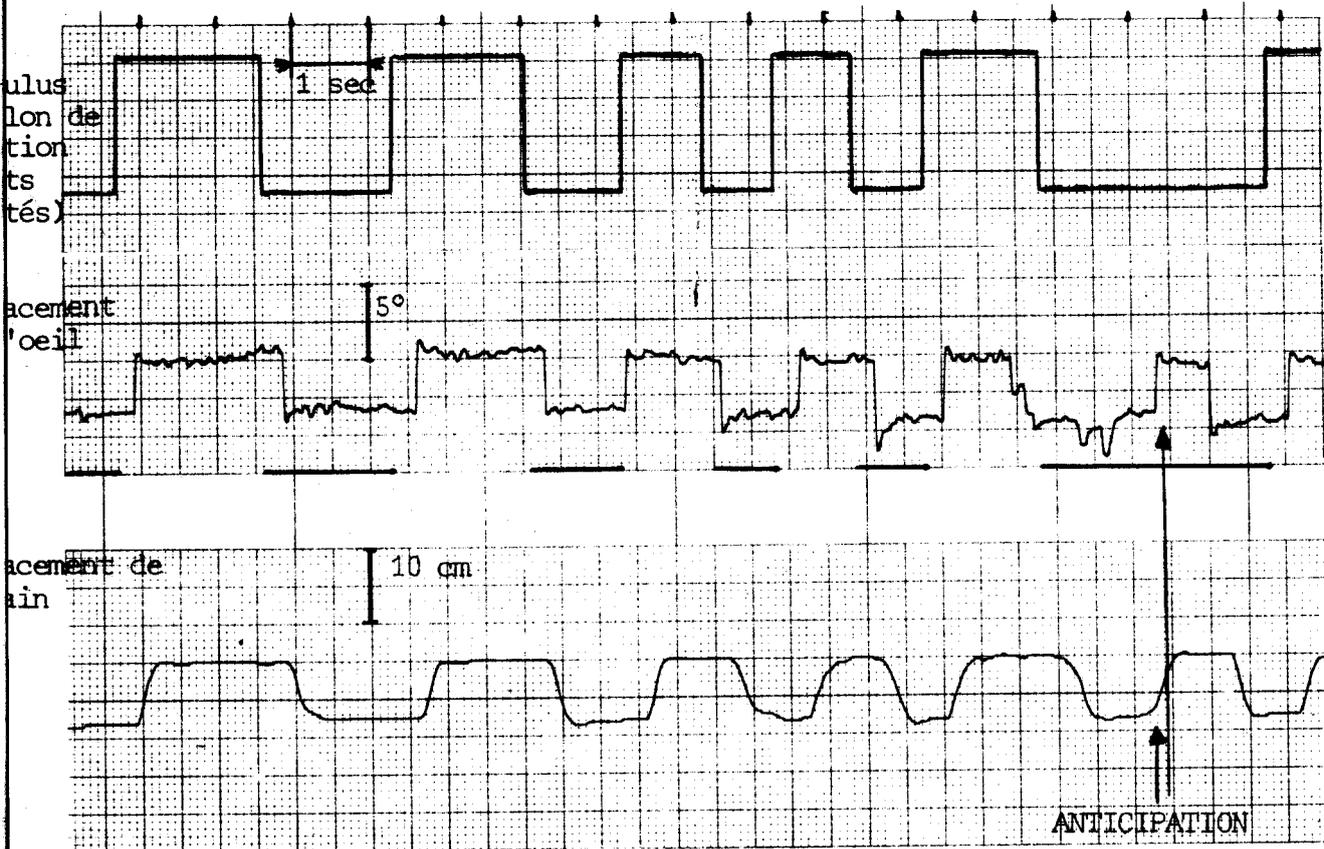


Figure A.V.3 : Mouvements visuel et manuel au cours d'un test de poursuite d'un objet (information visuelle).

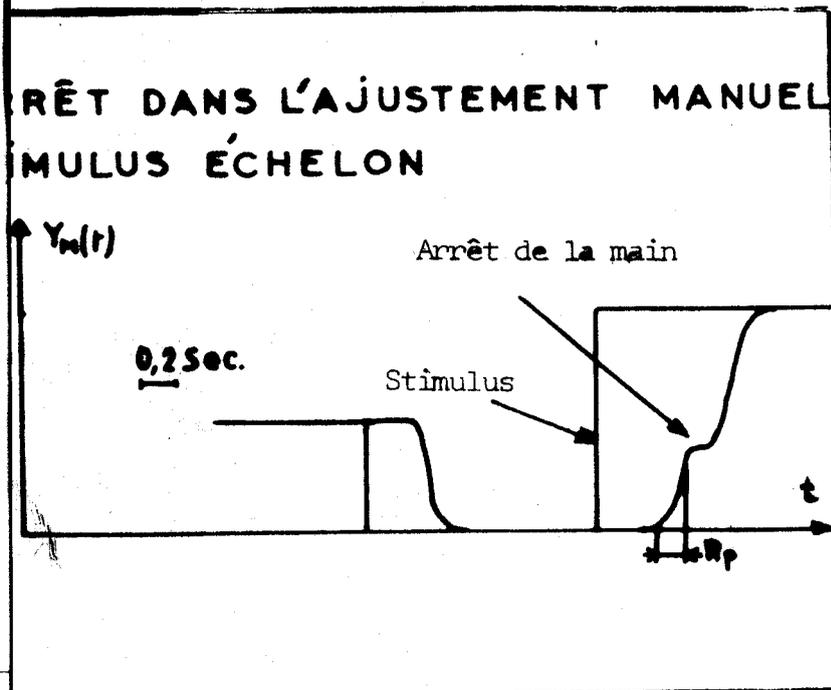


Figure A.V.4 : Réponse manuelle après une série de réactions à un stimulus de plus faible amplitude

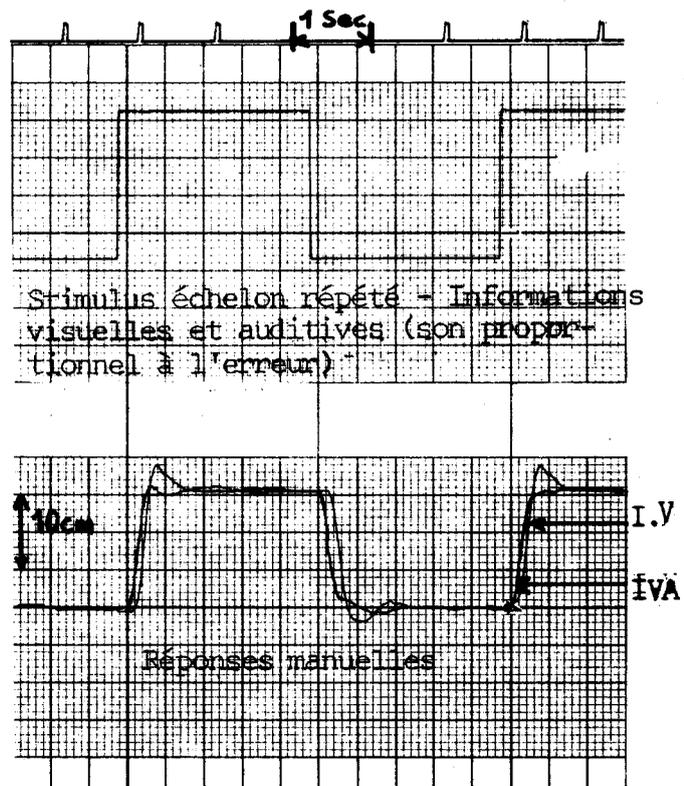


Figure A.V.5 : Réponses de la main à une même série de stimulus identiques : l'une avec information visuelle (I.V), l'autre avec information visuelle et auditive (I.V.A).

Notations des schémas de simulation

Figure A.V.6 : Système visuel

$C_p$  : stimulus choisi  $X_{ic}$

$y_o(t)$  : mouvement de l'oeil

$\epsilon$  : erreur ;  $|\epsilon|$  : erreur absolue

$\alpha(\epsilon)$  : sortie de la non linéarité ;  $\alpha(\epsilon)_n$  :  $\alpha(\epsilon)$  échantillonnée

$\Delta_o$  : seuil visuel ;  $\delta_o$  : seuil minimum

T : période d'échantillonnage (T = 0,2 seconde)

K : gain (K=10) ;  $\lambda$  = coefficient du retour tachymétrique ( $\lambda=0,2$ )

V : vitesse ;  $V_n$  : V échantillonnée

$T(C_p)$  : période du signal d'entrée

$\eta$  : coefficient introduisant l'effet non linéaire en fonction de la vitesse

$f_1(|\epsilon|)$  : contribution non-linéaire de l'erreur sur le seuil  $\Delta_o$

$f_2(|\epsilon|)$  : contribution non-linéaire de l'erreur sur la période T et sur la valeur du temps de latence  $R_o$ .

$a_o, b_o$  : constante ;  $\frac{a_o}{b_o} = 0,2$  seconde

$\xi_o$  : constante très petite par rapport à  $\gamma$

La disproportion entre le retard  $R_o$  et le temps de montée  $t_{mo}$  visuels a amené lors de la simulation à effectuer, un changement d'échelle des temps de rapport : 5.

Figure A.V.7 : Système manuel

$\alpha_q(\epsilon)$  : sortie du quantifieur

k : paramètre de l'échantillonneur du premier ordre.

$K_1, K_2$  : gain K de la transmittance  $G(p)_M$

$f_3|\epsilon|$  : contribution non-linéaire de l'erreur sur la valeur du temps de latence  $R_M$

$a_o, b_o$  : constante ;  $\frac{a_o}{b_o} = 0,2$  seconde

q : quantum de la non-linéarité

$q_o$  : "pas" du quantifieur au début d'une série d'essais

$$q = q_0 - F_m(\delta_q)$$

$F_m(\delta_q)$  : contribution de l'effet mémoire ;  $q$  diminue de la quantité  $\delta_q$  en régime d'apprentissage lors des essais répétés.

En régime adapté :  $q = q_0 - \Delta q =$  valeur très petite tendant vers zéro.

$F_m(\delta k)$  : contribution de l'effet mémoire sur la valeur du paramètre  $k$   
 $\delta k$  : "pas" de la variation de  $k$  lors des essais répétés.

$F_m(\Delta k)$  : valeur adaptée du paramètre  $k$

$C$  : commande du servo-mécanisme permettant l'affichage du paramètre  $k$

$F_m(\delta R_M)$  : contribution de l'effet mémoire sur la valeur du retard  $R_M$

$\delta R_M$  : "pas" de la diminution de  $R_M$  lors des essais répétés

$\Delta R_M$  : diminution du retard dans le régime adapté.

RSI : Reconnaissance du signal identique

$y_M(t)$  : mouvement manuel.

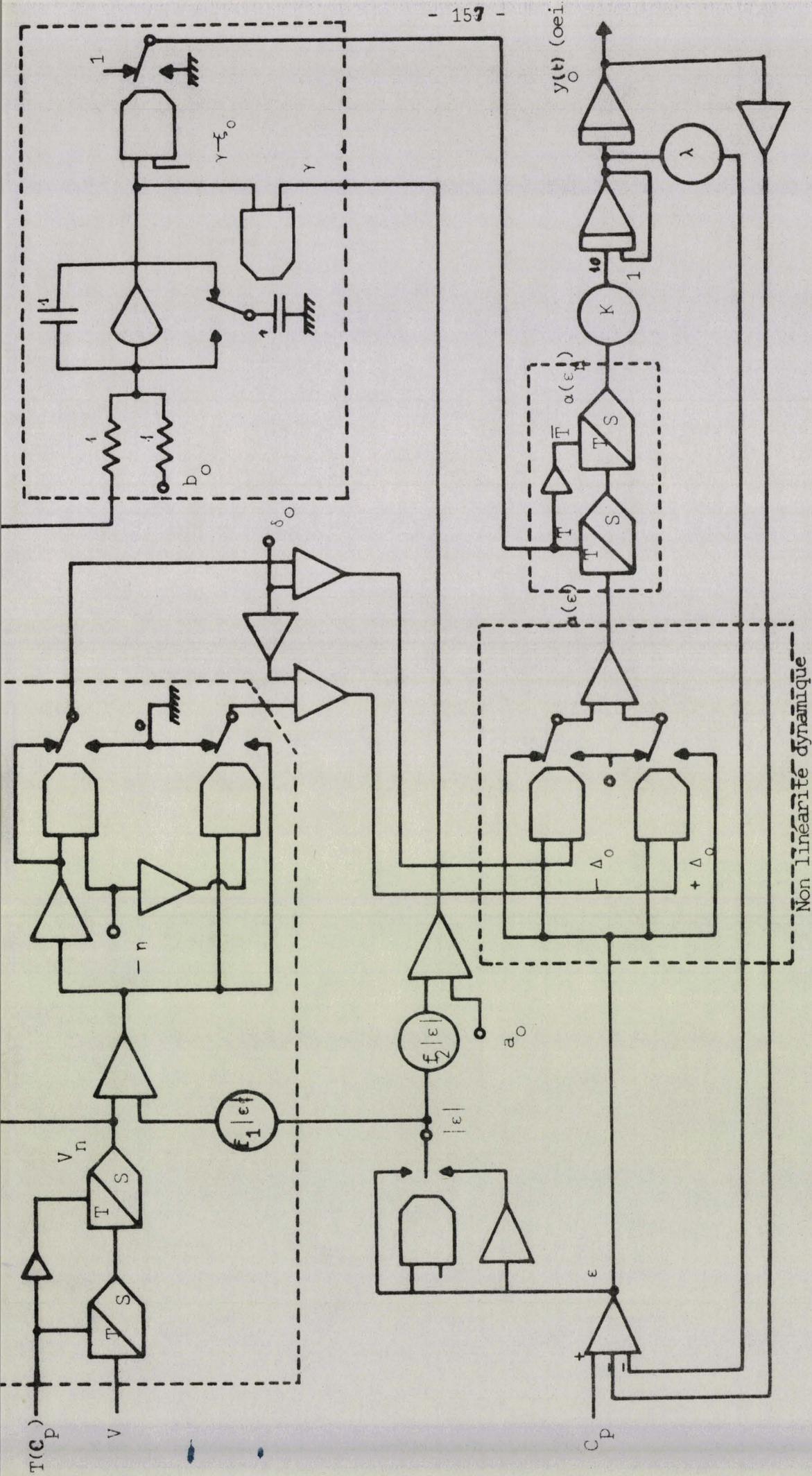


Figure A.V.6 : Schéma de simulation du système visuel en régime de poursuite d'une cible (vision frontale)



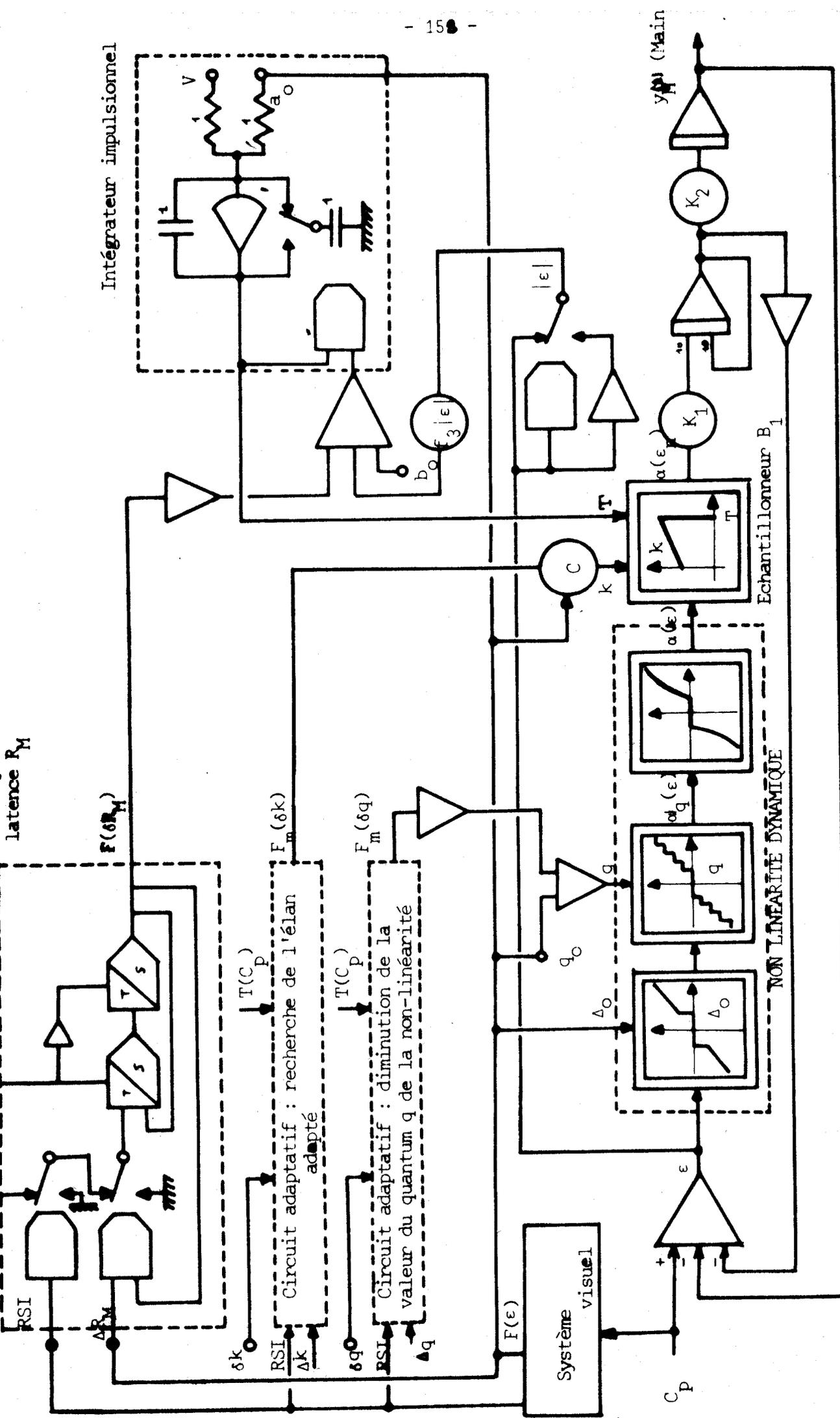


Figure A.V.7 : Schéma de simulation du système manuel en régime de poursuite d'une cible en vision frontale (R.S.I. = reconnaissance du signal identique)



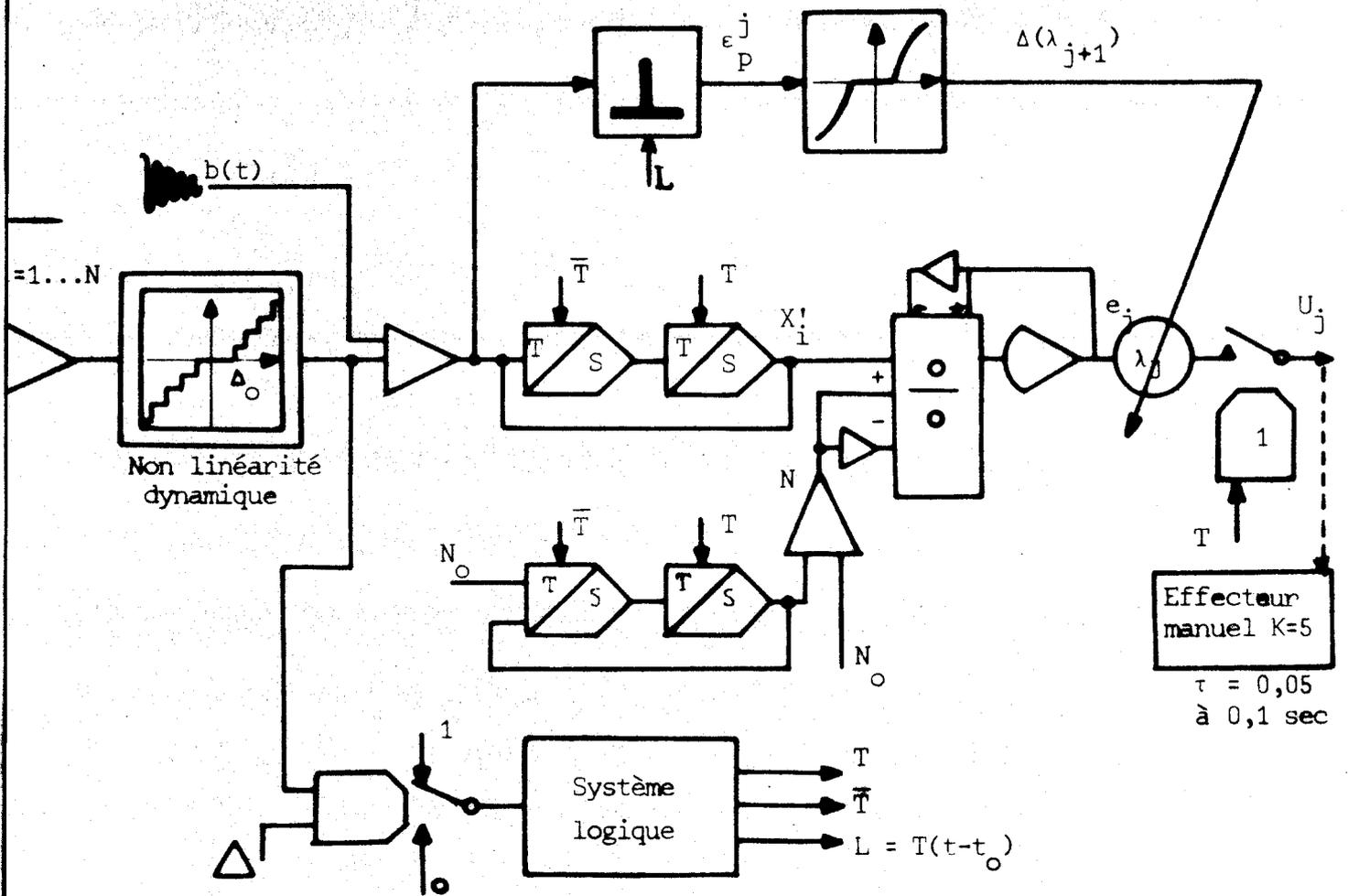


Figure A.V.8 : Simulation de la visée adaptative du sujet à une position  $X_i$  du stimulus

$N$  : nombre de prise d'information

$t_0$  : temps de prise d'information

$T_i = 0,2$  seconde

$b(t)$  : bruit

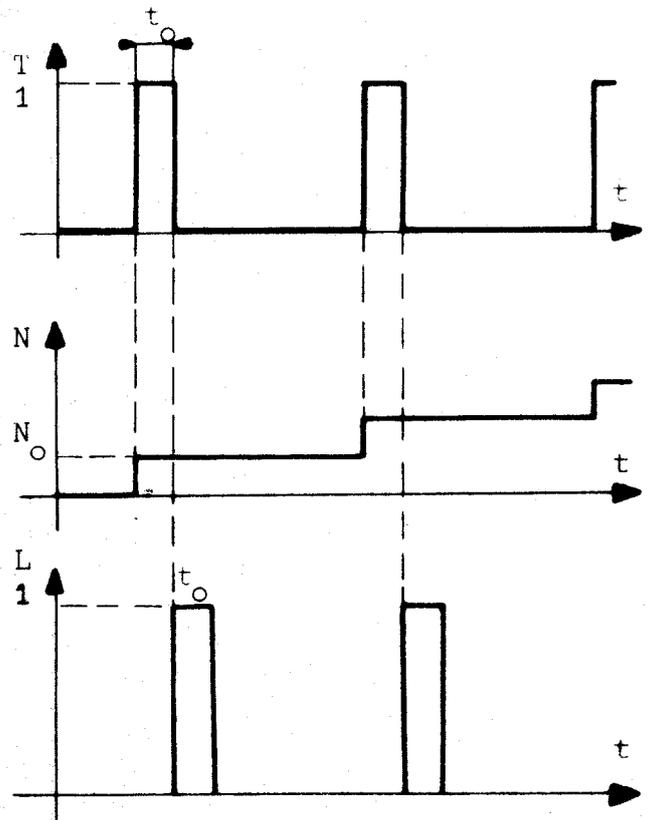
$\Delta_0$  : seuil visuel

$T$  : période d'échantillonnage

$\lambda_j$  : gain du modèle à l'essai  $j$

$\Delta(\lambda_{j+1})$  : correction de  $\lambda_j$  pour l'essai suivant.

$\Delta$  : seuil de décision (étage supérieur)



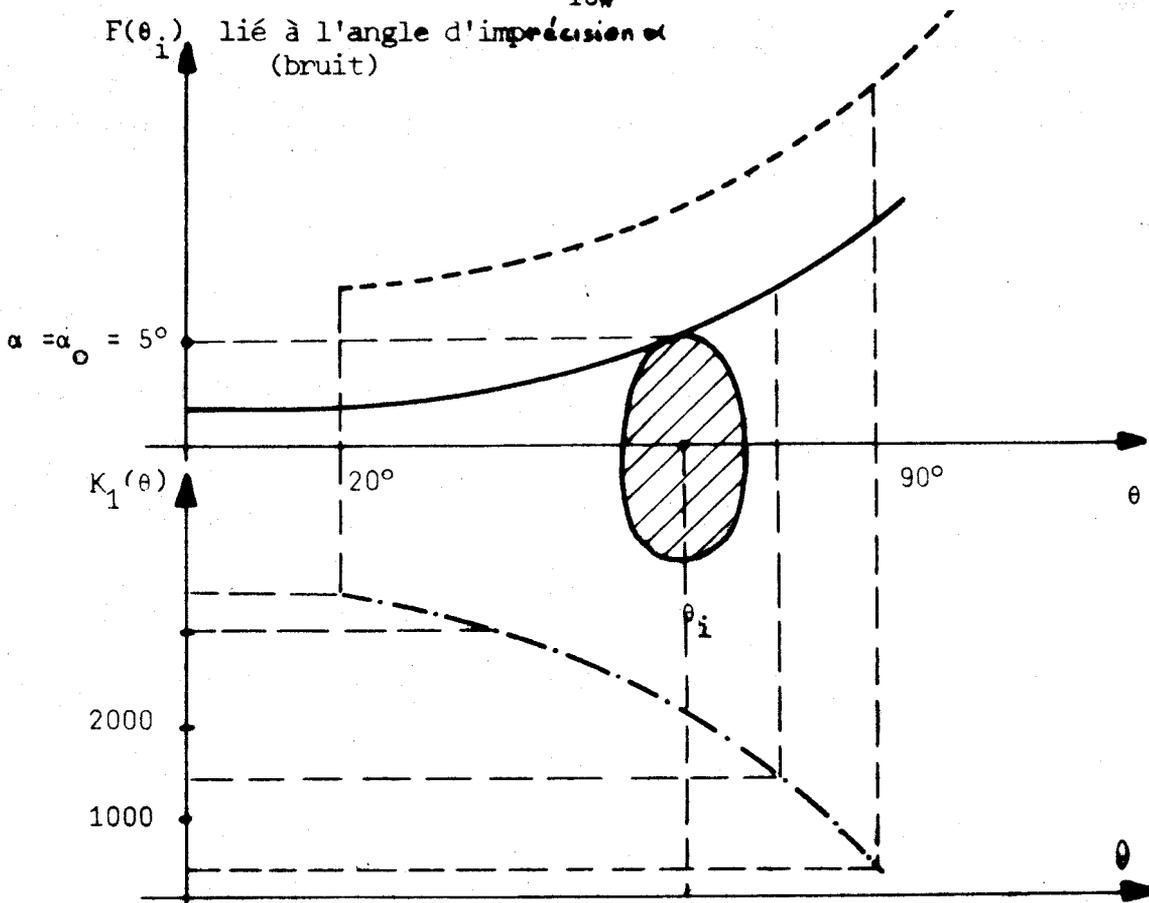


Figure A.V.9 : Fonction "floue" basée sur l'expression  $T_D = f(\theta)$  mettant en évidence l'expression  $K_1(\theta)$  simulant la décroissance des récepteurs rétiniens (le bruit lié à  $\theta$  suppose une symétrie locale des propriétés de la rétine ;  $\psi_i \ll \theta_i$ )

Le dispositif réalisant un choix  $X_i$  de l'entrée bruitée peut s'interpréter de la manière suivante :

Si l'amplitude et la vitesse du stimulus sont suffisantes pour déclencher une prise d'information et si le seuil de décision  $\Delta$  est "atteint", le sujet effectue une réaction liée à un stimulus dont la position est appréhendée d'une manière "floue". Celle-ci devient alors équivalente à un point dont les coordonnées sont entachées de bruit. Dans le processus d'apprentissage on peut penser qu'un élément d'entrée fournit une estimation de l'entrée réelle permettant d'apprécier et de comparer la réponse, réalisée par l'opérateur, avec une consigne interne élaborée à partir de ses facultés de calcul et de mémoire.

Systemes hiérarchisés :

Le concept des systèmes hiérarchisés /55/ peut contribuer à l'interprétation du comportement de l'homme réalisant un travail. En effet on peut dégager non seulement dans le processus humain une entrée stimulus, un processus, une sortie mais aussi un système de commande principalement lié au fait que l'homme utilise son "cerveau" pour réaliser son action. La figure A.V.10 illustre une division verticale d'une commande utilisée dans les systèmes hiérarchisés. Par ailleurs lorsque le

processus peut être considéré comme un ensemble de sous-processus, des conflits peuvent apparaître entre les différentes unités de commande liées aux sous-processus. La théorie des systèmes hiérarchisés propose alors un niveau "coordinateur" ayant le but de résoudre les conflits tout en tenant compte des diverses interactions entre les sous-systèmes.

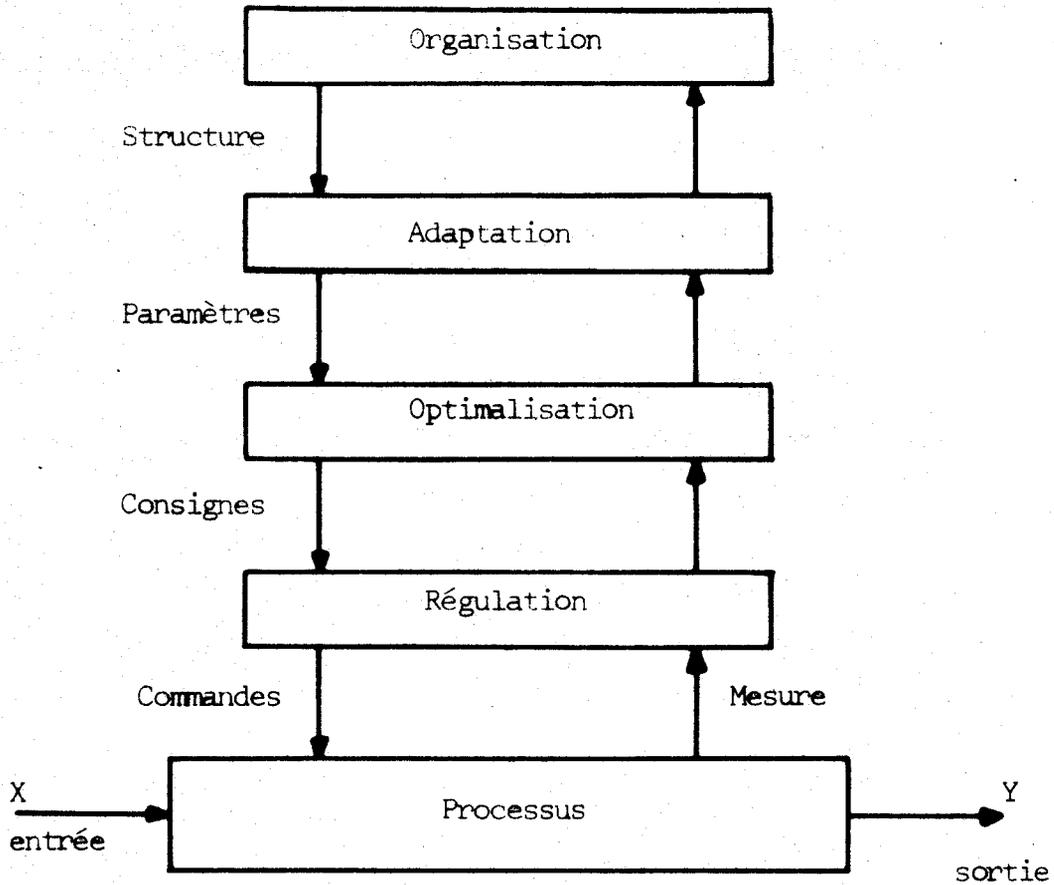


Figure A.V.10 : Division verticale d'une commande hiérarchisée.

## RAPPELS ANATOMOPHYSIOLOGIQUES DU SYSTEME VISUEL

---

### OEIL

Les dimensions approximatives de l'oeil sont les suivantes :

Poids : 7 grammes

Volume : 6,5 cm<sup>3</sup>

Diamètre Antéro-postérieur : 2,5 cm

Axe transversal : 2,5 cm

Axe vertical : 2,3 cm

L'optique oculaire donne à partir des objets extérieurs une image renversée sur la rétine, mise au point grâce au rôle accommodatif du cristallin, lentille biconvexe déformable.

L'oeil comporte la sclérotique entourant la cornée transparente dont le rayon de courbure est de l'ordre de 7 à 8,5 mm, la choroïde continuée par l'iris percé de la pupille qui joue le rôle de diaphragme. Placée à l'intérieur de l'oeil, la rétine est une membrane nerveuse, réceptrice de lumière dont la partie la plus sensible, la fovéa permet le maximum d'acuité visuelle.

L'image de l'objet sur la rétine excite les cellules visuelles (6 à 7 millions de cônes et 110 à 130 millions de bâtonnets) et l'influx nerveux transmis par le nerf optique ( 300 000 à 1 000 000 de fibres) parvient aux centres visuels du cerveau. La vision centrale permet de voir le détail des objets avec un maximum de précision au niveau de la fovéa où les cônes (de diamètre de 2 à 2,5  $\mu$ ) sont les plus nombreux.

### LA RETINE ET LES VOIES OPTIQUES

L'oeil est un récepteur sélectif, sa sensibilité est fonction de la longueur d'onde. Le codage de l'information visuelle commence alors avec cette longueur d'onde mais aussi avec l'intensité lumineuse du stimulus, la situation de l'impact, sa durée, son étendue. Notons qu'en vision scotopique (la nuit) la longueur d'onde influence l'optique visuelle et l'optimum passe de 560 nm en vision photopique (le jour) à 510 nm en vision scotopique.

Les histologistes décrivent les aires oculo-motrices par :

.../...

- l'aire oculo-motrice frontale (aire 8 de Brodmann)
- l'aire oculo motrice occipitale (aire 19 de Brodmann)
- l'aire prémotrice (aire 6 de Brodmann)

Les aires visuelles 17, 18, 19 jouent le rôle de centre de décodage de l'information ; l'aire 17 est réceptrice primaire et les autres en sont tributaires.

Les mouvements saccadiques (caractéristiques d'un mouvement volontaire) sont intégrés au niveau de l'aire 8 frontale. Les déplacements de poursuite souple prennent leur origine au niveau des aires 18 et 19 situées au niveau du cortex occipito-pariétal qui intègrent les stimulus visuels et permettent la fixation du regard sur l'objet extérieur.

Les influx qui prennent naissance au niveau des aires 8 et 18-19 gagnent les noyaux oculomoteurs, d'où la naissance d'un déplacement de l'oeil ; ces circuits neuroniques régulent l'oculomotricité. On peut donc dégager en simplifiant deux voies optiques, l'une "automatique", l'autre "volontaire" et comprendre les effets de priorité et d'inhibition de chacune de ces deux voies en fonction de la complexité de l'image et du travail demandé à l'opérateur humain.

