

50376
1973
211
N° d'ordre : 151

50376
1973
211

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE I

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR - INGÉNIEUR

par

Francis DUPAS

ingénieur E.C.P

Titre de la thèse :

CONTRIBUTION A LA DÉTERMINATION
D'UN MODÈLE D'OPÉRATEUR HUMAIN
EFFECTUANT UNE TÂCHE PRINCIPALE
ET UNE TÂCHE SECONDAIRE



Soutenue le 5 Décembre 1973 devant la commission d'examen :

Messieurs : P. VIDAL, Président

J.M. TOULOTTE, Rapporteur

G. MILBLED, Examineur

H. MONOD, Invité

N. MALVACHE, Invité

A ceux qui ont aidé à la réalisation de ce travail.

La chouette de Minerve

ne prend son vol qu'à la tombée de la nuit.

HEGEL

I N T R O D U C T I O N

Depuis plusieurs dizaines d'années, de nombreux chercheurs se sont penchés sur l'étude des relations homme-machine. Ces recherches ont en commun le but d'adapter la machine à l'homme par une connaissance plus approfondie des réactions humaines sur les lieux de travail.

Cependant si l'étude sur le "terrain" permet de tenir compte de tous les facteurs d'environnement de l'ouvrier (physiques, psychologiques, sociaux), la pléthore des paramètres ne permet pas une étude systématique de ces facteurs. C'est pourquoi on a souvent recours à la simulation des postes de travail et c'est ce qui nous a guidé dans l'établissement de notre dispositif expérimental exposé dans les chapitres 2 et 3. Celui-ci permet d'étudier les réactions d'un opérateur soumis à une double tâche.

Les différentes études entrepris tant en France qu'à l'étranger ont abouti à la réalisation d'un certain nombre de modèles fondés en particulier sur la théorie de l'information (2) (13) ou utilisant les méthodes de l'automatique (22) (23) (28). L'association de ces deux approches de la réalité psychologique et physiologique de l'opérateur humain nous a semblé intéressant. C'est pourquoi des résultats exposés au chapitre 3 et des méthodes d'identifications, nous avons déduit au chapitre 4 un modèle du système visuomoteur. Le chapitre 5 est consacré à une approche mathématique des phénomènes à partir de la théorie de l'information. C'est au chapitre 6 que nous tentons plus spécialement de faire la synthèse en nous appuyant sur la théorie des systèmes à commande hiérarchisée.

La volonté d'aboutir à un modèle réaliste a impliqué la nécessité de nous fonder sur les connaissances actuelles en physiologie et psychologie. Le lecteur ne doit pas s'attendre à trouver un modèle global, absolu et parfaitement défini mais l'approche d'un système particulièrement complexe. La justification des modèles adoptés se trouvera ici non pas dans une identification paramétrique classique - trop de paramètres restent encore inconnus - mais dans le fait que trois théories différentes aboutissent à des modèles cohérents et complémentaires.

CHAPITRE I

LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

I₁- INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la description du dispositif expérimental qui a permis l'étude de la fonction de détection chez l'homme et ce d'un point de vue d'automaticien, c'est-à-dire en définissant les entrées et sorties du processus étudié.

Celui-ci est la réponse plus ou moins rapide d'un opérateur à un événement surgissant de façon aléatoire dans son environnement par une réaction motrice simple. Nous en précisons les divers paramètres dans la première partie de ce chapitre. Nous exposons ensuite de qu'est la réaction motrice simple retenue et pourquoi elle l'a été. Puis nous indiquons la méthode de mesure du temps de réaction qui constitue la sortie principale de notre système.

Ce sont là les éléments essentiels de notre étude ; ils constituent la "tâche secondaire" de l'opérateur par analogie avec un poste de travail ou de pilotage où l'individu exécute un travail tout en restant attentif à des signaux extérieurs à cette tâche. Nous exposons donc dans une deuxième partie ce que sera la "tâche principale" du sujet.

I₂- LA "TACHE SECONDAIRE"

I_{2.1}- Choix de l'évènement

Pour des raisons matérielles de commande et de programmation nous avons été amené à choisir comme stimulus, un signal lumineux apparaissant de manière aléatoire dans le champ visuel du sujet.

Une première solution était de placer le sujet devant une matrice de lampes situées sur une surface cylindrique dont l'axe coïncide avec celui de l'opérateur assis (fig. I₁). Ceci nous permettait de créer un impact lumineux de manière pseudo-aléatoire dans le temps et dans l'espace dont nous pouvions contrôler luminosité, couleur, instant et durée d'allumage et position dans l'espace.

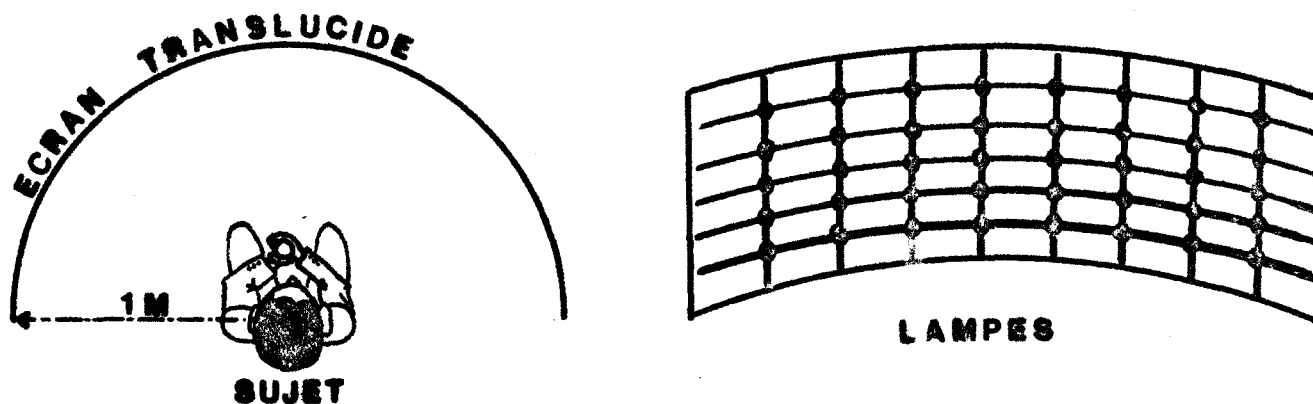


Fig. I₁ Première solution expérimentale

Cet ensemble présente ^{autre} une lourdeur de maniement, des difficultés de dépouillement des résultats dans une optique d'automaticien. De plus comme nous désirions étudier les réactions du sujet en régime dynamique ; il nous fallait introduire un paramètre supplémentaire : la vitesse de déplacement du stimulus à détecter. C'est pourquoi nous avons choisi de faire apparaître en un point déter-

miné de l'espace mais de façon aléatoire dans le temps un spot lumineux mobile $x(t)$ sur l'écran d'un oscilloscope à tube cathodique ; l'influence de l'angle θ_0 d'apparition du mobile mesuré en prenant comme référence "l'axe du regard" est étudiée en modifiant entre deux tests la position relative du sujet et de l'oscilloscope (fig. I₂).

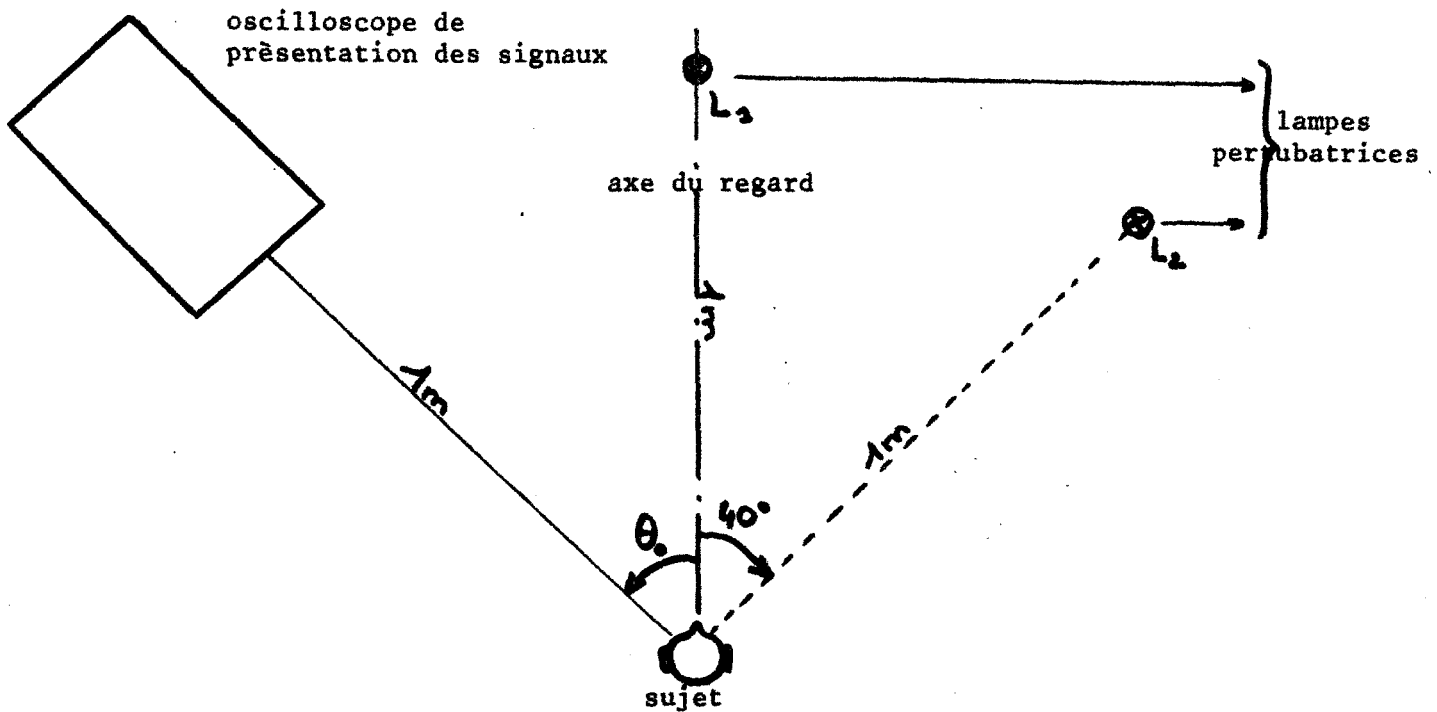


Fig. I₂ Solution expérimentale retenue

Les paramètres de l'entrée $x(t)$ de notre système seront donc :

- l'angle θ_0
- la vitesse V de la cible (intensité et signe).

Par convention une vitesse positive indiquera un mobile se déplaçant vers le centre du champ visuel (vitesse centrale), une vitesse négative un mobile se déplaçant vers la périphérie du champ visuel (vitesse périphérique) ;

- la luminosité L du test.

Nous n'avons pas étudié l'influence de la longueur d'onde d'émission mais nous nous sommes contentés de la fixer dans les bleu verts ($0,500 \mu$ environ) qui correspond à un maximum de sensibilité de la rétine en vision scotopique c'est-à-dire à de faibles niveaux de luminosité.

D'autre part des expériences préliminaires nous ont montré que le sujet s'attend à voir apparaître le stimulus dans une région déterminée de son champ visuel et que cela modifie sensiblement les résultats. Pour pallier ce comportement adaptatif et prédictif du sujet qui n'intéresse pas directement notre étude, nous avons ajouté des lampes "perturbatrices" qui s'allument, elles aussi de façon pseudo-aléatoire, en différents points de l'espace (fig. I₂). Nous nous sommes en fait limités à deux lampes afin de réduire la durée des tests et minimiser ainsi les effets de fatigue chez l'opérateur.

La séquence de présentation des différents signaux est préalablement enregistrée sur bande magnétique de manière à préserver la reproductibilité des expériences nécessaire à la comparaison des résultats pour différents paramètres et différents sujets.

I_{2.2}- Réalisation de la commande du "mobile à détecter" (fig. I₃)

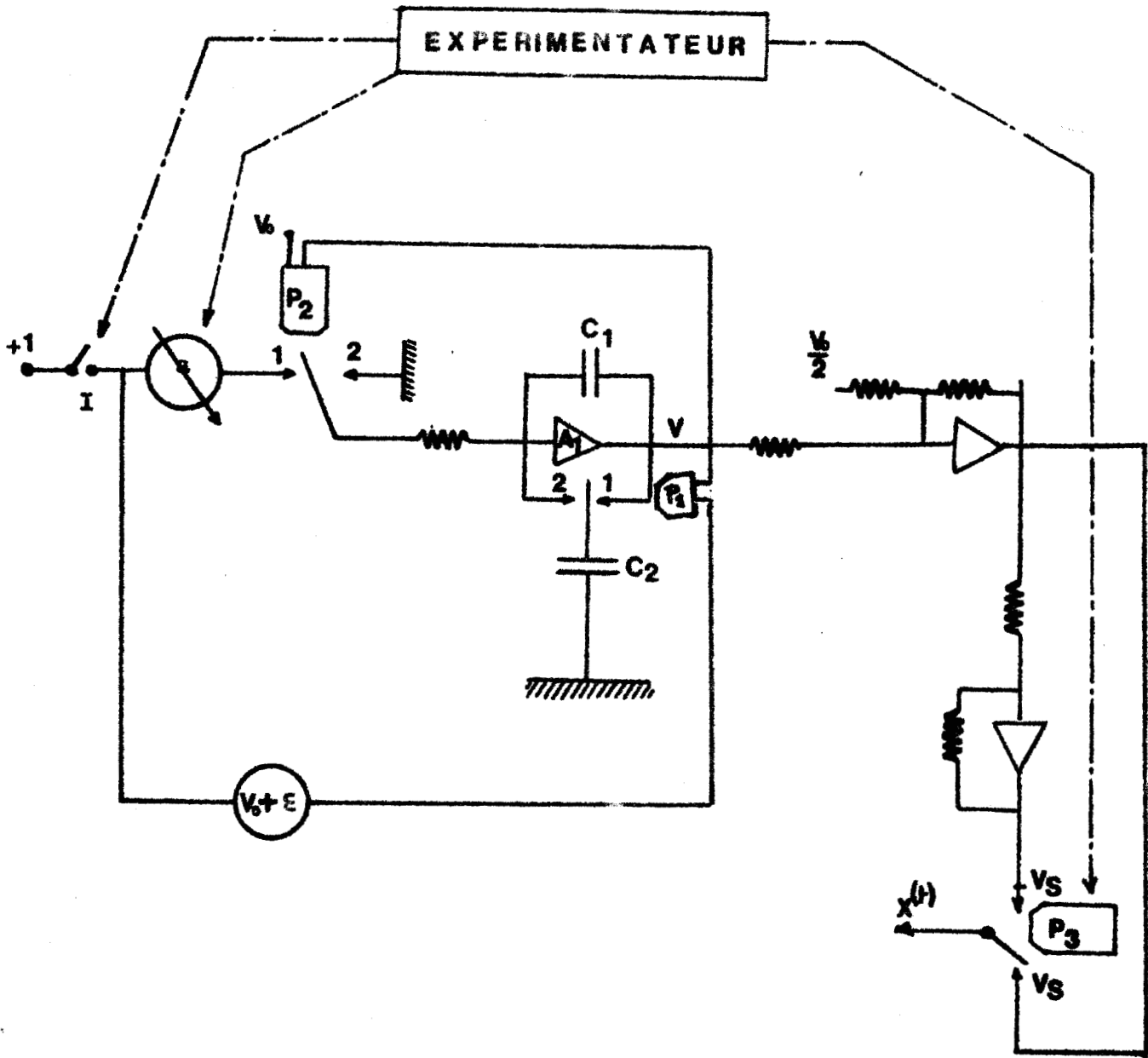


Fig. I₃ Commande du spot de l'oscilloscope pour la réalisation de la cible.

Il s'agit de faire apparaître en un point déterminé de l'écran d'un oscilloscope un spot animé d'un mouvement linéaire horizontal. L'expérimentateur est maître de l'instant et de la durée de l'allumage par l'intermédiaire de l'interrupteur I, de la vitesse par le potentiomètre a et du signe par le relais P₃ (fig. I₃).



En effet à la fermeture de l'interrupteur I, la constante a est intégrée, V_I étant inférieure à V_0 et P_2 en position (1) ainsi que P_1 , d'où

$$V_I = - \int_0^t a dt$$

Lorsque $V_I = V_0$, P_2 passe en position (2) ; P_1 ne bougeant pas, V_1 conserve donc la valeur V_0 tant que I reste fermé ; le condensateur C_2 est alors chargé sous une tension égale à $V_I = +V_0$

A l'ouverture de l'interrupteur I, la tension de référence du comparateur P_1 passe à 0 (en l'air) et la palette de P_1 se porte sur la position (2) appliquant une tension $-V_I$ à l'entrée de l'intégrateur A_1 dont la sortie passe à zéro. Le reste du montage permet d'obtenir une tension symétrique et d'effectuer des changements du sens de déplacement au gré de l'expérimentateur. La figure I_4 indique les diagrammes des différentes tensions du montage de la figure I_3 .

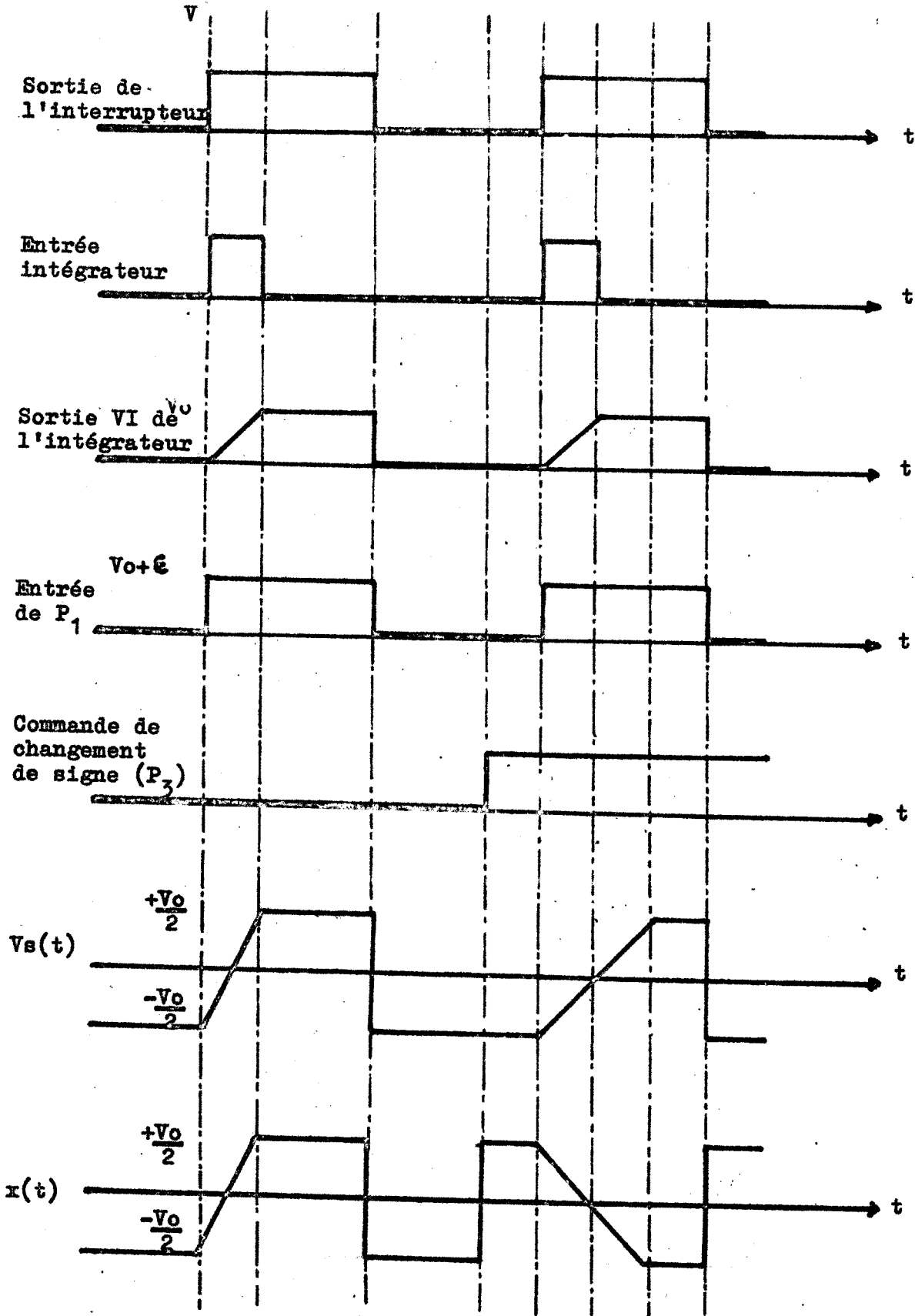


Fig. I₄ Diagramme des temps des sorties analogiques du montage de la fig. I₃

De plus nous voulions avoir le contrôle de la luminosité du spot et de son point d'apparition sur l'écran qui doit être le même pour les deux sens de déplacement. Nous avons choisi un oscilloscope à écran phosphore P 1 sans rémanence à commande de luminosité par tension continue afin de rendre la luminosité du spot indépendante de la vitesse et la commande aisée (fig. I₅).

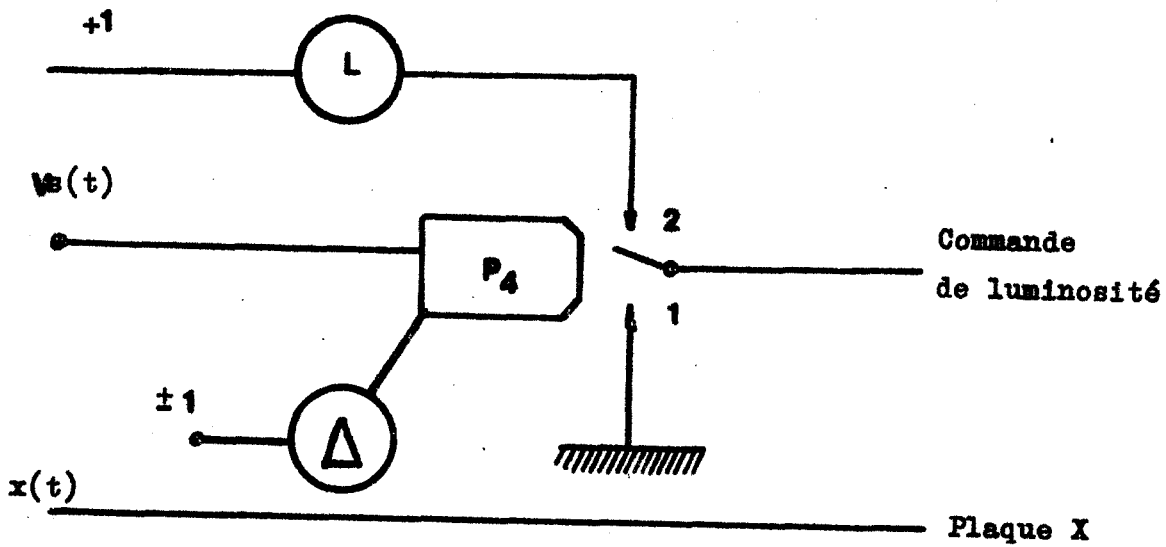


Fig. I₅ Commande de l'apparition du spot et de sa luminosité

La tension $V_s(t)$ (fig. I₅) varie entre $-V_0$ et $+V_0$ (fig. I₄) correspondant à la largeur totale de l'écran. Lorsque $V_s(t)$ devient supérieure à Δ , la palette du comparateur P_4 passe de (1) à (2) et le spot apparaît au milieu de l'écran. Les potentiomètres Δ et L permettent alors un réglage du point d'apparition et de la luminosité du spot.

I.2.3- Choix de la réaction du sujet

Nous venons de définir "l'entrée" du système à étudier, il nous faut donc maintenant définir ses sorties. Elles peuvent être de deux ordres : électrophysiologiques et issues de réactions motrices volontaires.

a) Les réactions électrophysiologiques

L'idéal serait de détecter directement à l'aide d'électrodes derrière la rétine par électrorétinogramme ou sur le nerf optique, ou enfin dans les aires visuelles 17, 18 et 19 de Brodemann le passage de l'influx nerveux dû à l'excitation des cônes et batonnets de la rétine par le spot mobile. La subjectivité de l'opérateur n'intervient alors pas ; ceci revient à éliminer dans notre étude les facteurs psychologiques (anxiété, disponibilité, etc...) qui sont, du moins actuellement, éminemment qualitatifs et donc non quantifiables et qui sont vraisemblablement à la base de la dispersion des résultats obtenus. Malheureusement il est difficile pour de telles expériences de trouver des sujets acceptant de se laisser poser des électrodes in situ d'une part et d'autre part de discriminer les signaux ainsi obtenus. Nous n'aurions pas pu en particulier dissocier le spot cible, des lampes "perturbatrices" et du spot simulant la "tâche principale". La seule technique à notre disposition restait alors l'électroencéphalogramme par l'intermédiaire des potentiels évoqués visuels. Mais le "message" est noyé dans le bruit de fond du cerveau et on ne peut actuellement l'extraire que par des méthodes de moyennage incompatibles avec nos expériences.

b) Les réactions motrices volontaires

Le sujet peut évidemment indiquer lui-même s'il a ou non détecté le spot. Nous pouvons par exemple lui demander de nous le signaler oralement (par un mot simple comme : "vu"). Cependant on conçoit aisément les difficultés d'exploitation d'une telle sortie. Nous verrons plus loin que cette "sortie orale" peut se révéler très utile néanmoins lorsqu'il s'agit d'élucider des comportements "anormaux" d'opérateurs en expérience.

Nous nous sommes alors tournés vers les mouvements volontaires.

- Mouvement du pied : Le sujet doit appuyer sur une pédale à la perception du stimulus (analogie avec la réaction de freinage d'un automobiliste). Cette méthode n'a pas été retenue car elle ne permet pas la comparaison avec des résultats antérieurement obtenus au laboratoire sur des réactions manuelles (temps de latence par exemple) [3] [4] [5]
- Mouvements des yeux : Nous demandons au sujet de diriger son regard vers la cible au moment où celle-ci apparaît et nous captions le déplacement des yeux (cf annexe 1). Cette solution présente l'avantage de diminuer considérablement le "chemin à parcourir" de l'influx nerveux et par là la dispersion des résultats. De plus cette réaction pouvant paraître comme quasi réflexe (passage de l'influx par les corps genouillés sans passer par le cortex) (fig. I₆), l'importance des facteurs psychologiques pour l'interprétation des résultats se trouve grandement minimisée. Mais ce mode de sortie risque de perturber sensiblement l'exécution de la tâche principale.

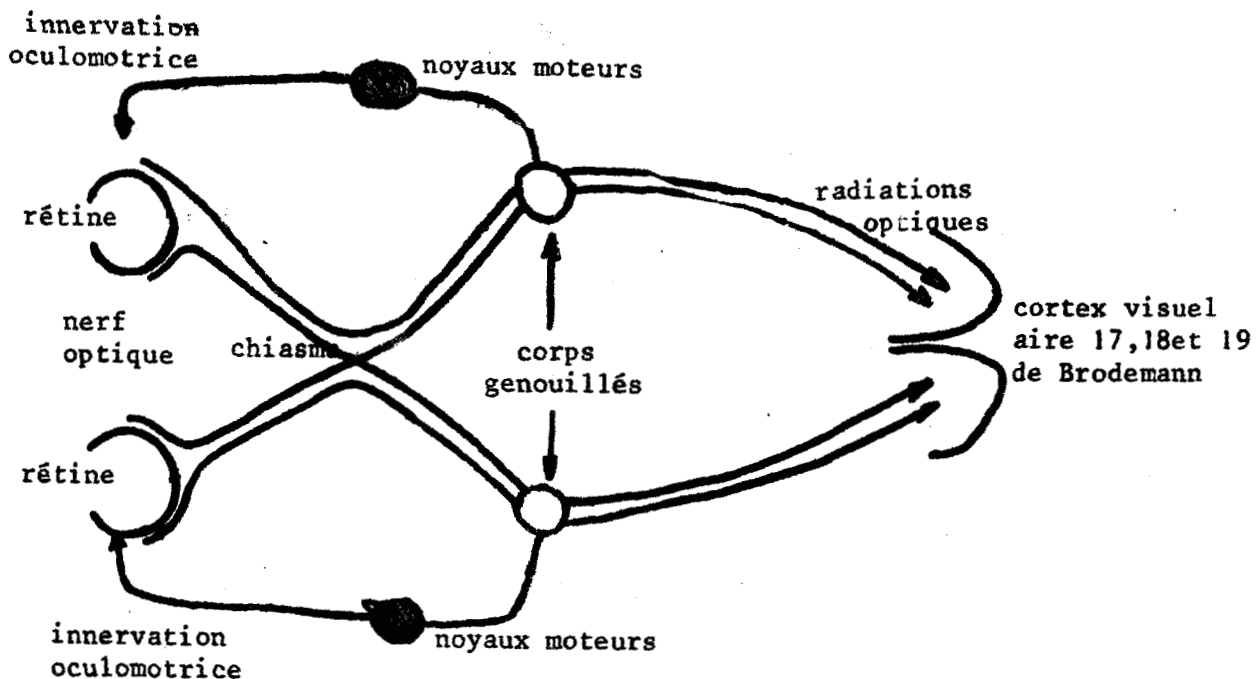


Fig. I₆ Schéma simplifié du système visuel

- Mouvement manuel : Il s'agit pour le sujet d'effectuer un mouvement de la main lorsqu'il perçoit la cible. Nous disposons pour de faire d'un dispositif de repérage des mouvements manuels à deux degrés de liberté. Cependant de manière à minimiser les interactions systématiques de la "tâche principale" et de la "tâche secondaire", nous avons préféré prendre l'appui du pouce sur un bouton poussoir.

Ainsi le paramètre sur lequel portera l'étude est la valeur du temps de réaction défini comme l'intervalle de temps séparant l'instant d'apparition de la cible et l'instant d'appui manuel de l'opérateur humain.

I_{2.4} - Mesure des temps de réaction

L'exploitation complète des résultats s'appuie d'une part sur un système numérique de mesure du temps de réaction permettant une analyse quantitative des phénomènes étudiés (fig. I₇) et d'autre part un système d'analyse plus qualitative par enregistrement simultané sur papier des événements survenant dans la cabine d'expérimentation (fig. I₈).

- a) La mesure du temps de réaction se fait par comptage d'impulsions d'une horloge de fréquence 1000 Hz en liaison avec une imprimante. Le début du comptage est commandé automatiquement à partir du calculateur analogique, lorsqu'un des événements de la "tâche secondaire" survient (apparition de la cible mobile sur l'écran de l'oscilloscope, allumage des lampes perturbatrices). L'arrêt du comptage a lieu soit lorsque le sujet appuie sur le bouton poussoir, soit automatiquement après 1,5 seconde si le sujet n'a pas détecté le stimulus; il y a alors sortie de la valeur du temps de réaction sur l'imprimante. La remise à zéro du compteur est commandée par l'extinction des différents stimuli.

Il est à noter que l'ambiguïté pouvant naître d'un dysfonctionnement du bouton poussoir est levée par le bruit du déclenchement de l'imprimante permettant un double appui de la part de l'opérateur.

De plus nous avons facilité le dépouillement des résultats en adjoignant un dispositif permettant la sortie sur imprimante du signe de la vitesse de la cible à détecter.

Temps de réponse à une cible dirigée vers le centre du champ visuel	-	+ 0,3540
	-	0,4690
	-	0,3980
Cible dirigée vers le centre du champ visuel	-	+ 0,4240
	-	+ 1,5000 "non vu"
Cible dirigée vers la périphérie du champ visuel	-	- 0,4840
	-	0,5220 lampe perturbatrice

Fig. I₇ Exemple de sorties sur imprimante

b) Pour l'enregistrement en continu sur papier, le calculateur analogique délivre différents niveaux de tension caractérisant les cibles et y ajoute les impulsions calibrées provenant de l'appui manuel.

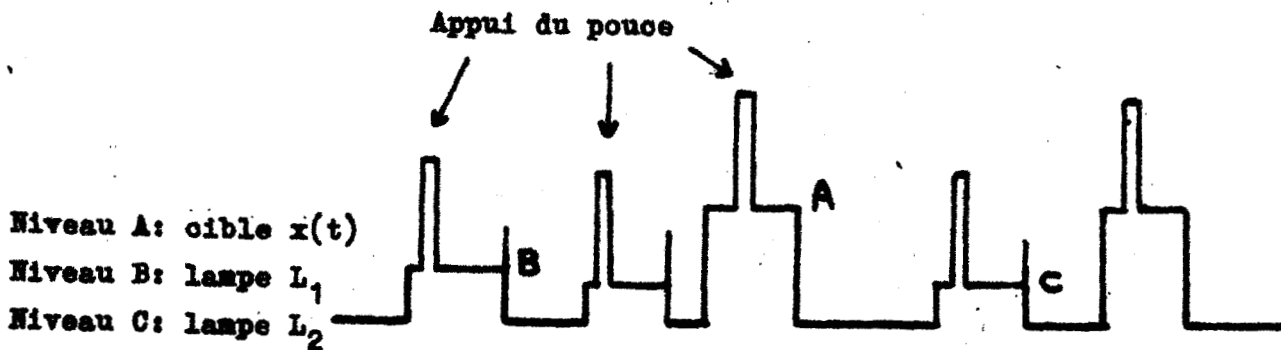


Fig. I₈ Exemple d'enregistrement graphique en continu

La figure I₉ donne un schéma d'ensemble du dispositif de mesure automatique des temps de réaction en relation avec le diagramme de temps.

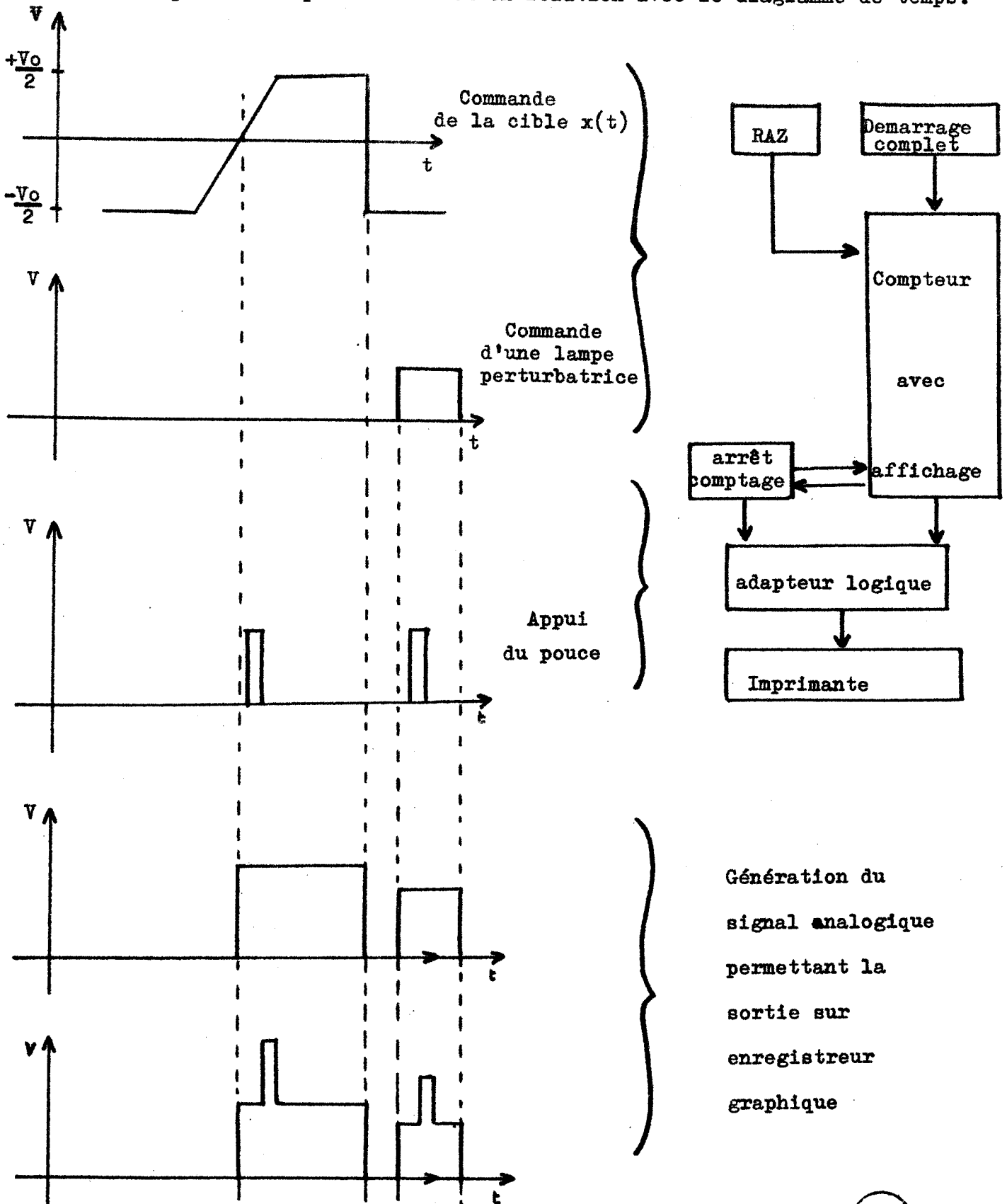


Fig. I₉ Mesure automatique des temps de réaction de l'opérateur



I₃- LA "TACHE PRINCIPALE"

I_{3.1}- Dispositif expérimental

Le dispositif permettant de simuler le poste de travail pour la tâche principale se compose :

- d'un oscilloscope de présentation de signaux dont l'écran est situé à 1 mètre devant l'opérateur. Les plaques de déviation sont alimentées d'une part par une tension extérieure (spot-cible) déterminant la nature de la tâche principale et préalablement enregistrée sur bande magnétique pour préserver la reproductibilité de l'expérience et d'autre part par une tension provenant du dispositif de détection des mouvements manuels.
- d'un levier (fig. I₁₀) du type "manche à balai" commandant le curseur d'un potentiomètre à point référentiel alimenté par une tension continue. Celui-ci délivre donc une tension électrique en relation avec le déplacement de la main du sujet. Cette tension est matérialisée par un spot lumineux sur l'oscilloscope (spot suiveur) qui renseigne l'opérateur sur la position de sa main. D'autre part c'est sur ce levier que nous avons placé le bouton poussoir de la tâche secondaire.

Notre but n'est pas l'étude systématique du tracking en vision fovéale que nous considérons globalement. C'est pourquoi nous négligerons le fait que la relation tension de sortie du manche à balai-déplacement de la main n'est pas linéaire ; en effet celle-ci se déplace sur une calotte sphérique. De plus les différents paramètres de la "tâche principale" : luminosité du spot, brillance de l'écran de l'oscilloscope, longueur du bras de levier, sensibilité du potentiomètre sont fixés pour assurer un maximum de "confort" au sujet, dans le but de minimiser les effets de la fatigue dus à la tâche principale. Pour cette même raison, lors des tests, le sujet est assis et manoeuvre le manche à balai situé entre ses jambes (fig. I₁₀ et I₁₁).

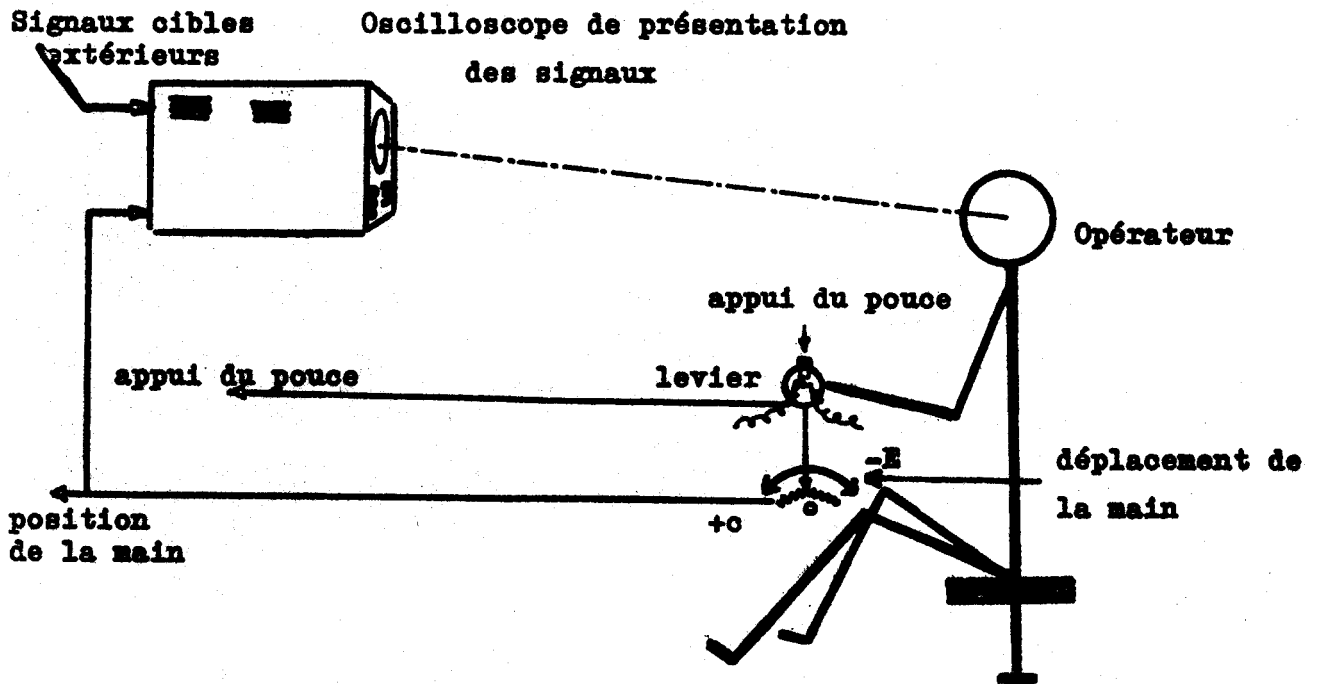


Fig. I₁₀ Schéma global du dispositif de présentation de la tâche principale

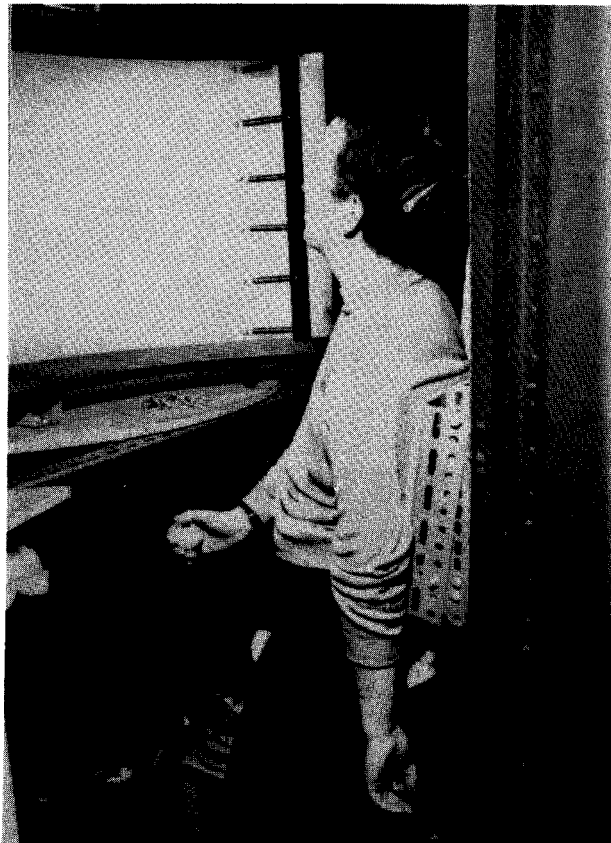


Fig. I₁₁ Le sujet en expérience



I 3.2- Choix de la charge de travail

Au cours d'expériences préliminaires avec des signaux cibles de type cerneaux et dents de scie, il nous est apparu que la structure discontinue du signe interférait avec celle de la tâche secondaire, elle aussi éminemment discontinue, induisant une grande dispersion des résultats rendant leur exploitation mal aisée. C'est pourquoi nous nous sommes restreints à des tâches continues.

D'autre part nous nous limitons à des tâches verticales ou ponctuelles afin de ne pas modifier en cours de test la valeur de l'angle θ_0 entre l'axe du regard et la direction d'apparition du mobile $x(t)$ car le système visuel suit automatiquement une cible se déplaçant dans la région fovéale

Enfin nous nous sommes attachés à ne simuler que des tâches présentant une certaine analogie avec un travail réel. Nous considérons donc 3 tâches de nature différente.

a) Tâche de poursuite sinusoïdale (tracking) :

Le sujet doit faire coïncider le mieux possible le spot suiveur et le spot cible, celui-ci étant animé d'un mouvement sinusoïdal de période 20s et d'amplitude 8 cm. Un signal pseudo aléatoire requiert beaucoup trop l'attention du sujet et entraîne une trop grande dispersion des résultats et un très grand nombre de non-réponses lors de l'étude aux limites du champ visuel.

b) Tâche de positionnement entre deux repères :

Nous générons deux lignes distantes de 8 mm sur l'écran de l'oscilloscope. Le travail de l'opérateur est alors de maintenir le spot suiveur entre deux repères.

c) Surveillance d'une lampe

Le sujet est inactif et doit uniquement fixer le point lumineux au centre de l'oscilloscope.

I_{3.3} - Dispositif de surveillance du sujet

Afin d'interpréter si possible la dispersion intra-individuelle relativement grande des temps de réaction mesurés, il nous faut connaître les réactions du sujet vis à vis de sa tâche principale.

C'est pourquoi nous avons enregistré graphiquement en simultanéité avec les tracés de mesure automatique de temps de réaction la réponse de l'opérateur à la tâche principale (fig. I₁₂) et le signal cible ou la valeur absolue de l'erreur commise (fig. I₁₃).

Cependant ce procédé n'est pas valable dans tous les cas, c'est pourquoi il nous a paru utile d'établir une surveillance au niveau des mouvements oculaires du sujet. Parmi les dispositifs de détection des mouvements oculaires opérationnels dont nous disposions (cf annexe 1) nous avons choisi l'électro-oculographie pour sa facilité de mise en oeuvre et sa maniabilité ; nous n'avons pas besoin en effet d'une précision ni d'une grande sensibilité. Nous avons donc enregistré graphiquement l'électro-oculogramme des sujets (fig. I₁₃).

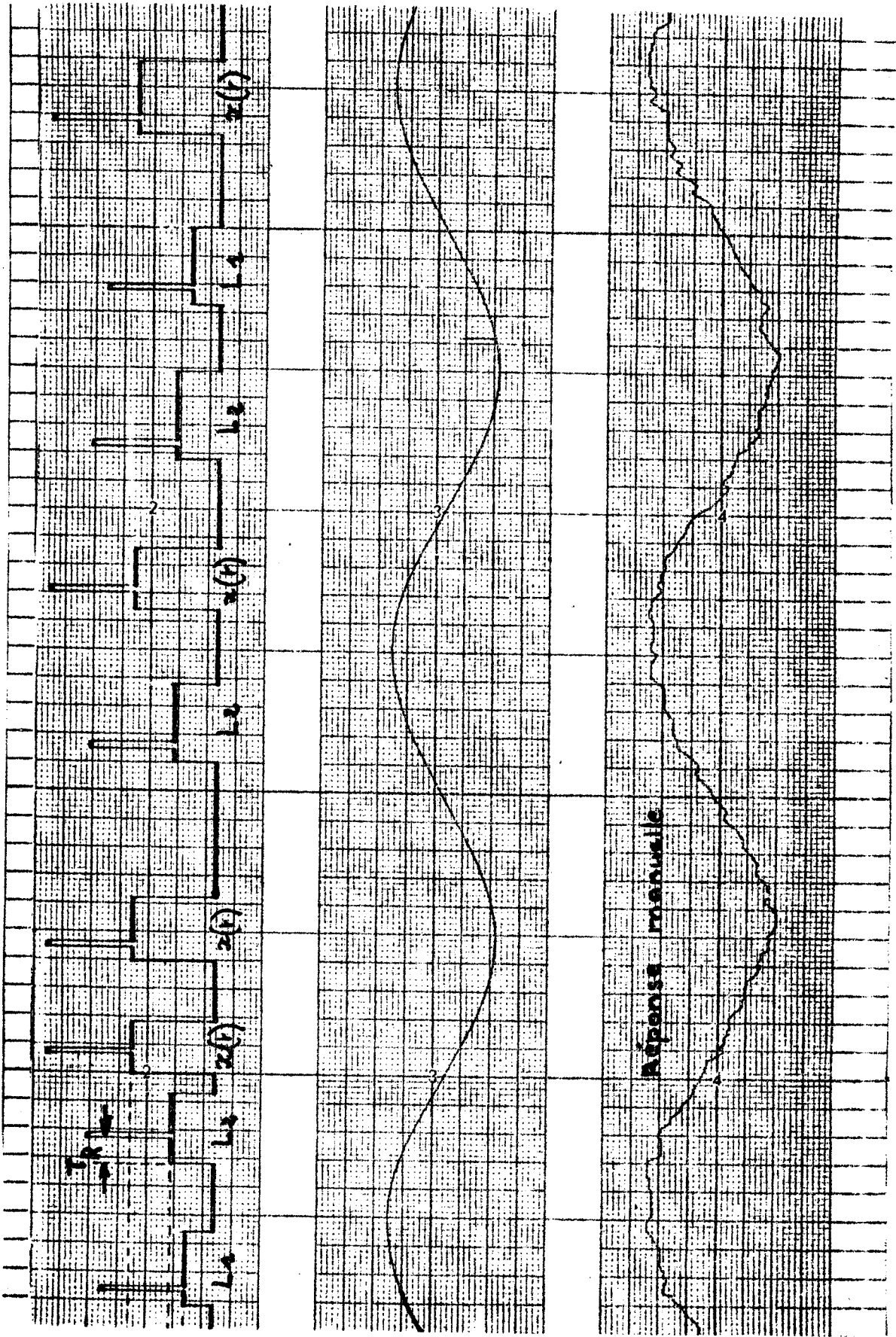
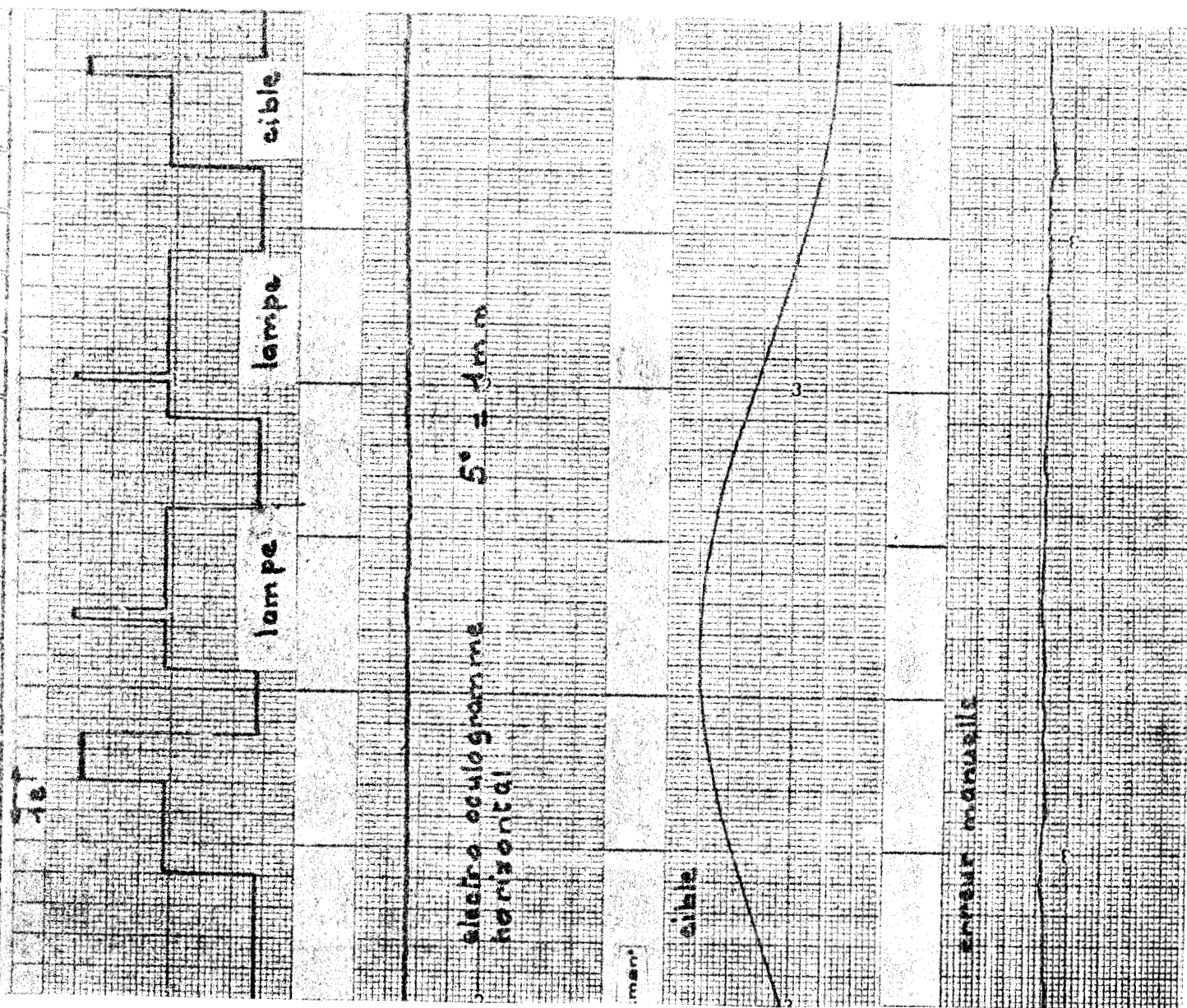


Fig. I₁₂ Exemple de tracés obtenus sur l'enregistreur graphique





Le bruit de fond limite le gain de l'électro oculogramme
On peut cependant observer que le sujet ne regarde pas
les cibles et les lampes qui apparaissent. La dérive
est due à la méthode d'enregistrement des mouvements
oculaires.

Fig. I₁₃ Exemple de tracés obtenus sur l'enregistreur graphique montrant
l'erreur manuelle du sujet et son électro oculogramme

I₄- CONCLUSIONS

Dans ce chapitre nous avons tenté de préciser les paramètres intéressants de notre étude et les raisons de leur choix. En résumé nous considérons les variations des temps de réaction d'un opérateur à un évènement survenant dans son environnement, défini comme l'intervalle de temps séparant l'instant d'apparition de la cible et l'instant d'appui du pouce de l'opérateur.

Parmi les paramètres possibles d'une telle étude nous avons retenu pour la cible l'angle d'apparition, la vitesse, le sens du déplacement, la luminosité, et nous tenterons de tenir compte de la charge de travail principal. Nous pouvons maintenant passer à l'expérimentation proprement dite qui ne pourra être valable que si nous assurons une parfaite reproductibilité des tests par un protocole expérimental précis. C'est ce que nous développons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

PROCOLE EXPERIMENTAL

ET

METHODES D'ANALYSE

I§₁ - INTRODUCTION

Le chapitre I nous a défini la nature des différents stimuli et la façon de les engendrer ; il convient maintenant de les intégrer dans un processus global d'expérience. La première partie de ce chapitre est consacrée à ce problème. Nous avons d'autre part donné dans le chapitre précédent les sorties possibles de notre système ; nous exposerons dans une deuxième partie notre façon d'en tirer parti.

II₂- PROTOCOLE EXPERIMENTAL

II_{2.1}- La cabine d'expérimentation (fig. II₁ et II₂)

La réalisation de la cabine expérimentale a répondu à deux soucis majeurs : d'une part assurer la continuité des recherches du laboratoire sur la vision (frontale, périphérique et de la profondeur) et permettre une extension du domaine d'expérimentation en particulier pour le contraste, d'autre part diminuer au maximum la dispersion des résultats aussi bien inter individuels qu'intra individuels.

C'est pourquoi le sujet est assis devant une surface translucide cylindrique de 1 m de rayon dont l'axe coïncide avec la verticale médiatrice du segment joignant les deux yeux de l'opérateur. Les divers stimuli sont projetés sur la face arrière du cylindre. Ceci permet d'uniformiser le fond sur lequel se déroule l'expérience, en particulier de supprimer les images parasites (reflets, angle d'oscilloscope), tout en permettant une variation de la luminosité de ce fond. Cependant nous limitons de ce fait le domaine de variations de la luminosité des stimuli malgré le choix d'objectifs à grande ouverture, les résultats restent cependant significatifs.

D'autre part la tête du sujet est maintenue à une distance convenable de l'écran sur un appui postérieur par une sangle passant sur le front et réglable suivant la morphologie du sujet.

L'ensemble de la cabine d'expérimentation et des dispositifs de commande et de mesure peut se schématiser comme sur la figure II₃.

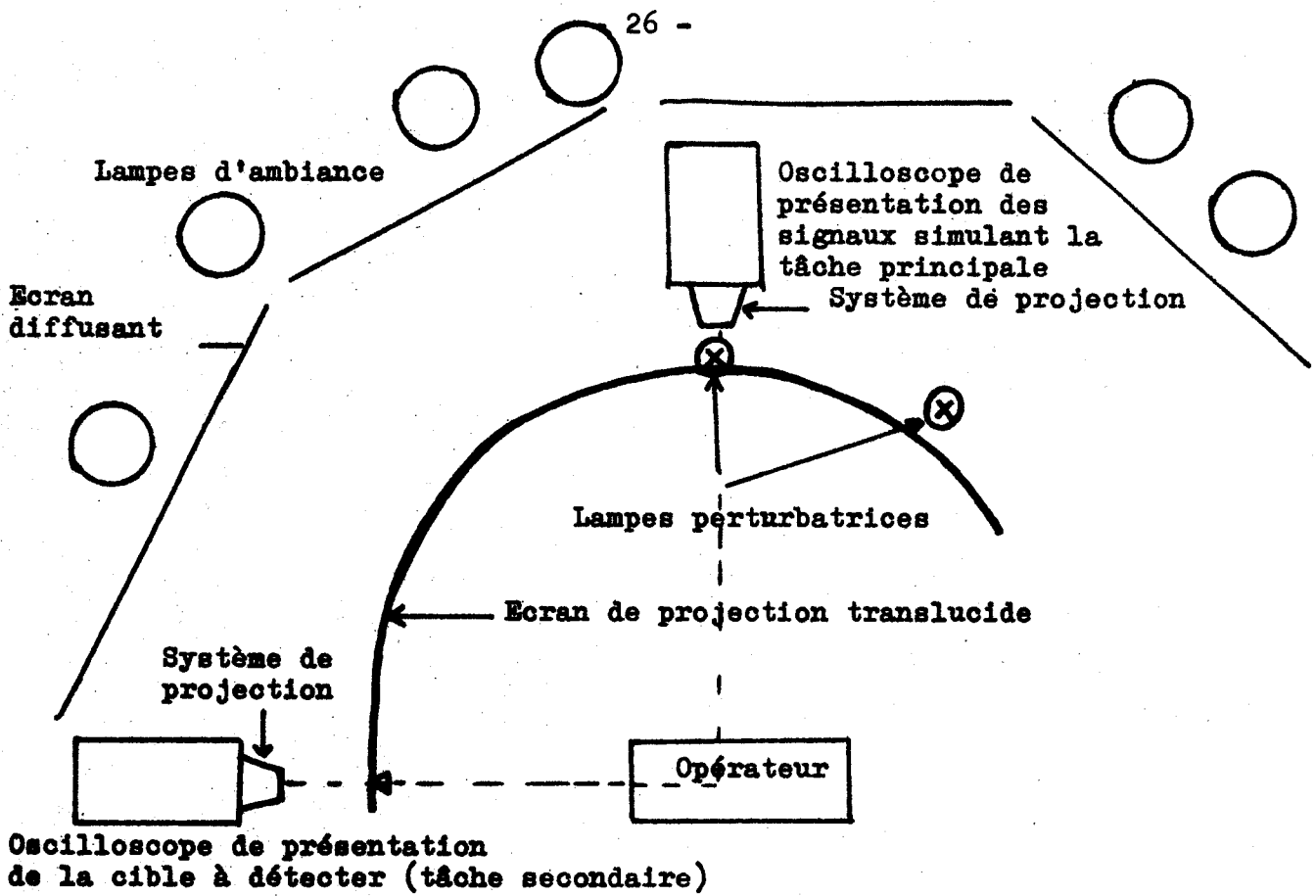


Fig. II₁, Schéma du dispositif global d'expérience

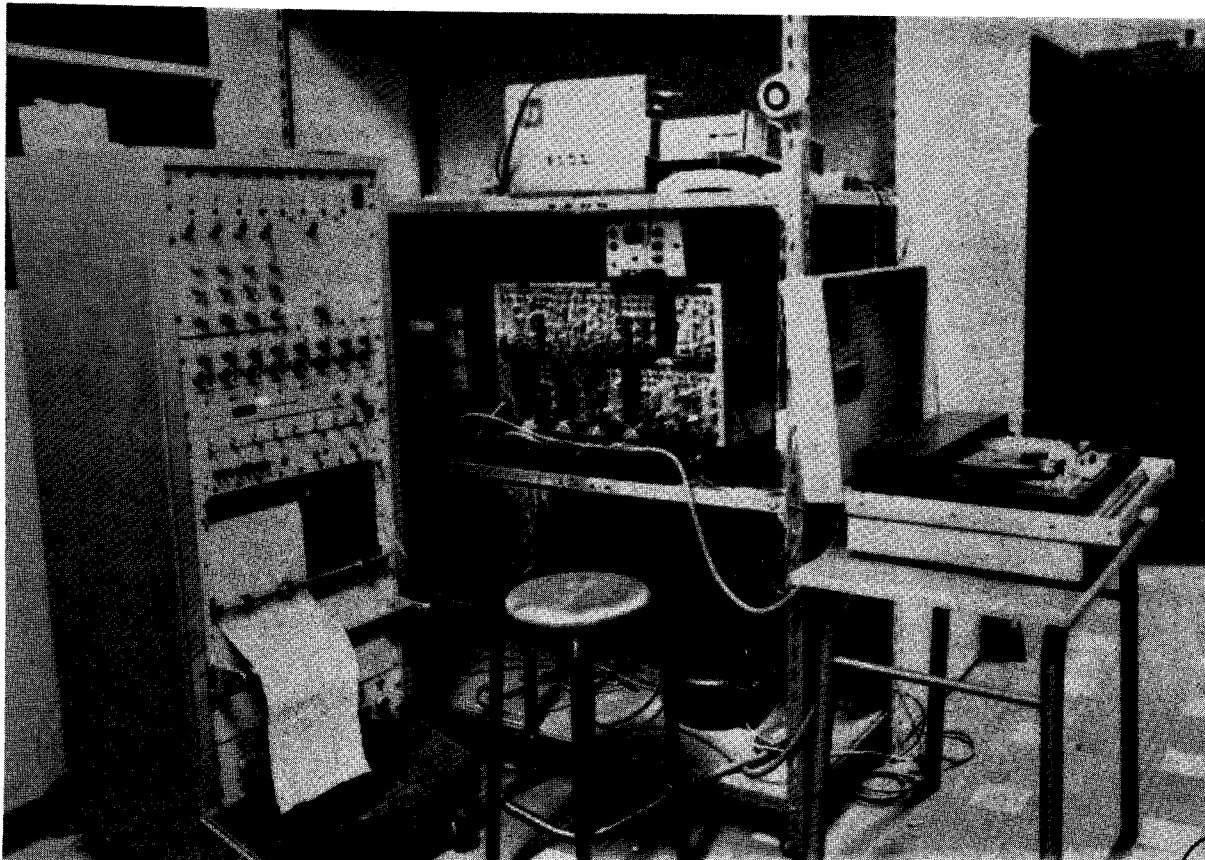
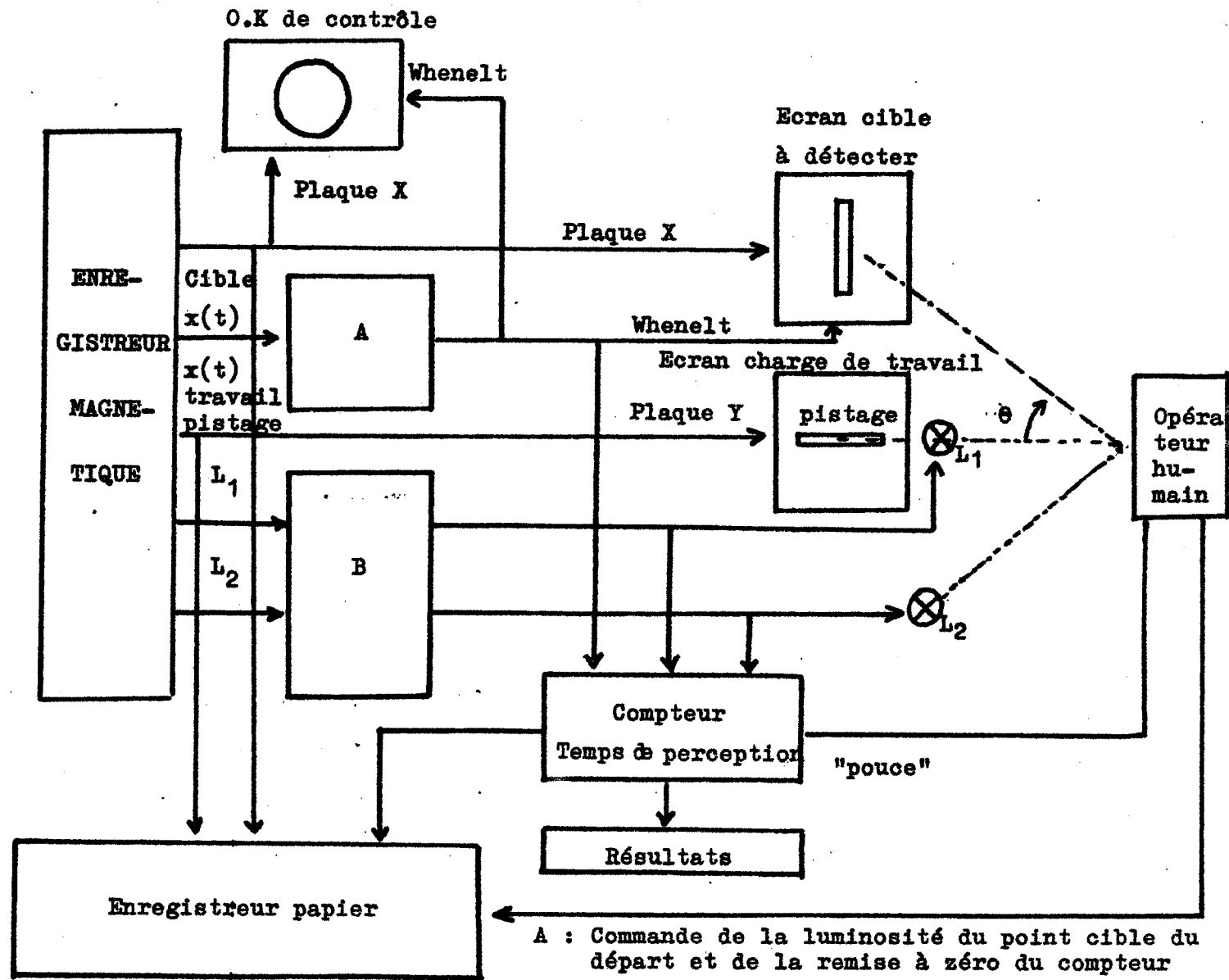


Fig. II₂ La cabine expérimentale



Fig. II₃ Schéma - bloc du dispositif expérimental



A : Commande de la luminosité du point cible du départ et de la remise à zéro du compteur

B : Commande des lampes du départ et de la remise à zéro du compteur



II_{2.2} - Protocole expérimental

Le sujet alors qu'il effectue une tâche principale doit appuyer avec le pouce sur un bouton poussoir dès l'apparition d'une cible $x(t)$. Nous lui demandons de réaliser en priorité et le mieux possible la tâche principale telle qu'elle a été définie au chapitre I et de répondre le plus vite possible aux sollicitations de la tâche secondaire.

Les tests préliminaires portant sur des sujets habitués à l'expérience et sur des sujets non habitués, nous ont permis de mettre au point la cabine d'expérimentation. Compte tenu des grandes variations inter individuelles constatées (fig. II₄), nous avons choisi de concentrer notre étude sur 5 sujets faisant partie du personnel du laboratoire et par conséquent habitués à l'expérience. La moyenne d'âge est de 25 ans.

L'étude que nous présentons a été plus spécialement orientée vers la vision scotopique (faibles niveaux de luminosité). Le sujet est enfermé dans la cabine d'expérimentation obscure pendant 20 minutes afin de supprimer l'influence de l'adaptation visuelle du sujet (au sens physiologique du terme). Les signaux lui sont alors présentés durant environ 30 minutes. La séquence de présentation des signaux (annexe II) a été préalablement enregistrée afin que chaque sujet soit placé dans les mêmes conditions d'expérience. Une des lampes perturbatrices (L_1) est placée dans l'axe du regard en dessous de la tâche principale, l'autre (L_2) est placée dans le champ latéral de vision opposé à celui de présentation de la cible $x(t)$ à un angle de 40° par rapport à l'axe du regard.

$L=0,18 \text{ cd/m}^2$ $\theta = 90^\circ$
charge de travail: poursuite sinusoidale

sujet	temps de réaction en s	nombre de "nonvu" sur 10 essais	temps de réaction en s	nombre de "nonvu" sur 10 essais
F.D.	0,560	5	0,595	4
B.P.	0,420	4	0,485	4
B.W.	0,315	5	0,375	3
R.D.	0,320	3	0,326	0

VITESSE +30

VITESSE - 100

Fig. II₄ Mise en évidence des variations inter individuelles des sujets.

Chaque sujet a été soumis à 25 expériences correspondant à l'exploration des divers paramètres.

Pour chaque test les vitesses explorées étaient de 1 cm/s, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 cm/s dans le sens central et dans le sens périphérique à raison de 5 mesures par vitesse, et ce pour 3 luminosités de la cible (0,18, 1 et 3,5 cd/m^2), 5 angles ($\theta_0 = 20^\circ, 45^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 95^\circ$) et les 3 charges de travail définies dans le précédent chapitre.

Nous avons d'autre part entrepris de dégager l'influence de la luminosité du fond. Dans cette série d'expérience l'angle θ_0 est fixé à 90° et nous nous sommes limités aux vitesses périphériques et centrales de 10 cm/s, 30 cm/s et 100 cm/s mais nous avons inclus dans le test l'apparition d'un point immobile ($V = 0 \text{ cm/s}$). A raison de 10 mesures par vitesse nous avons réduit à 10 mn le temps d'expérience, le protocole expérimental étant par ailleurs le même. Il sera fait appel à quelques résultats de ce type d'expérience dans les chapitres suivants.

II₃- ANALYSE DES RESULTATS

II_{3.1}- Analyse des temps de réaction

Comme nous l'avons signalé plus haut le but de notre étude n'est pas d'établir un modèle absolu de l'opérateur humain effectuant une tâche particulière, mais de mettre en évidence par la modélisation certaines relations structurelles possibles intervenant dans les problèmes d'action et de décision, c'est pourquoi nous avons choisi d'explorer un nombre important de paramètres.

Cependant compte tenu du nombre faible de mesures et du manque de connaissance à priori du système, il n'est pas possible d'envisager l'utilisation des méthodes statistiques classiques. La représentation la plus probable est alors celle correspondant aux points appartenant à un nuage compact. Lorsque nous sommes en présence de deux nuages nous ne pouvons trancher et les deux points sont représentés sur nos courbes.

Mais la description de l'échantillon ne serait pas complète si nous ne tenions pas compte de la dispersion. Celle-ci n'est pas fortement corrélée avec le phénomène étudié mais dépend essentiellement de l'état psychologique et physique du sujet aussi bien global (fatigue, disponibilité) qu'instantané (attention perturbée).

Notons toutefois que la dispersion est souvent très grande et que la courbe de distribution des temps de réaction est fortement asymétrique comme le montre la figure II₅

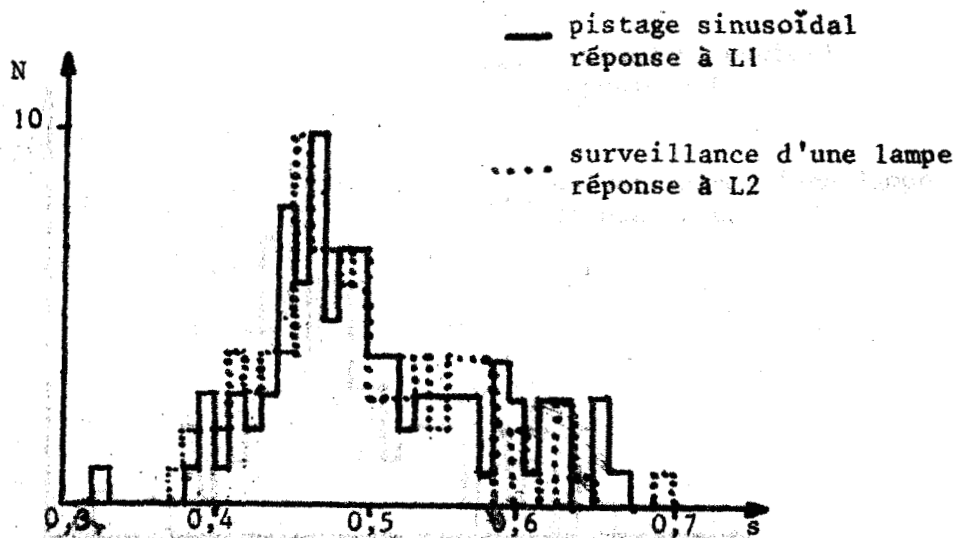


Fig. II₅, Exemple d'histogramme de temps de réaction pour un même sujet

II_{3.2} - Analyse des faits marginaux

II_{3.2.1} - Les réponses incorrectes

Si l'analyse des résultats relatifs aux valeurs du temps de réaction constitue la partie essentielle de cette étude, il est apparu rapidement au cours du dépouillement des mesures que nous devions prendre en compte les "non réponses" du sujet (1500 affiché au compteur et sur l'imprimante). Encore fallait-il connaître la raison réelle de la non-réponse. Nous avons demandé à l'opérateur lui-même de nous les expliquer, en effet il est averti de ses non réponses par la boucle de retour sonore que constitue le bruit de déclenchement de l'imprimante lorsqu'il appuie sur le bouton ou au bout de 1,5 s (arrêt automatique du comptage). Nous avons pu ainsi dégager 3 types de réponses incorrectes.

a) Les erreurs systématiques

Elles sont dues à un dysfonctionnement du bouton poussoir : le sujet a appuyé mais l'imprimante ne se déclenche pas. Elles se traduisent soit par 1500 affiché au compteur et les protestations du sujet, soit par un temps de réaction anormalement long dû à un double appui sur le bouton poussoir. Ce cas est évidemment à écarter lors de l'analyse des résultats.

b) Les erreurs par "non action"

1500 est affiché au compteur, le sujet n'a pas appuyé mais dit avoir "vu quelque chose". La faible fréquence de ce type d'erreur n'a pas permis d'en faire une étude systématique ni de déceler une corrélation significative entre leurs apparitions et les modifications de nos paramètres. Cependant nous devons en tenir compte dans l'élaboration du modèle.

c) Les erreurs par "non perception"

1500 est affiché au compteur et le sujet n'a pas vu le stimulus. Là encore le faible nombre de mesures dans notre première série d'expériences n'a pas permis d'étude statistique, nous nous sommes alors contentés de signaler

leur fréquence (sur 5 mesures) par un chiffre sur les diverses courbes que nous présentons. Une étude plus systématique de la fréquence d'apparition de ces "non réponses" a été entreprise lors de la deuxième série d'expériences. Nous en présentons les résultats pour chaque sujet au chapitre III.

II_{3.2.2} - L'attention du sujet

Il ne s'agit plus ici à proprement parler d'analyse de résultats mais d'une caractérisation d'un paramètre "psychologique" déterminant du comportement du sujet. Ce paramètre essentiellement subjectif fait appel à deux notions intuitives.

a) La difficulté de la tâche, ou niveau de charge de travail, se traduit par une variation des performances de l'opérateur sur la tâche secondaire (fig. II₆).

C_p principale θ_0 ↓	Positionnement manuel	Surveillance d'une lampe	Pistage sinusoïdal
20°	0,31	0,32	0,36
80°	0,37	0,38	0,43

Fig. II₆ Evolution du temps de réaction T_R en secondes pour un sujet du groupe A (luminosité $L = 3,5 \text{ cd/m}^2$, vitesse $V = 50 \text{ cm/s}$).

Nous tenterons de la caractériser en étudiant la distribution des temps de réaction à l'allumage de la lampe L_2 .

En effet les paramètres de ce stimulus sont fixes au cours des tests, ce qui n'est pas le cas pour la cible $x(t)$, et d'autre part sa localisation dans le champ périphérique permet de négliger l'influence du mouvement des yeux induit par la tâche de travail principale, ce qui n'est pas vrai pour la lampe L_1 .

- b) L'attention portée par le sujet à sa tâche devrait se traduire par une variation des performances du sujet sur la tâche.

II₄ - CONCLUSIONS

Malgré un protocole expérimental aussi rigoureux que possible pour tenter de réduire au maximum la dispersion des résultats autant inter individuelle qu'intra-individuelle.

Celle-ci pose un délicat problème au niveau de l'analyse des résultats d'autant plus que les causes de cette dispersion paraissent être liées à des critères éminemment subjectifs. Nous tenterons de les dégager au cours des chapitres suivants afin de les inclure dans notre modèle.

CHAPITRE III

RESULTATS OBTENUS

ET

DONNEES PHYSIOLOGIQUES

III₁ - INTRODUCTION

Nous allons dans ce chapitre exposer les résultats des expériences précédemment décrites et les données physiologiques concernant notre problème.

Nous considérons donc successivement l'influence des différents paramètres de la tâche secondaire, puis nous analysons les variations du temps de réaction corrélées à la tâche principale.

Enfin nous dégageons les données physiologiques en nous appliquant à faire ressortir les points nous intéressant du point de vue de l'automatique.

III₂ - INFLUENCE DES PARAMETRES DE LA CIBLE A DETECTER

III_{2.1} - Influence de l'angle d'apparition θ_0 du mobile à détecter
(fig. III₁ à III₄)

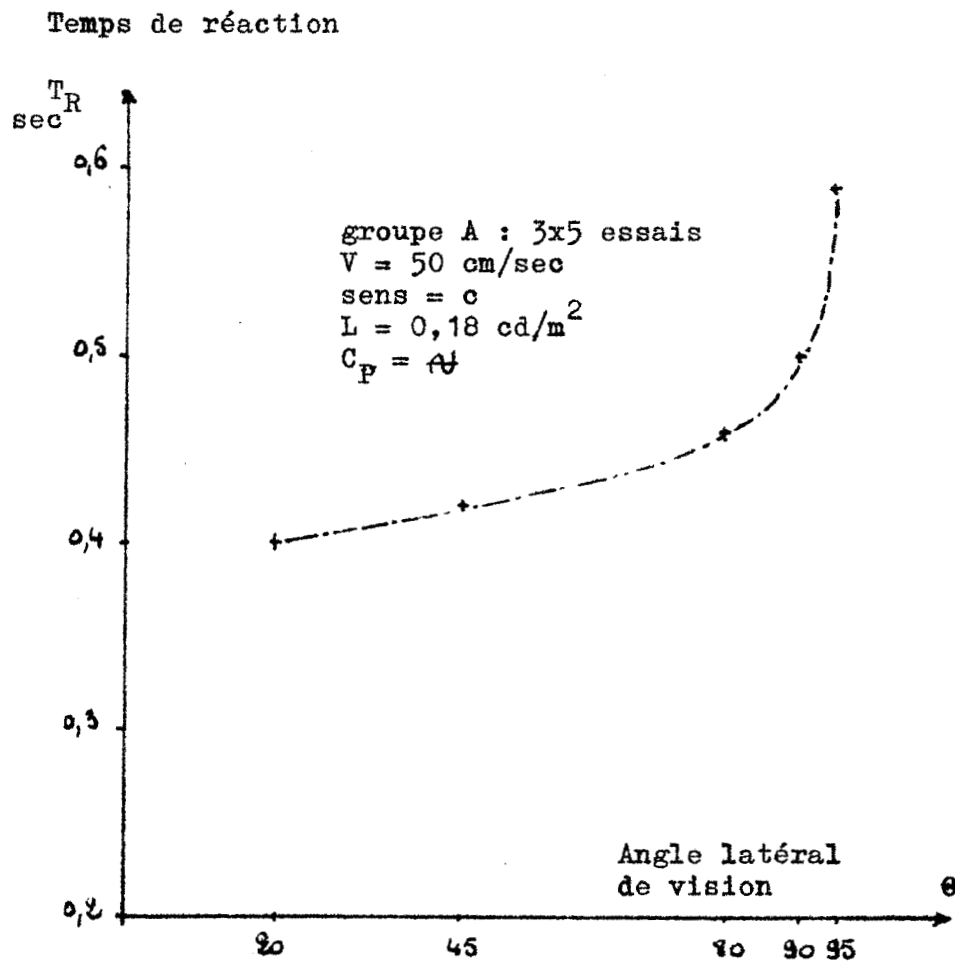


Fig. III₁ : Variations de T_R en fonction de l'angle θ_0 d'apparition du mobile $V = 50$ cm/sec., sens = c, $L = 0,18$ cd/m², $C_P = A$ (pistage alternatif).



Il est possible de constater une importante variation des temps de réaction à partir d'un angle d'environ 70°. Cette diminution des performances des sujets en fonction de l'angle θ_0 est confirmée par l'étude, pour un sujet donné, du nombre de "non vu" présenté sous forme du tableau de la fig. III₂.

θ_0 V cm/s	20	90	95
50 cm/s	0	0	7
70 cm/s	0	7	100
80 cm/s	0	26	100

Fig. III₂ : Variations du nombre de "non vu" pour diverses valeurs des angles d'apparition et des vitesses de la cible en pourcentage.

Remarquons dès à présent l'influence d'une modification de la vitesse du déplacement de la cible (fig. III₃).

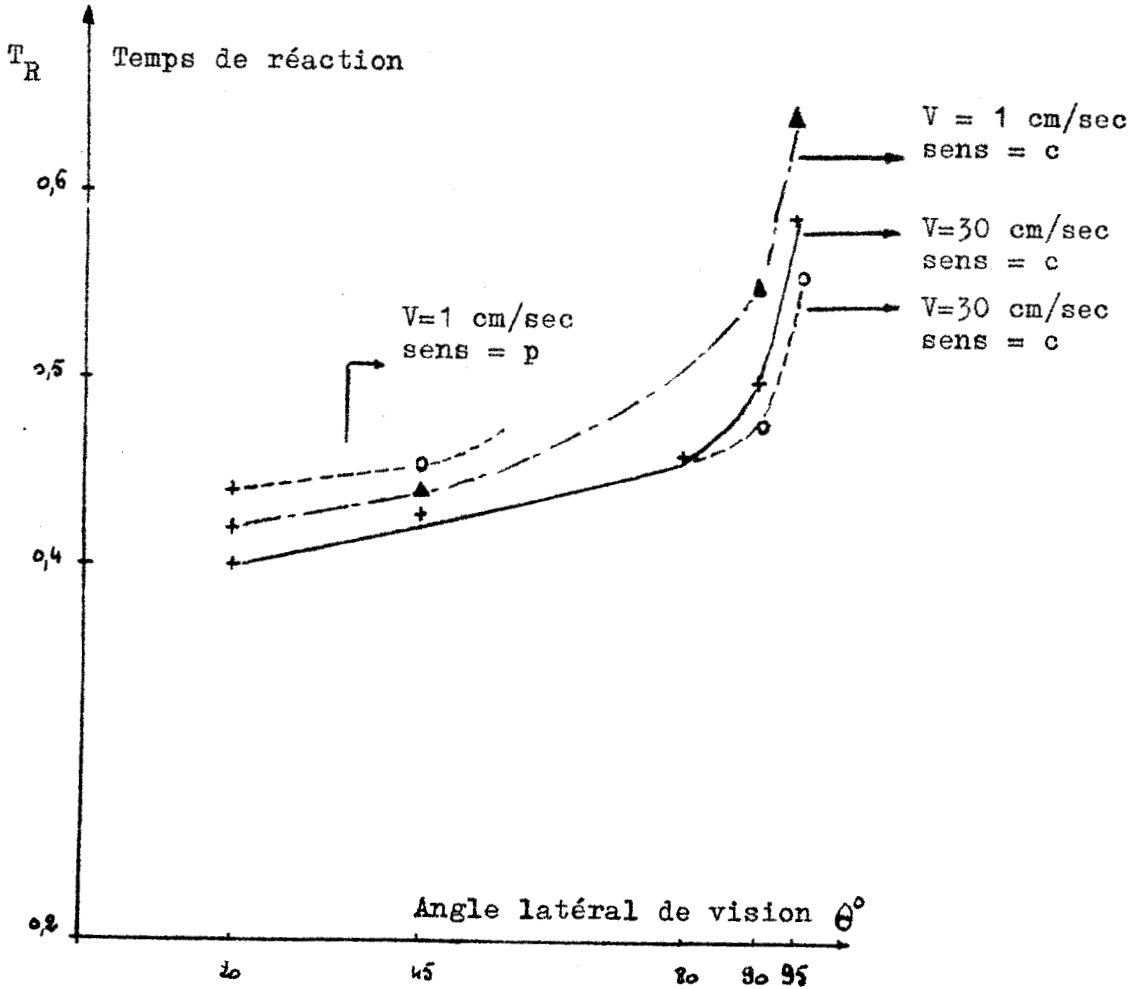


Fig. III₃ : Temps de réaction en fonction de l'angle - Influence de la vitesse du mobile.
Groupe A $L = 0,18 \text{ cd/m}^2$ $C_p =$ poursuite sinusoïdale
15 essais - lois probables



Temps de réaction

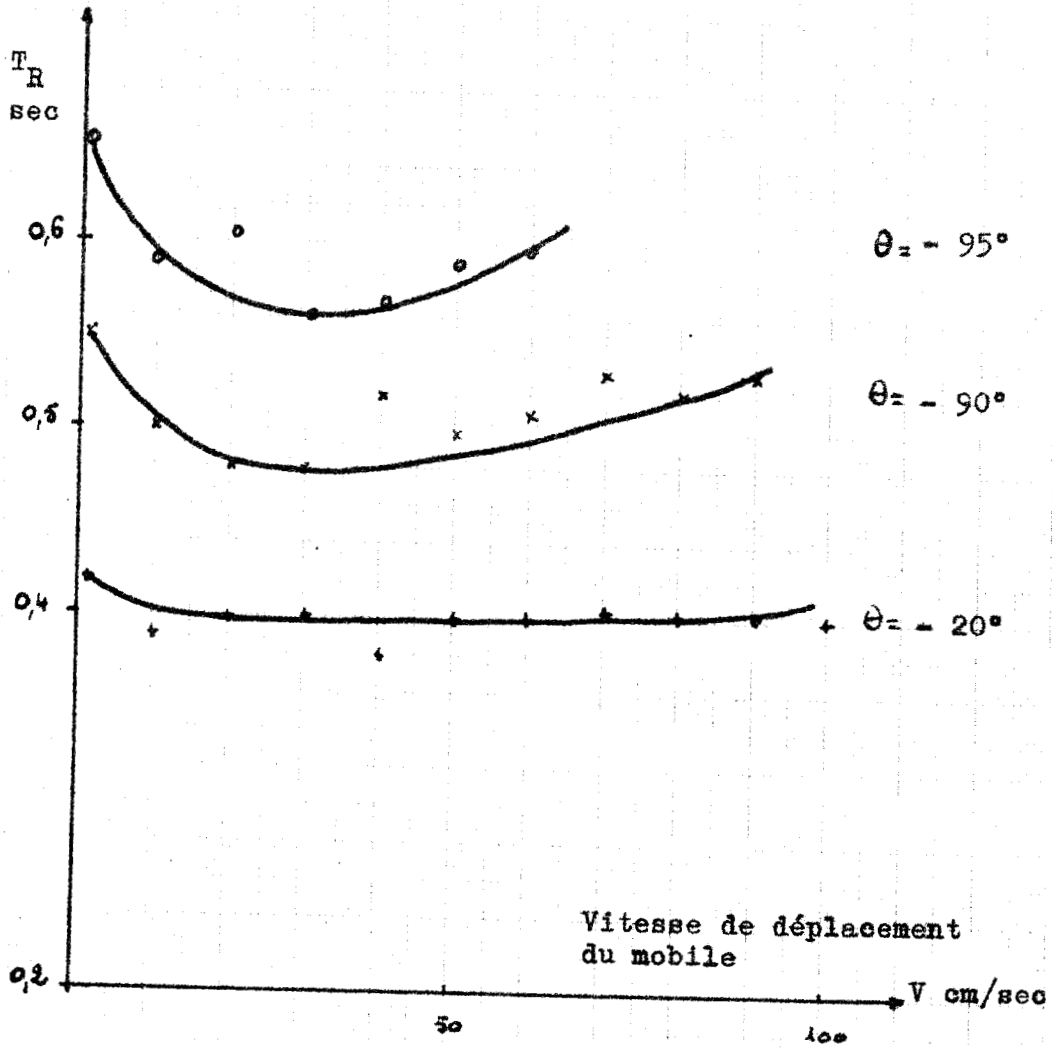


Fig. III₄ : Temps de réaction en fonction de la vitesse (centrale)
Influence de l'angle θ
 $L = 0,18 \text{ cd/m}^2$ $C_p =$ poursuite sinusoïdale
15 essais - lois probables



III_{2.2} - Influence de la vitesse de déplacement de la cible

L'examen des courbes obtenues (fig. III₄) révèle, pour une vitesse donnée et pour les grands angles, une valeur minimum. D'autre part, pour des angles inférieurs à 80°, il semble que la vitesse n'ait plus grande influence excepté pour des valeurs faibles, inférieures à 20 cm/s. Cet optimum de performances est confirmé par la courbe (fig. III₅) donnant le nombre de "non vu" en fonction de la vitesse dans notre seconde série d'expériences.

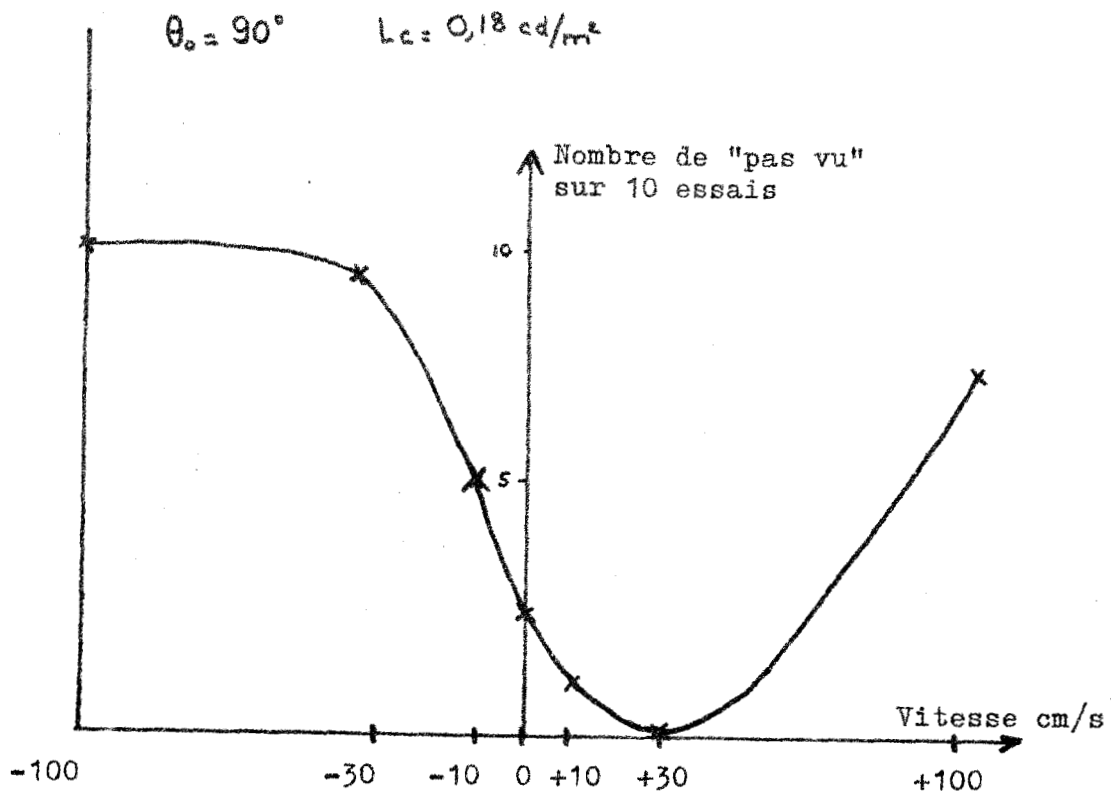


Fig. III₅ : Nombre de "non vu" sur 10 essais pour un même sujet et

Ce fait n'a, à notre connaissance, jamais été signalé dans la littérature. Ceci est sans doute dû au fait que les expériences faites antérieurement sont souvent statiques (le point à détecter ne bouge pas). Pourtant on peut sans doute rapprocher ce résultat du phénomène de BROCCA SULZER (fig. III₆) qui montre que, lors de la présentation de flashs lumineux de luminance égale et de durée variable, il existe une durée pour laquelle la luminosité du point paraît plus grande. [7]

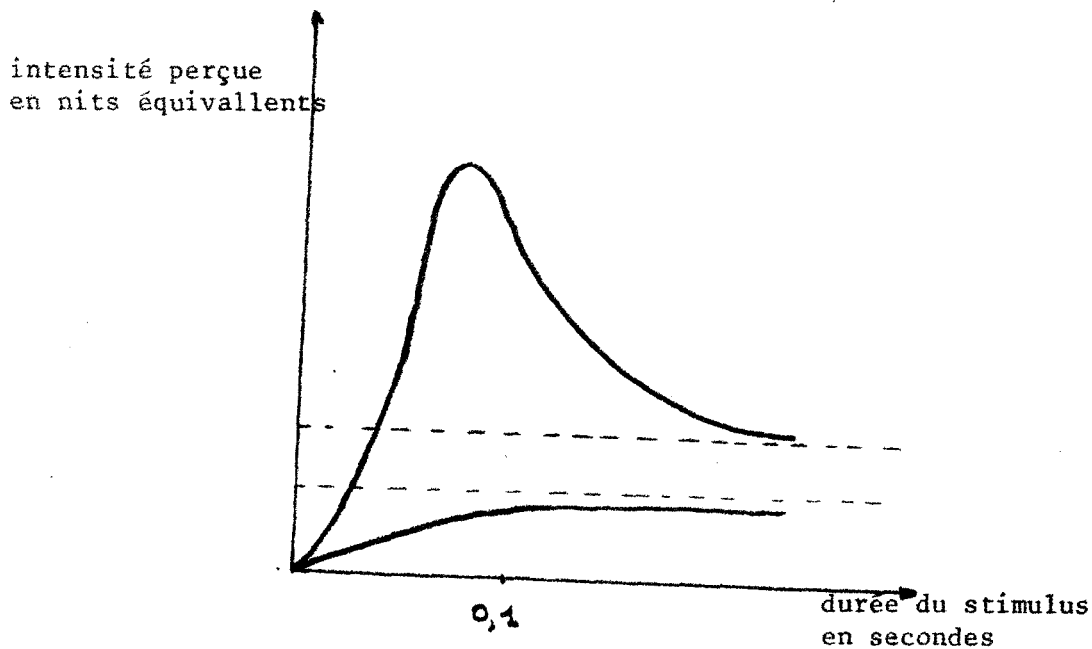


Fig. III₆ : Phénomène de Brocca Sulzer

Les courbes présentent d'autre part une dissymétrie par rapport à l'origine des vitesses.

Cette dissymétrie est encore plus nette sur la figure III₇. Ceci semble difficilement interprétable en termes physiologiques mais reste cependant en accord avec les résultats des psychologues [8] à propos de l'influence de la motivation des sujets sur la valeur des temps de réaction. Cette motivation serait ici liée à la menace réelle ou supposée que porte le stimulus se rapprochant ou s'éloignant de l'opérateur.

Temps de réaction

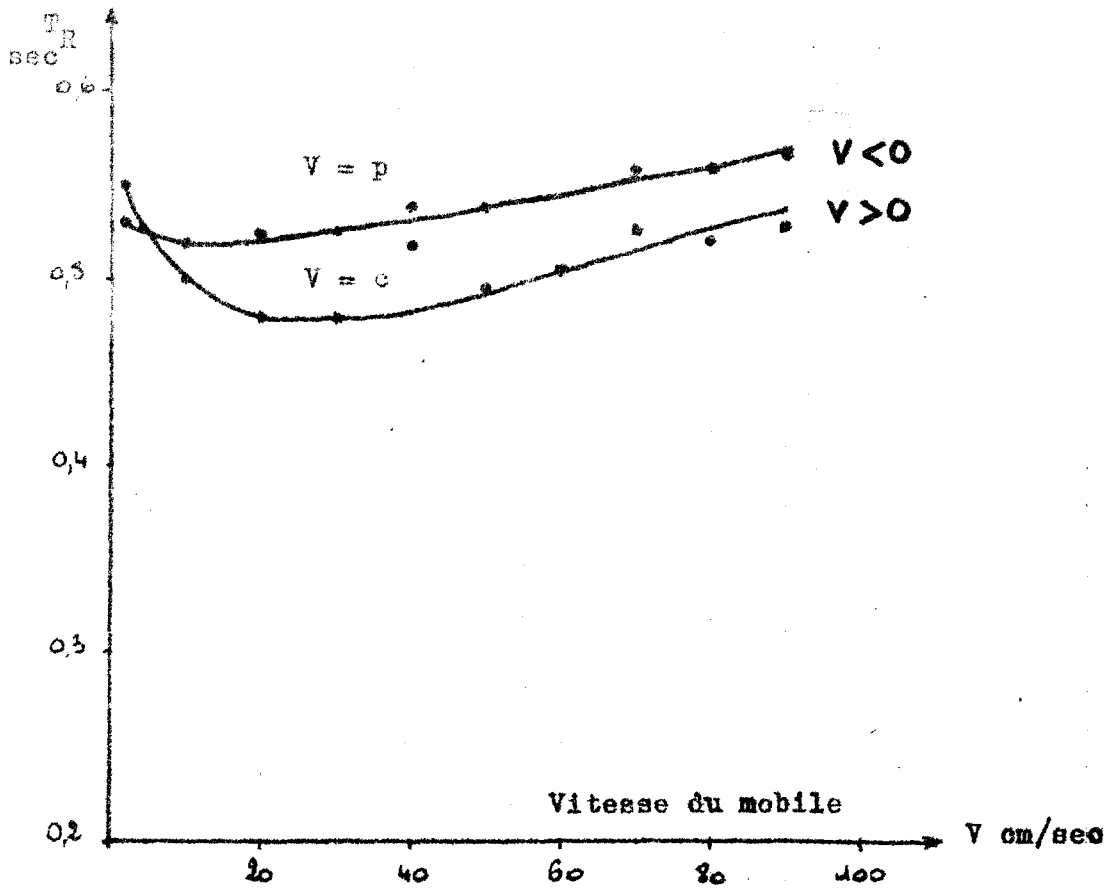


Fig. III₇ : Influence de sens du déplacement du mobile sur les temps de réaction .

$L = 0,18 \text{ cd/m}^2$ $\theta = -90^\circ$

15 essais - lois probables C_p = poursuite d'une cible en déplacement sinusoïdal



III_{2.3} Influence de la luminosité

Comme nous l'avons signalé dans le chapitre précédent, le domaine d'étude de ce paramètre est fortement limité par notre dispositif expérimental, c'est pourquoi nous ne présentons de résultats que pour 3 valeurs différentes de cette luminosité (fig. III₈).

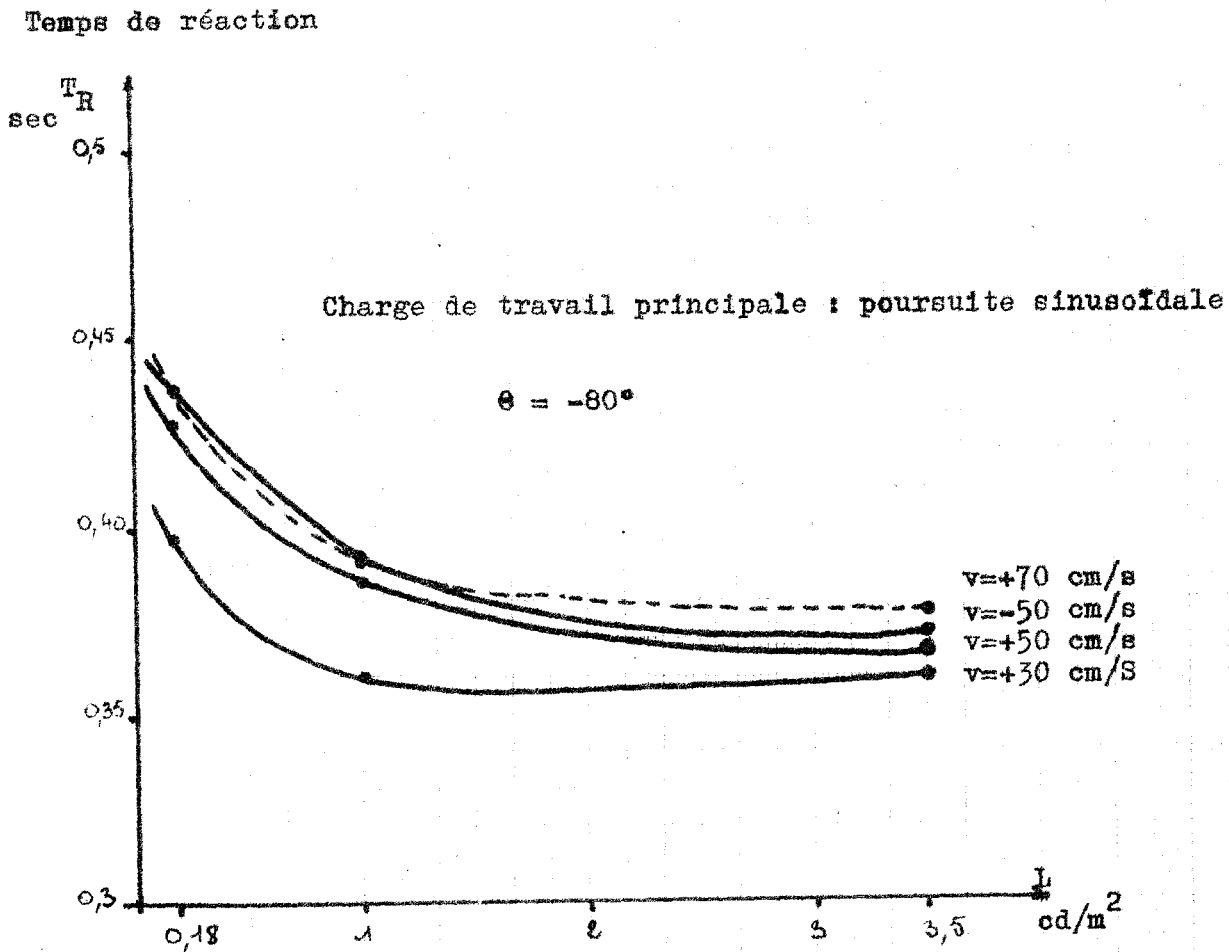


Fig. III₈ : Courbe de variation des temps de réaction en fonction de la luminosité.

Sur les courbes le temps de réaction diminue quand la luminosité augmente. Ceci est en accord avec les études menées par les psycho-physiologistes sur l'influence de la luminosité sur les seuils de perception (fig. III₉).

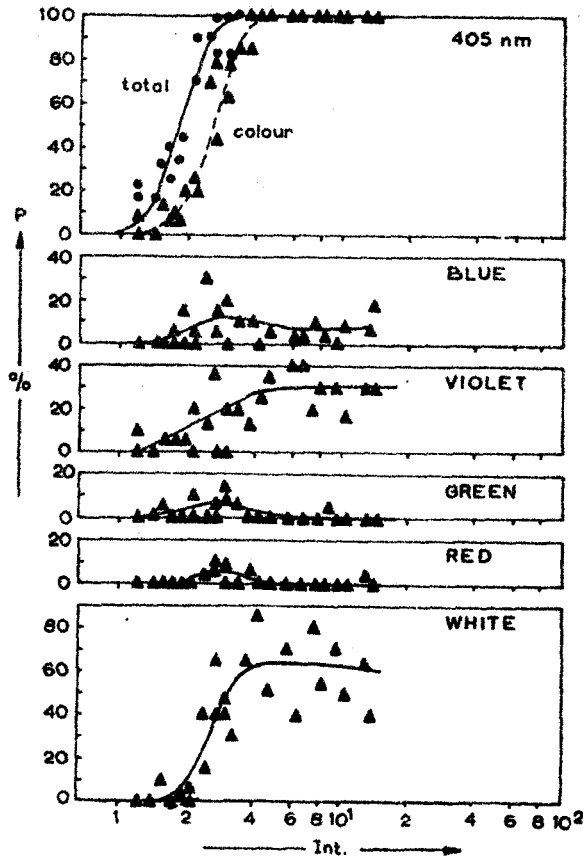


Fig. 4a

Fig. 4. Frequency of seeing curves as a function of intensity at the indicated wavelengths, for flashes of small visual angle ($3'$) and short duration (0.05 sec). The upper graph represents the frequency of seeing at all (total) and the frequency of seeing color (color). The other graphs represent the frequencies of seeing of the particular colors indicated. (From WALRAVEN and BOUMAN, 1957b; WALRAVEN, 1962.) The measurements were performed on the dark-adapted fovea

Fig. III₉ : Variation des seuils absolus de vision en fonction de la luminosité de la source en pourcentage de "vu". [9]

D'autre part aux faibles valeurs de la luminosité du mobile à détecter, le temps de réaction devient plus sensible à la vitesse du déplacement tandis que la dissymétrie vis à vis du sens de déplacement de la cible diminue pour les fortes luminosités.



III₃- INFLUENCE DE LA TACHE PRINCIPALE

III_{3.1}- La difficulté de la tâche

Les résultats dans ce domaine doivent être interprétés avec prudence du fait de l'intervention de paramètres non contrôlables. Le tableau de la figure III₁₀ montre l'impossibilité où nous nous sommes trouvé de définir une relation d'ordre dans la difficulté de ces tâches pour tous les sujets. Cependant pour un sujet donné cette relation d'ordre est conservée quelque soient les paramètres de la "tâche secondaire" (fig. III₁₁ et III₁₂).




				Sujets
$V = 50 \text{ cm/sec (c)}$ $L = 3,5 \text{ cd/m}^2$ $\theta = 80^\circ$	0,37	0,35	0,38	A ₂
	0,35	0,42	0,48	A ₃
	0,31	0,41	0,34	B ₁
	0,40	0,39	0,44	B ₂
$V = 50 \text{ cm/sec (c)}$ $L = 0,18 \text{ cd/m}^2$ $\theta = 20^\circ$	0,37	0,40		A ₂
	0,39	0,39	0,44	A ₃
	0,27	0,35	0,32	B ₁
	0,40	0,42	0,48	B ₂

Fig. III₁₀ : Différents résultats du temps de réaction TR (en seconde)
 en fonction de la nature de la charge de travail principale

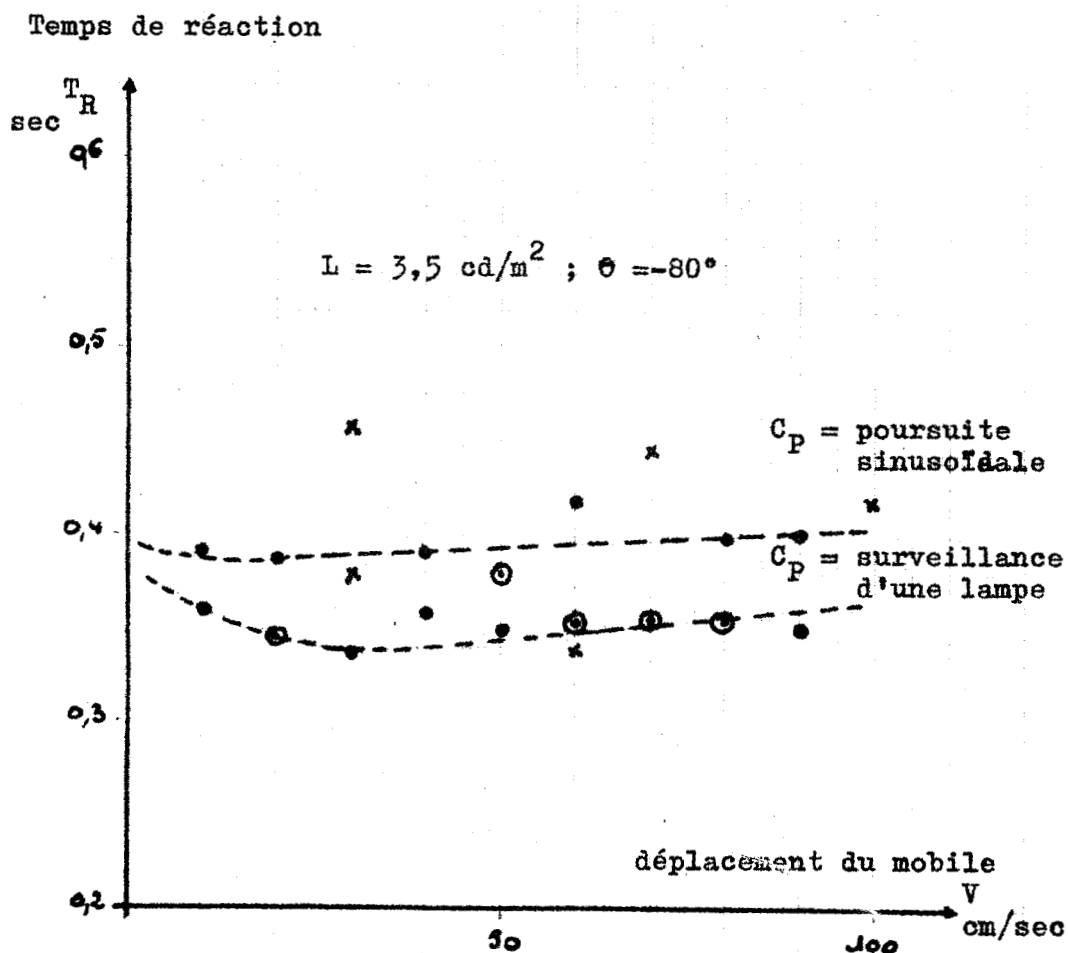


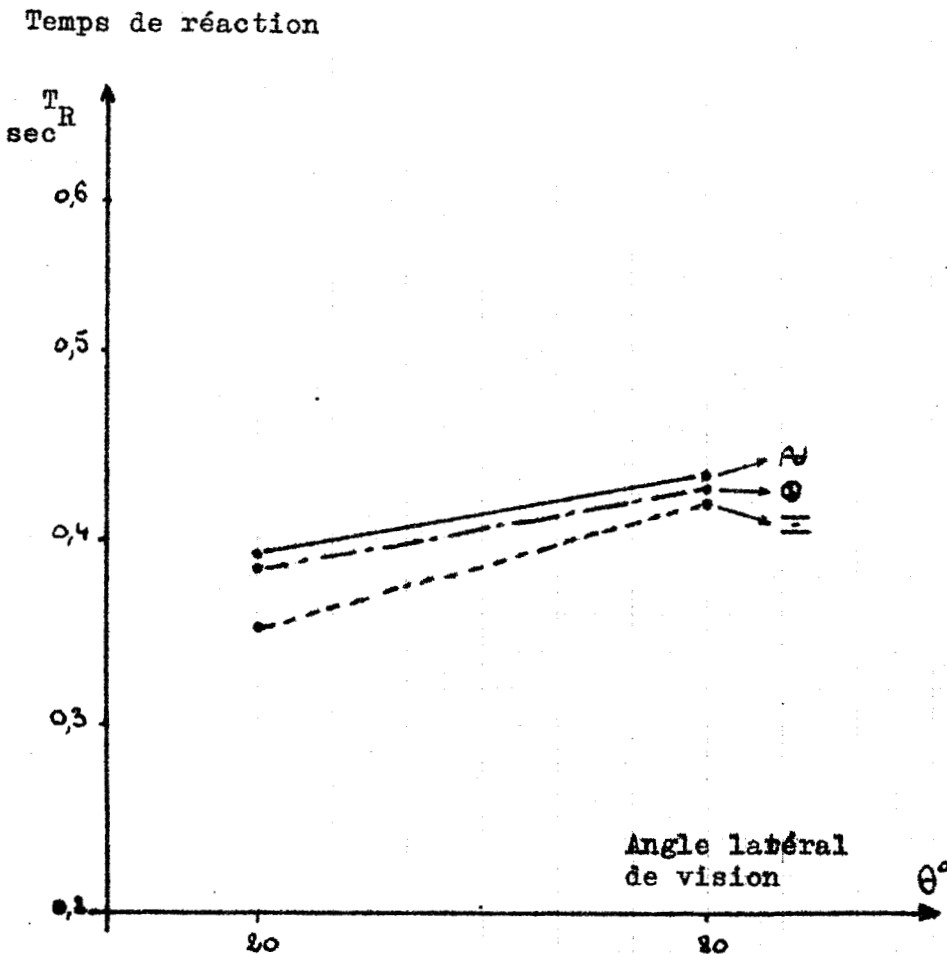
Fig. III₁₁ : Temps de réaction en fonction de la vitesse pour un sujet
Influence de la charge de travail
 $L = 3,5 \text{ cd/m}^2$ $\theta = -80^\circ$

Fig. III₁₂ : Temps de réaction T_R d'une cible mobile en fonction de l'angle latéral θ_0 d'apparition. Le paramètre utilisé est la nature de la tâche principale de travail en vision frontale.

Notons le même phénomène de translation verticale des courbes selon la nature de la charge de travail.

- | | | |
|-----------|---|--|
| ∞ | : pistage manuel | Vitesse du mobile
$V = 50 \text{ cm/sec}$ |
| \otimes | : surveillance d'une lampe | Sens : central |
| \equiv | : positionnement manuel
entre deux repères | Luminosité
$I_1 = 0,18 \text{ cd/m}^2$ |

Loi probable pour 4 sujets



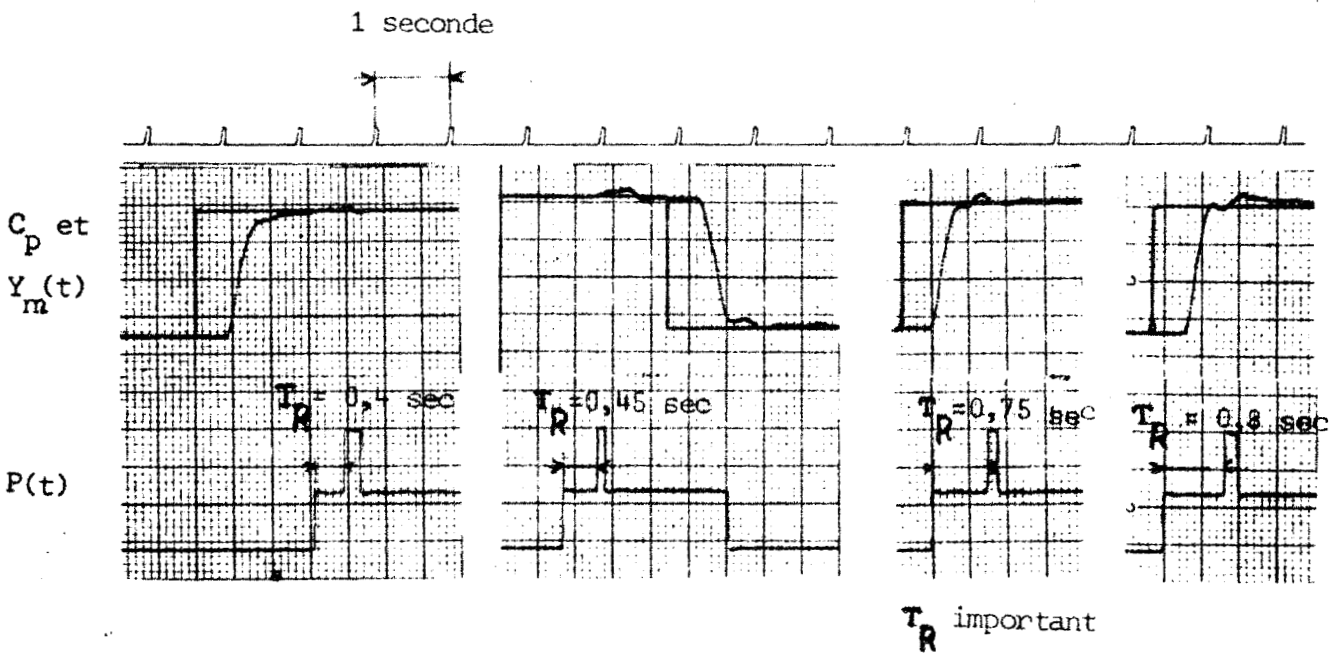
III_{3.2} - L'attention portée par l'opérateur à sa tâche

Si la difficulté intrinsèque de la tâche intervient d'une façon particulière pour chaque sujet, l'attention que l'opérateur porte à sa charge de travail entraîne des variations sensibles dans la valeur des temps de réaction. Nous en voulons pour preuve l'analyse des enregistrements graphiques des sorties de l'opérateur (fig. III₁₄ et III₁₅).

Nos expériences préliminaires avec charge de travail discontinue semblent dans ce sens assez significatives (fig. III₁₄). En effet la nature de la charge de travail elle-même ne requiert l'attention de l'opérateur qu'à des instants déterminés entraînant une augmentation du temps de réaction lors d'une apparition simultanée du stimulus à détecter.

Dans le cas d'une poursuite manuelle sinusoïdale, il semble que l'attention du sujet puisse être assimilée à la qualité de la réponse principale comme le montre l'examen du tracé reproduit sur la figure III₁₅.

Cet examen suggère l'utilisation d'un critère basé sur la valeur absolue de l'erreur ϵ vis à vis de la tâche principale. Nous y reviendrons plus loin lors de l'identification du système.



C_p = charge de travail principale
 $Y_m(t)$ = sortie manuelle
 T_R^m = temps de réaction

Fig. III₁₄ : Tracé obtenu avec une charge de travail discontinue.



Saccade manuelle
(tâche principale)
et $T_R \approx 0,5$ seconde

$T_R =$ Temps de réaction
 $I_1 = 0,18 \text{ cd/m}^2$
 $\theta = 20^\circ$

Pas de saccade manuelle
(tâche principale), poursuite normale
 $T_R \approx 0,4$ seconde

Niveau A: ni cible, ni lampe
Niveau B: présentation de L2
Niveau C: présentation de L1
Niveau D: présentation de $x(t)$
Top supérieur: appui du pouce

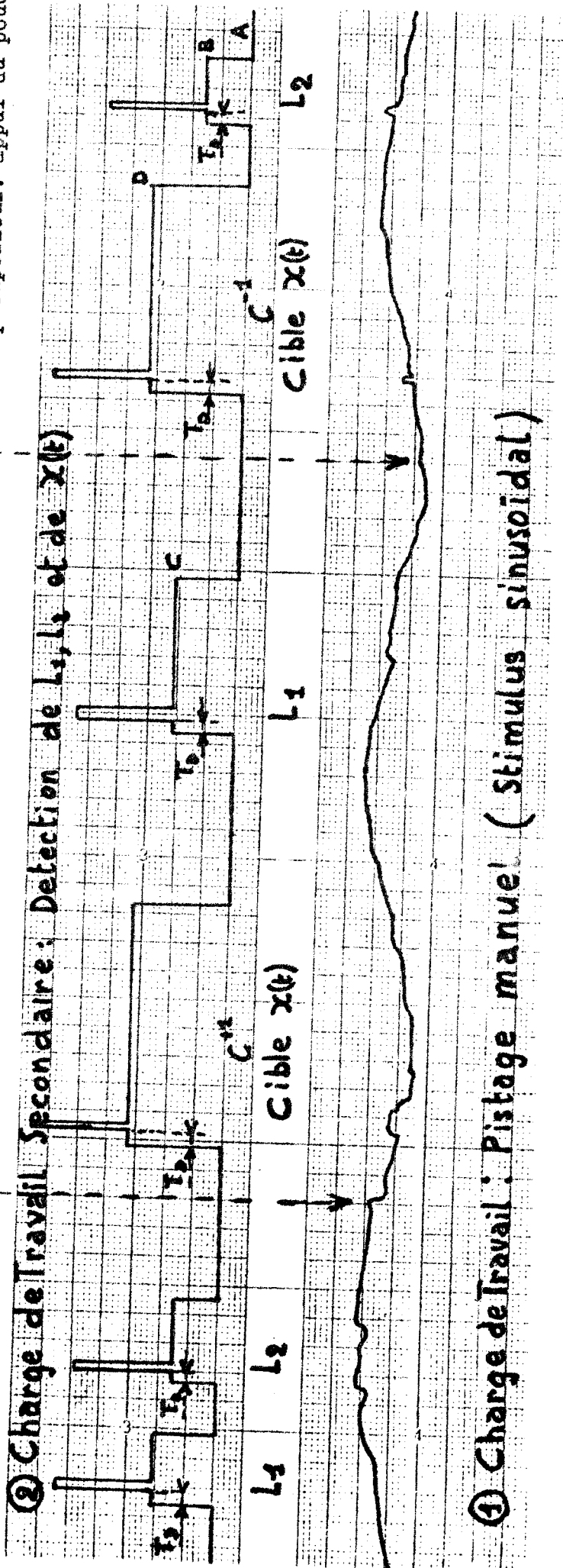


Fig. III 15 : Enregistrement des réponses "principale" et "secondaire" de l'opérateur humain



III₄ - DONNEES ET HYPOTHESES PHYSIOLOGIQUES RETENUES

III_{4.1} - La rétine (cf. Annexe III)

La rétine est composée d'une mosaïque de photorécepteurs (les cônes et les bâtonnets) qui transforment l'énergie lumineuse en impulsions nerveuses par l'intermédiaire de mécanismes chimiques. C'est l'absorption par la rhodopsine d'un certain nombre de quanta d'énergie lumineuse qui en la détruisant génère des spikes (impulsions sur la fibre nerveuse) dont la fréquence croît avec la quantité de rhodopsine transformée. Il faut un nombre de quanta minimum pour déclencher le phénomène (seuil d'excitation) et la quantité de rhodopsine par cellule est limitée d'où un phénomène de saturation (fig. III₁₆).

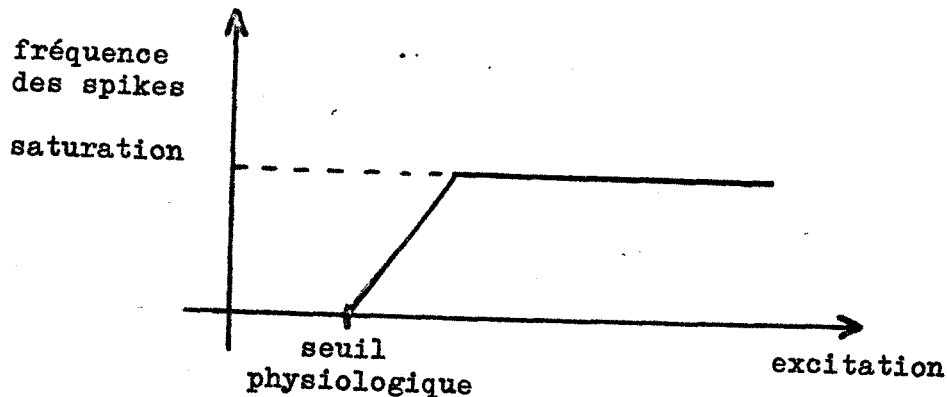


Fig. III₁₆ : Relation entre la fréquence des spikes et l'intensité de l'excitation (14)

D'autre part l'action des quanta d'énergie se superposant dans le temps, il existe au niveau de la cellule réceptrice une sommation temporelle. Le temps d'impact du spot lumineux sur les cellules rétiniennes intervient donc.

Cependant la rétine ne se réduit pas à une couche photosensible, il faut la considérer comme un véritable centre nerveux comme le montre la coupe schématisée de la figure III₁₇.

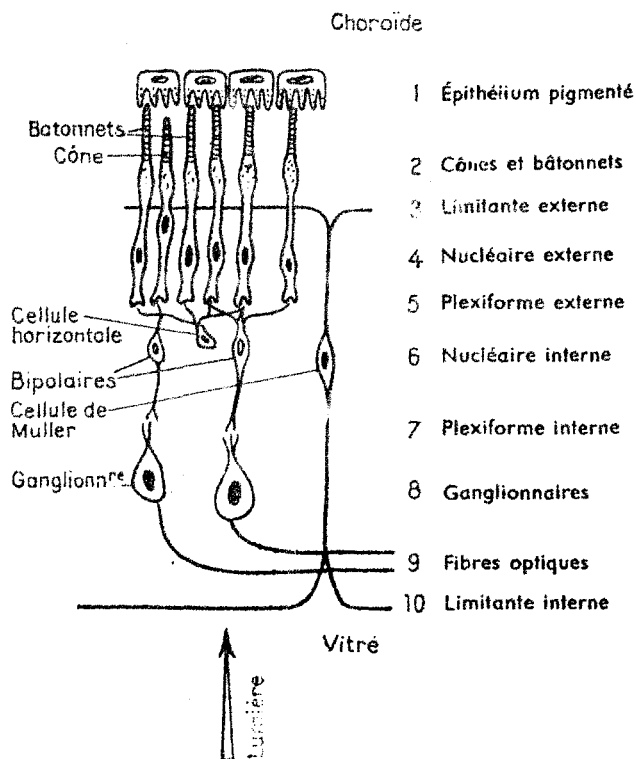


Fig. III₁₇: Coupe schématisée de la rétine [7]

Il existe déjà au niveau de l'oeil une organisation spatiale particulière en unités réceptrices. De nombreuses cellules photoréceptrices sont connectées à une seule cellule ganglionnaire d'où part la fibre nerveuse constituant le nerf optique. Le nombre des cellules (cônes et bâtonnets) connectés à une seule fibre croît avec l'excentricité, par rapport à la fovéa, de la zone rétinienne considérée comme le montre le tableau III₁₈ pour les cellules en cônes.

Limite des zones excentricité en degrés	Nombre moyen de cônes par fibres optiques
0 - 5	1
5 - 10	3
10 - 20	6
20 - 30	15
30 - 40	30
40 - 50	45
50 - 60	70
60 - 70	100

Tableau III₁₈ (LEGRAND op. cit. p 152)

A cela s'ajoute le fait que le nombre des bâtonnets par unité réceptrice augmente avec l'excentricité (9). On peut alors considérer la rétine comme une juxtaposition d'unité réceptrice de taille croissante en fonction de l'excentricité par rapport à la fovéa. C'est donc au niveau de ces unités réceptrices que se situe la sommation spatiale (fig. III₁₉).

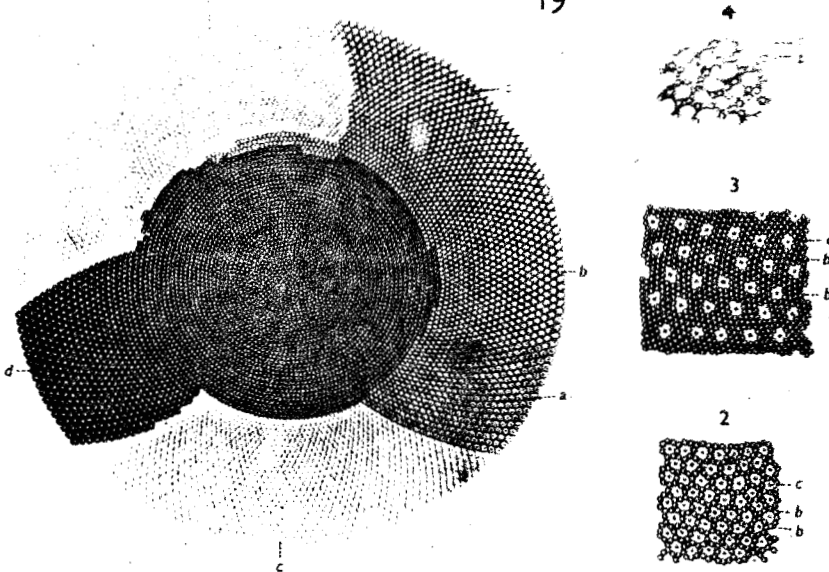


Fig. 3. Receptor mosaics of human retina, enlargement about 500; 1 fovea, a, b, c, and d indicate different depths in the preparation; 2 parafovea; 3 periphery; 4 ora serrata. In parts 2, 3, and 4 b is a rod and c a cone element. (From SCHULTZE, 1866)



Fig. III₁₉ Mosaïque des champs récepteurs rétiniens selon BOUMANN op. cit. p 132

III_{4.2} - La liaison sensori-motrice

Nous considérons dans ce paragraphe la notion de délai de conduction. Un temps de réaction s'interprète en effet comme un temps de prise d'information dû au seuil d'excitation et à la sommation temporelle déjà signalé.

- Un temps de conduction de l'influx nerveux de la rétine aux centres visuels et des centres moteurs à effecteur.
- Un temps de détermination de la décision, qu'à défaut de connaissances plus précises on peut appeler temps de transit central.
- Un temps de réaction d'effecteur à la commande motrice.

III_{4.2.1} - Conduction de l'influx nerveux

a) De la rétine aux centres visuels

L'information portée par le spot est à la fois spatiale (localisation de la cible) et énergétique (luminosité, longueur d'onde, temps d'impact). Le support de transfert de ces informations n'est pas le même. En effet le support de l'information spatiale est la position de la ou des fibres nerveuses issues de l'unité réceptrice ou des unités réceptrices excitées elles-mêmes par rapport aux autres fibres du nerf optique. Le canal de transfert de l'information spatiale est donc essentiellement discret, il est de plus en plus imprécis (bruité) lorsqu'on s'éloigne de la fovéa puisque la surface des champs récepteurs augmente.

L'information énergétique est transmise par la fréquence des spikes sur la fibre nerveuse considérée, du moins dans la zone d'excitation comprise entre le seuil et la saturation. Pour l'information énergétique, le canal de transfert est donc pratiquement continu à puissance limitée pour une unité réceptrice déterminée.

En résumé l'information spatiale ne peut parvenir aux centres concernés qu'avec l'information énergétique. C'est donc le transfert de cette information qui nous intéressera en premier lieu dans l'analyse des temps de

réaction compte tenu du fait que le canal de transfert est modifié pour une localisation différente de la cible.

b) Des centres nerveux à l'effecteur

Les mouvements demandés par le protocole expérimental étant toujours les mêmes, la même quantité d'information transite par les mêmes canaux, à savoir la voie pyramidale. En particulier il ne semble pas possible de faire appel à des notions de recrutement de neurones. C'est pourquoi nous admettons que les variations du temps de conduction par ce canal ne puisse expliquer les variations des temps de réaction. Il en va de même pour le retard de l'effecteur à la commande.

III 4.2.2- Transit central

La notion de centre nerveux est prise ici dans un sens très large car elle englobe toute la partie de la voie visuo-motrice susceptible d'opérer un traitement des informations après la rétine. Ces centres sont sous le contrôle de la formation réticulée et comprennent en particulier le cortex moteur, le cortex associatif, le cortex visuel. Ils peuvent aussi s'étendre jusqu'aux corps genouillés où, d'après certaines observations faites chez le chat (17), il existerait déjà un traitement de l'information. Pour nous, au cours de ce transit central, les interdépendances des tâches et l'attention du sujet interviendront. Il appartiendra à la simulation de préciser les hypothèses sur ce point.

L'Annexe III donne de façon plus détaillée les éléments nécessaires à une bonne compréhension de ces derniers paragraphes.

III₅ - CONCLUSIONS

Dans ce chapitre nous avons mis en évidence les variations des temps de réaction en fonction des divers paramètres de la tâche globale effectuée par le sujet et en particulier l'existence d'un optimum des performances pour certaines vitesses du mobile à détecter.

Nous avons montré d'autre part la dualité des informations transmises aux centres nerveux. L'information spatiale est discrète et imprécise (d'autant plus que l'on s'éloigne de la fovœa), l'information énergétique elle, est continue (variations de fréquence) entre les limites physiologiques que sont le seuil d'excitation et la saturation des cellules nerveuses.

Enfin nous avons délimité la zone d'influence des paramètres peu quantifiables que sont l'attention et la difficulté des tâches pour la voie sensori-motrice.

Il nous reste maintenant à faire une synthèse de ces données. Ceci sera l'objet des chapitres suivants où nous identifierons tout d'abord la structure d'un modèle puis ses différents paramètres.

CHAPITRE IV

ELABORATION DU MODELE

INTRODUCTION

Après avoir, dans les chapitres précédents, dégagé les aspects caractéristiques du comportement de l'opérateur humain dans nos conditions expérimentales ; nous abordons maintenant la partie modélisation de notre travail après un rappel succinct des résultats et des hypothèses de travail.

IV₁ - FAITS CARACTERISTIQUES

L'expérimentation a mis en évidence :

- Un temps de réaction à l'apparition de stimuli latéraux variant avec tous les paramètres de la tâche globale.
- Une tâche principale entachée d'une erreur corrélée à l'attention du sujet.
- Des "non réponses" dues soit à une "non perception", soit à une "non action".

Nous savons d'autre part, d'après des travaux antérieurs (21), (22), (23), (24) que le comportement humain dans l'accomplissement d'une tâche peut être assimilé à un système automatique. Il existe en effet, outre la transmission directe des informations (du capteur à l'effecteur), une liaison en retour assurant le contrôle du déroulement de l'action et pouvant être de deux ordres :

- interne ou proprioceptive , il s'agit d'informations sur la tension des muscles et l'angulation des articulations essentiellement ;
- externe, les informations sont issues de l'environnement du sujet. Dans notre cas ce retour est visuel dans la tâche principale et tactile dans la tâche secondaire (sensation d'appui du pouce).

Le système visuo-moteur dans l'accomplissement d'une tâche manuelle a pu être schématisé (4) comme l'indique la figure IV₁.

Nous avons dans notre processus expérimental minimisé d'une part les problèmes liés à l'apprentissage, d'autre part l'interaction systématique des tâches principales et secondaires au niveau de la prise d'information ; nous négligeons donc dans l'élaboration de notre modèle ces deux aspects du problème.

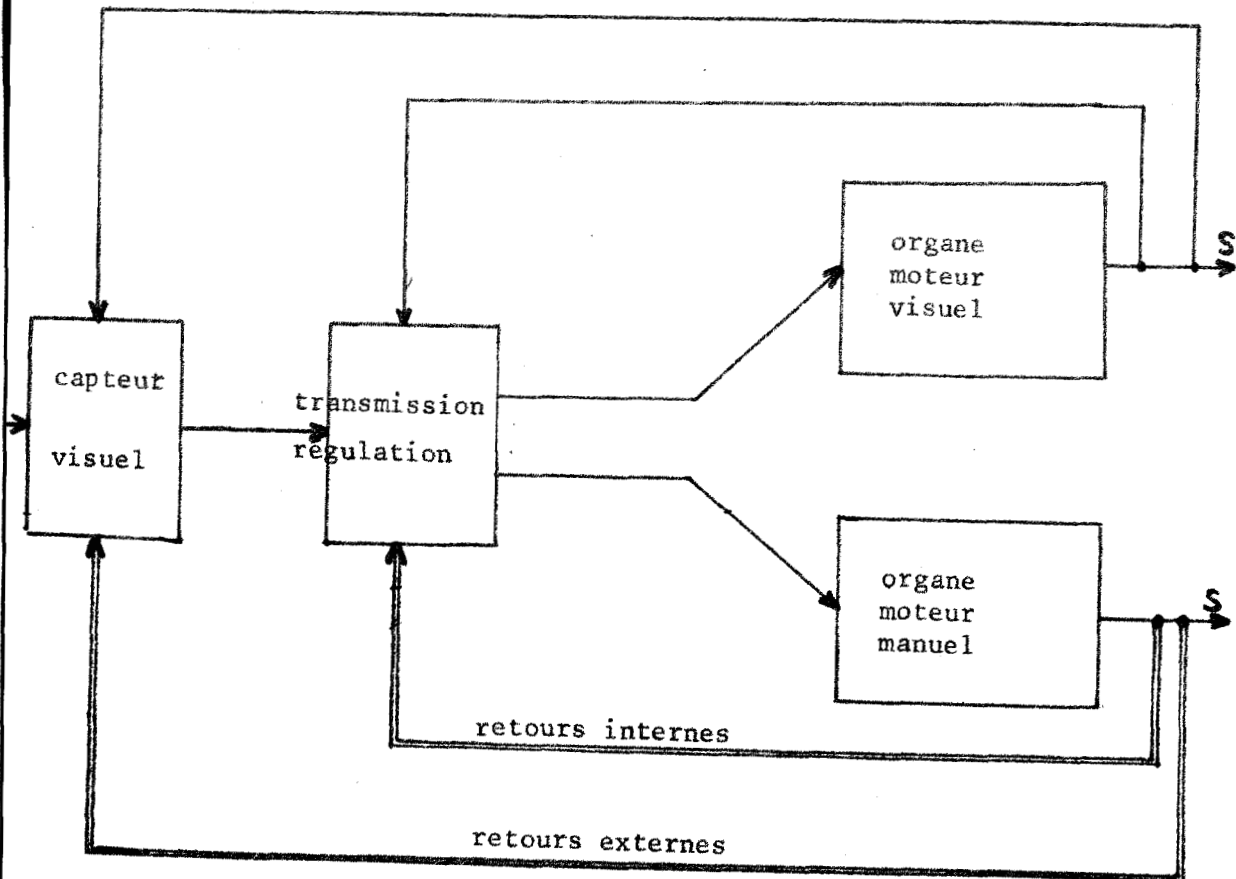


Fig. IV₁ : Elaboration d'un modèle

Nous avons deux sous systèmes indépendants du point de vue de la prise d'information mais qui réagissent l'un sur l'autre au niveau de la transmission.

D'autre part dans un souci de cohérence du modèle, les blocs capteurs visuels et transmission de l'information doivent être de structure identique pour les deux sous systèmes. C'est pourquoi nous exposons tout d'abord ce que nous entendons par capteur visuel et transmission de l'information.

Les paragraphes suivants de ce chapitre portent sur l'identification de la structure des organes effecteurs simulés et des liaisons existant entre les différents blocs.

IV₂ - LE CAPTEUR VISUEL

Le modèle du capteur visuel doit satisfaire aux impératifs suivants:

- a) Identité de structure pour les deux sous systèmes.
- b) Traitement simultané de deux informations l'une spatiale (θ) et l'autre énergétique (L).
- c) Codage différent pour ces deux informations : l'information spatiale est discrète et imprécise, l'information énergétique est continue entre le seuil d'excitation et la saturation de la fibre nerveuse et doit tenir compte à la fois de la luminosité et du temps d'exposition du stimulus sur une unité réceptrice.
- d) Juxtaposition des zones réceptrices indépendantes dont la largeur croît avec l'excentricité de la zone considérée vis à vis de la fovéa.
- e) Existence d'une sommation temporelle et spatiale au niveau de chaque zone réceptrice.

A. Codage énergétique

Nous envisageons tout d'abord un champ récepteur excité par un stimulus de luminosité L . Nous ne tenons pas compte de la localisation de cette unité réceptrice et donc de l'information spatiale contenue dans le stimulus. D'après les impératifs (c) et (e) nous pouvons schématiser le processus de codage énergétique comme l'indique la figure IV_2 . L'entrée est la luminosité du spot cible (correspondant dans nos conditions expérimentales à un échelon - allumage et extinction du spot) et la sortie la fréquence des "spikes" sur la fibre nerveuse, support de l'information énergétique I_E transmise aux centres nerveux. Pour des raisons matérielles de simulation la fréquence est donnée par l'amplitude du signal de sortie.

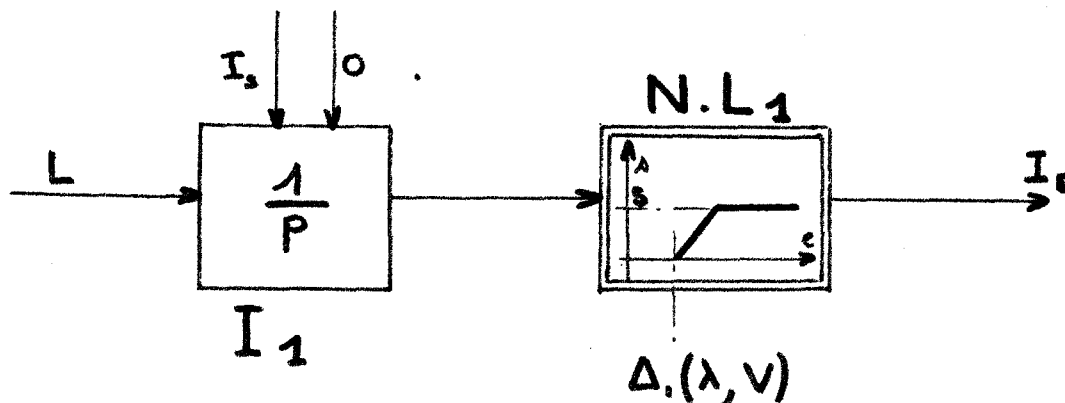


Fig. IV_2 : Schéma bloc du codage énergétique au niveau d'un champ récepteur (cellule ganglionnaire).

La composante énergétique est intégrée (intégration temporelle) puis le signal est soumis à la non linéarité NL_1 qui simule les seuils d'excitation Δ_1 et de saturation S de la fibre nerveuse. La saturation ne dépend que de la fibre nerveuse elle-même. Par contre il est normal d'envisager une influence sur le seuil d'excitation du temps d'impact de la lumière sur la rétine, nous y reviendrons dans le chapitre suivant.

De même ce seuil est vraisemblablement sensible à la longueur d'onde de la lumière émise par le stimulus (notion d'efficacité lumineuse fig. IV₃). Ce paramètre toutefois n'intervient pas dans le cadre expérimental que nous nous sommes fixé.

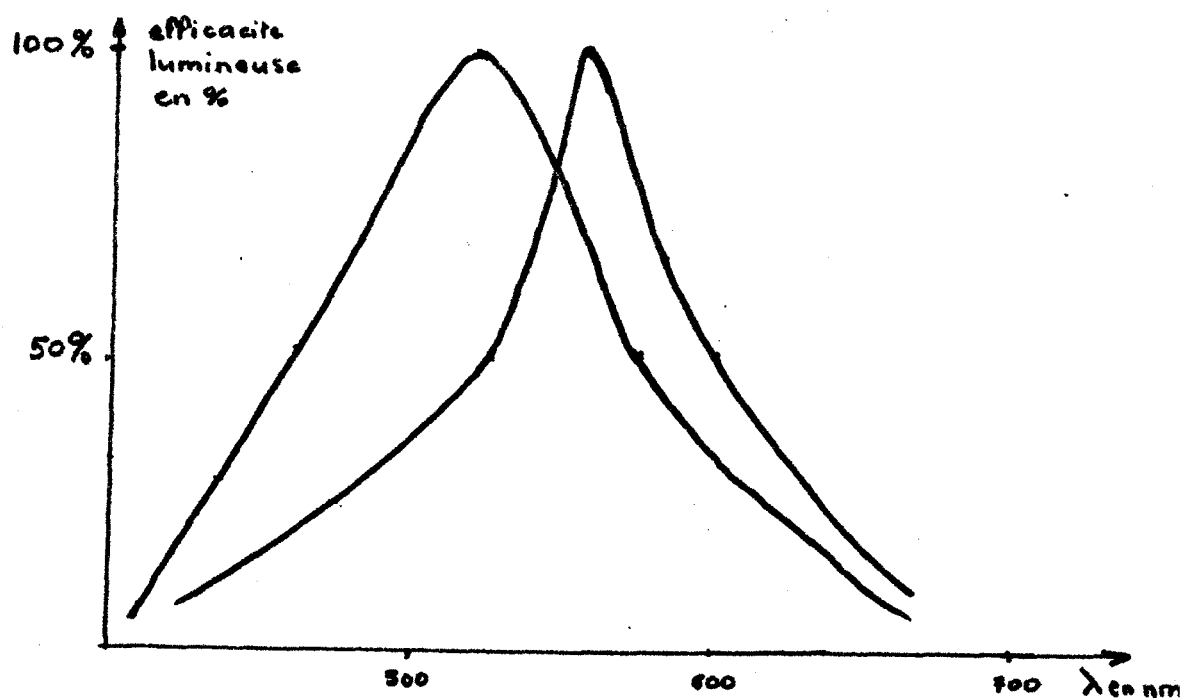


Fig. IV₃ : Courbe d'efficacité lumineuse (10)
de l'observateur moyen de la C.E.E.
I : Vision nocturne
II : Vision diurne

Nous n'avons pas considéré non plus dans ce modèle les effets d'illumination prolongée (adaptation) ou très intense (éblouissements, after effect*).

* After effect : existence d'une sensation inversée (négatif) après l'arrêt d'une stimulation intense.

B. Codage spatial

Il nous reste alors à élucider le problème de la commande de l'intégrateur I_1 (fig. IV₂) à partir de la localisation spatiale de la cible θ . La difficulté de la modélisation de ce processus réside ici dans le fait que le support de l'information spatiale est la localisation de la (ou des) fibre(s) nerveuse(s) excitée(s) dans le faisceau de fibres. Ceci nécessite une répartition spatiale en mosaïque des éléments précédemment décrits, ce qui est impossible à réaliser en simulation. Pour une simplification de l'étude, nous nous placerons seulement sur une section plane de la rétine car dans notre protocole expérimental les stimuli sont animés de mouvements soit horizontaux (tâche secondaire) soit verticaux (tâche principale).

Le codage spatial entraîne donc la génération d'une impulsion de commande de l'intégrateur I_1 pendant tout l'intervalle de temps où le spot-cible reste dans une même unité réceptrice, soit lorsque :

$$\theta_{I_i} \leq \theta \leq \theta_{S_i}$$

La localisation du champ récepteur proprement dit est alors réalisé par l'échantillonnage et le blocage de l'information d'entrée continue θ partir de l'information I_E ainsi générée (fig. IV₆). Cependant la nécessité de discriminer deux signaux I_E lors d'un changement de champ récepteur entre $\theta_{S_{i-1}}$ et θ_{I_i} et entre θ_{S_i} et $\theta_{I_{i+1}}$ nous oblige à envisager une "zone morte" permettant une remise à zéro de l'intégrateur. Ceci est d'ailleurs compatible avec la structure centrée des champs récepteurs (fig. IV₄) telle que la décrivent les physiologistes (10).

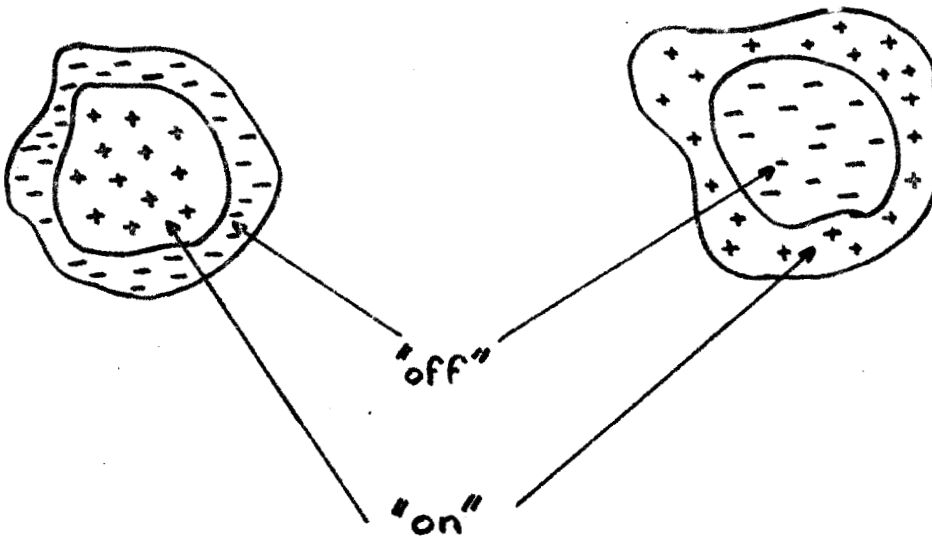


Fig. IV₄ : Structure centrée des champs récepteurs rétiniens

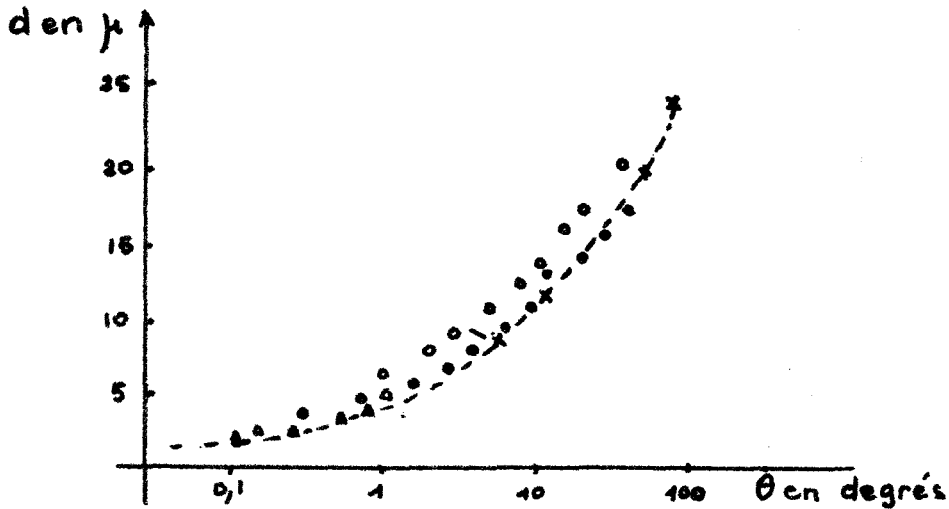
Réponse off : émission d'un signal à l'extinction du stimulus

Réponse on : émission d'un signal à l'apparition du stimulus

De plus le diamètre moyen des unités réceptrices est une fonction de l'écart du centre de ce champ récepteur à celui de la fovéa considérée comme référence de localisation. Cette fonction $g(\theta)$ nous est donnée par les résultats de POLYACK (fig. IV₅),

on a :

$$g\left(\frac{\theta_{Si} + \theta_{Ii}}{2}\right) = \theta_{Si} - \theta_{Ii} \quad (IV 1)$$



Résultats obtenus par \blacktriangle Rochon-Duvigneaud
 \bullet Osterberg
 \bullet Polyak
Courbe $-x-$ représentative de $g(\theta)$

Fig. IV₅ : Distance moyenne entre les cônes en fonction de l'excentricité (échelle semi-logarithmique)

Si l'on accepte l'hypothèse de BOUMAN selon laquelle un champ récepteur se compose de batonnets groupés autour des cônes (structure centrée) la courbe de la figure IV₅ donne une relation entre le diamètre du champ récepteur et l'écart de son centre par rapport à la fovéa. En effet cette courbe eput être identifiée par :

$$g(\theta) = 2 + 2,3\sqrt{\theta} = d \quad (\text{IV } 2)$$

en pointillés sur la figure IV₅ avec d en microns et θ en degrés.

Nous avons finalement défini un modulateur d'un type spécial émettant une impulsion calibrée pendant tout le temps où θ appartient à l'intervalle compris entre deux seuils prédéterminés dépendant de θ . Ceci correspond sur le schéma de la figure IV₆ au bloc Z

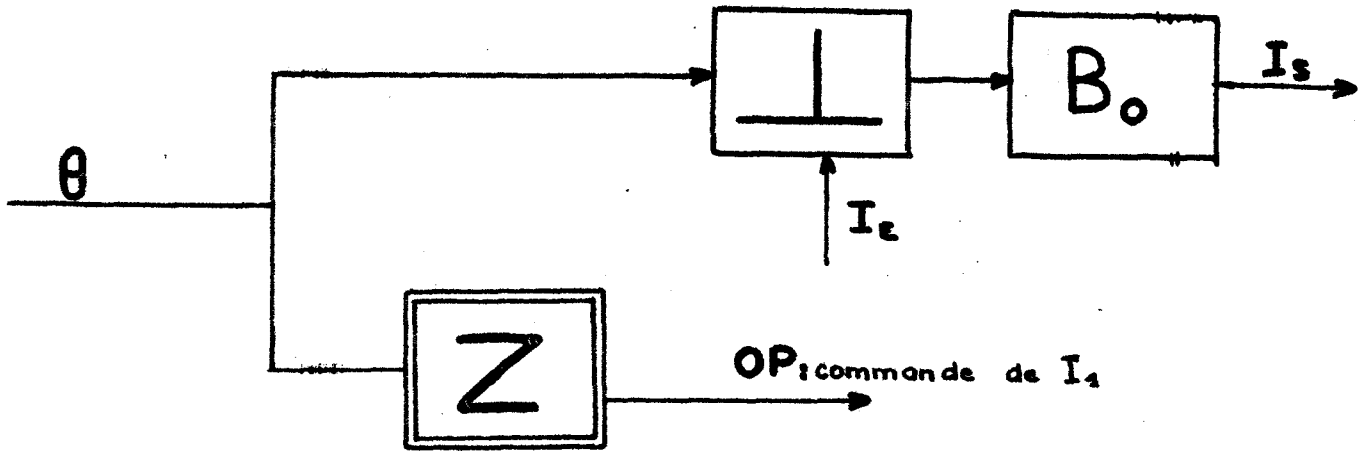


Fig. IV₆ : Schéma bloc du processus de codage spatial

Cet élément peut être simulé en première approximation par un P.F.M. dont le seuil de déclenchement Δ_2 est assujéti à θ de façon à avoir par exemple le temps séparant deux sauts du P.F.M. égal à $t = \frac{\mathfrak{F}(\theta)}{|V|}$.

En effet dans nos conditions expérimentales et pour la tâche secondaire le mouvement de la cible est rectiligne uniforme de vitesse V .

Ceci apparait sur la figure IV₇ qui montre un dispositif de commande du codage énergétique lié à la structure discrète de la rétine et une prise d'information spatiale commandée par l'information énergétique conformément aux impératifs précédemment fixés.

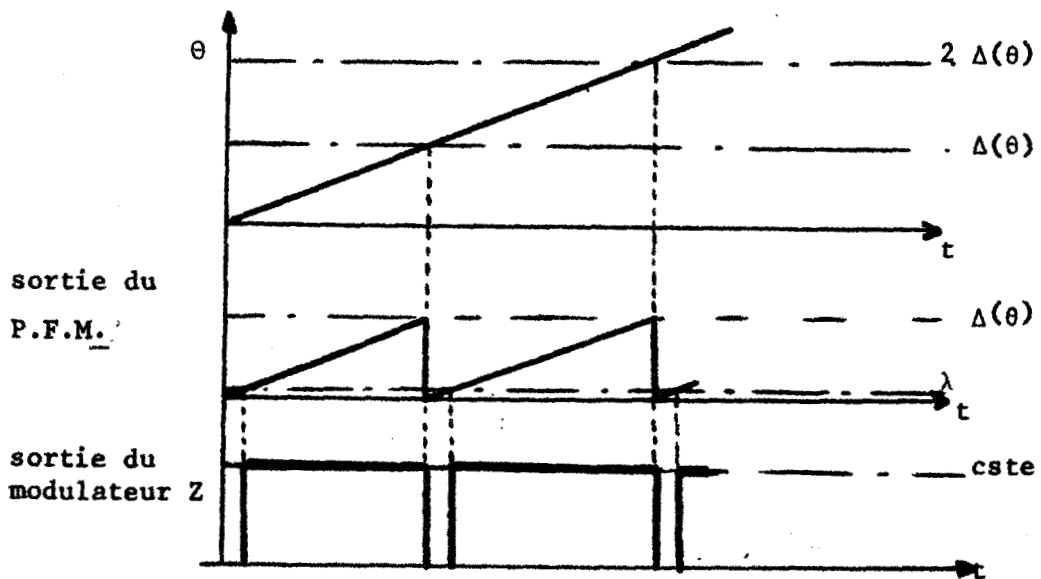
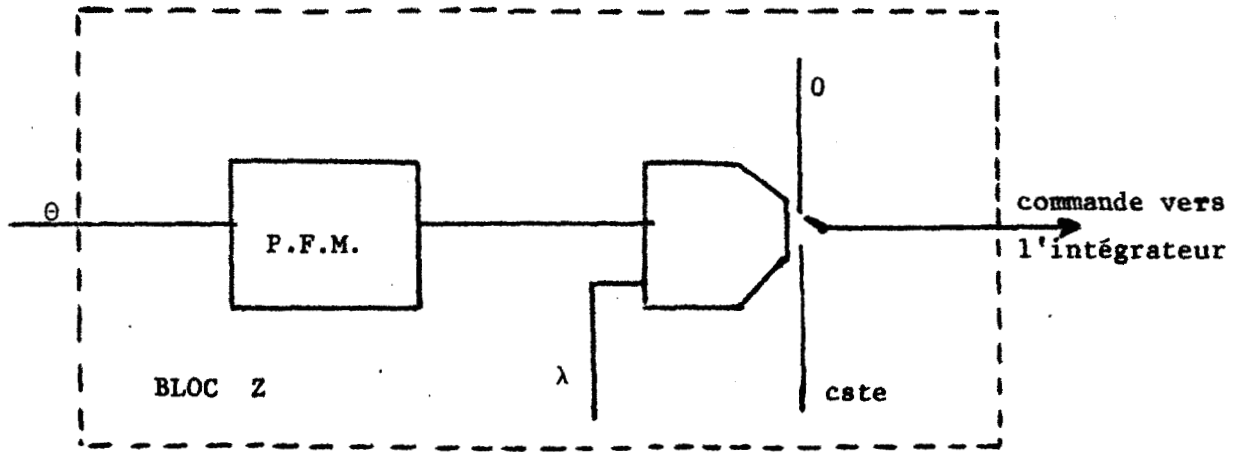


Figure IV - Schéma de simulation du bloc Z dans nos conditions expérimentales et diagramme des temps.

C. Schéma global du capteur visuel : figure IV₈

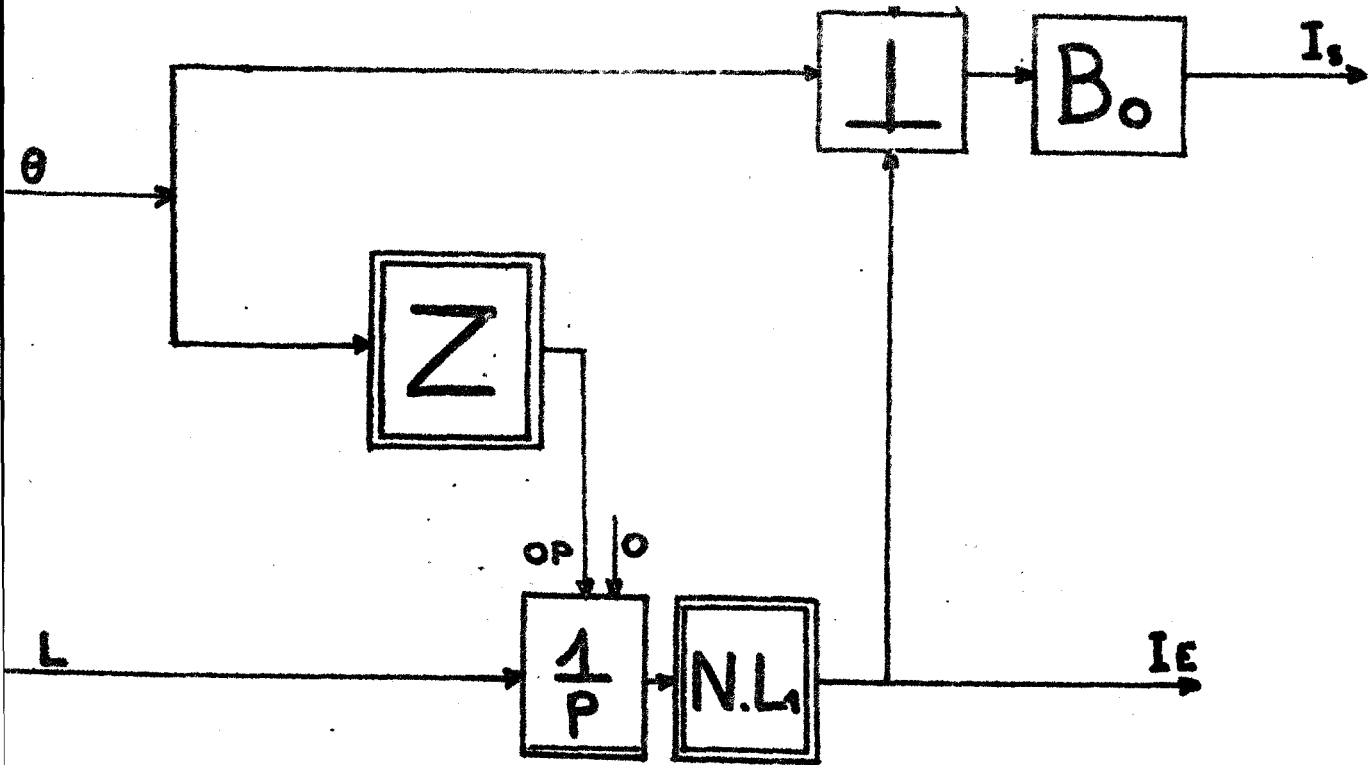


Fig. IV₈ : Schéma global du capteur visuel

Pour un champ récepteur i défini par l'information spatiale I_s est donnée par :

$$I_s = \theta_{Ii} + \epsilon_i \quad (IV 3)$$

$$\text{où } \epsilon_i \leq \theta_{Si} - \theta_{Ii} \quad (IV 4)$$

$$\text{et } \theta_{Si} - \theta_{Ii} = g\left(\frac{\theta_{Si} + \theta_{Ii}}{2}\right) \quad (IV 1)$$

Cette dernière quantité correspond à l'imprécision maximale liée au champ récepteur et par là caractérise le canal de transmission de l'information. Si nous appelons $t_{\theta_{Si}}$ et $t_{\theta_{Ii}}$ les instants de sortie et de pénétration de ce champ récepteur, l'information énergétique I_E entre les limites de la non linéarité N.L.₁ est alors :

$$I_E = \int_{t_{\theta_{Ii}}}^{t_{\theta_{Si}}} L dt \quad (IV 5)$$



Soit encore pour la tâche secondaire où le spot cible est animé d'un mouvement rectiligne uniforme :

$$I_E = L \frac{\theta_{Si} - \theta_{Ii}}{|V|} = \frac{L}{|V|} \operatorname{sgn}\left(\frac{\theta_{Si} + \theta_{Ii}}{2}\right) \quad (IV 6)$$

IV₃- LA TRANSMISSION

Le bloc de transmission représenté par la figure IV₉ doit comporter un retard pur éventuellement variable (nous déterminerons sa valeur au chapitre suivant) et une possibilité de non transmission de l'information (non action ou retour d'appui du pouce).

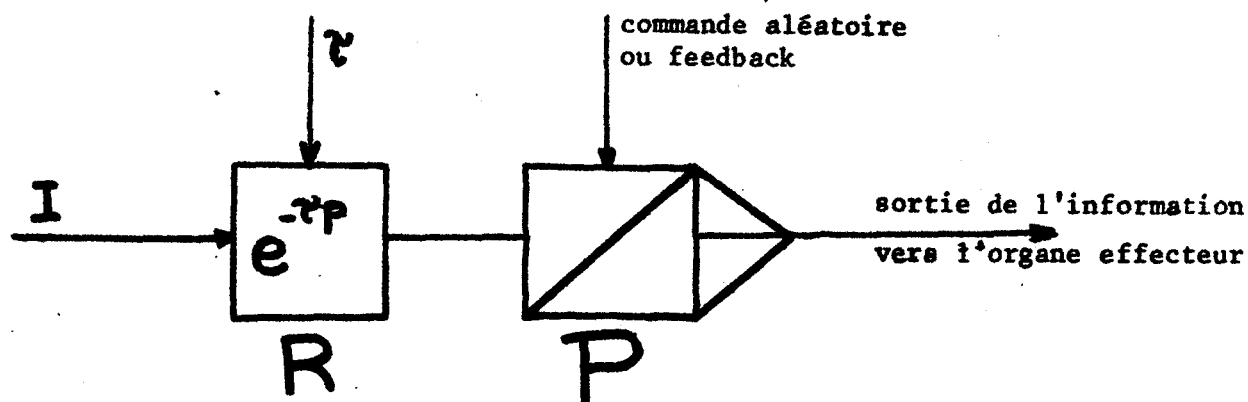


Fig. IV₉ : Le bloc T de transmission

L'information à transmettre I est ici suivant le cas l'information spatiale (tâche de poursuite) ou l'information énergétique (appui du pouce). Elle subit un retard pur variable dans le bloc R, puis passe dans le bloc P qui transmet normalement l'information (organe suiveur) ou qui l'arrête pendant un certain temps (organe bloqueur). Cette fonction est réalisée sur calculatrice hybride par une mémoire paire (Track store). La commande de blocage est aléatoire avec une probabilité d'action corrélée au retard comme nous l'avons montré au chapitre précédent. Précisons toutefois que ce blocage peut aussi provenir directement des centres supérieurs, par exemple après un appui du pouce les informations successives provenant du capteur d'information à partir d'un même stimulus (passage possible sur des zones contigües de la rétine) ne doivent plus déclencher d'appui. Il en est de même lors d'un test de poursuite en vision extra fovéale où il est demandé au sujet de ne pas bouger les yeux.

IV₄ - MODELE DE LA TACHE SECONDAIRE (fig. IV₁₀)

A partir du schéma global du comportement visuo-moteur élaboré dans les précédents paragraphes, le modèle de la tâche secondaire concerne la mise en forme de l'information énergétique et le retour somesthésique (appui du pouce) inhibant la transmission de l'information. Rappelons que les conditions expérimentales nous permettent de négliger la réaction oculo-motrice.

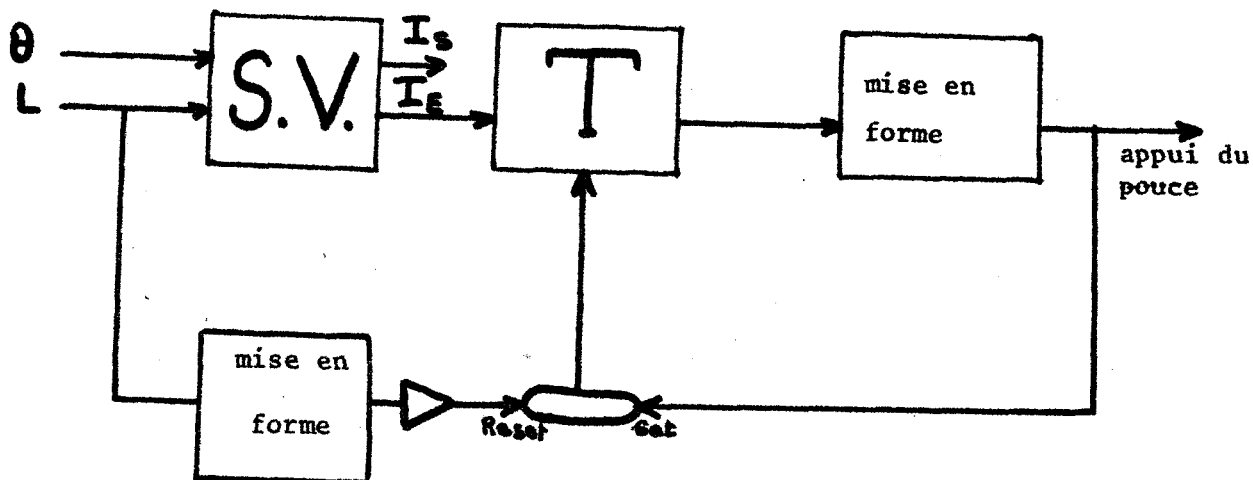


Fig. IV₁₀ : Modèle de la tâche secondaire

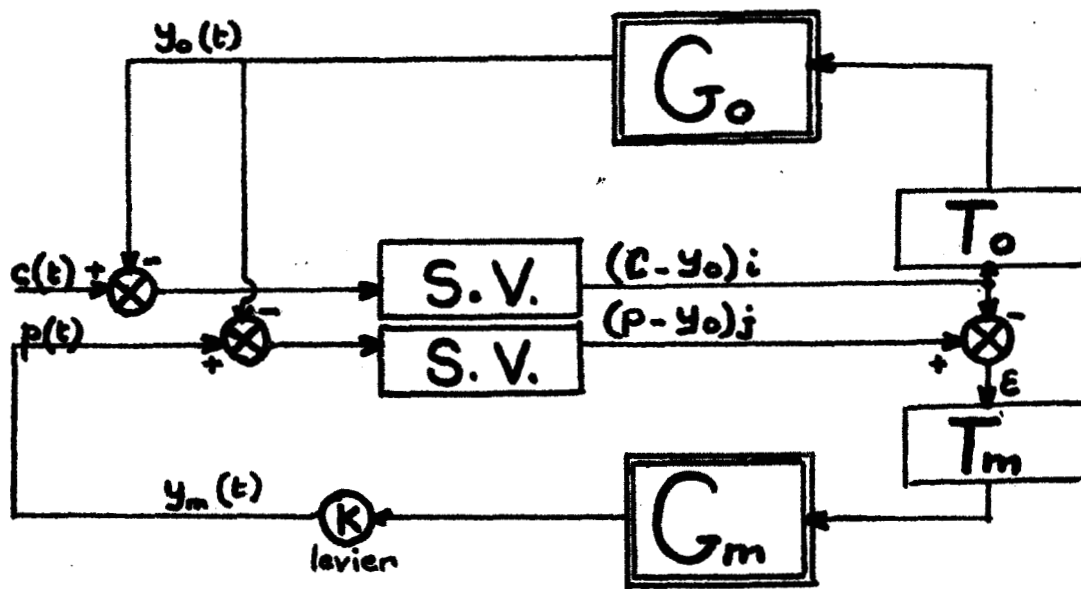
L'information transmise par le bloc T est mise en forme par une bascule monostable dont la sortie représente l'impulsion issue du bouton poussoir. Ce signal est d'autre part confronté au signal d'entrée par l'intermédiaire d'une bascule bistable pour la commande du track store P du bloc T (§IV₃)

Remarquons à ce sujet le paradoxe apparent de la combinaison dans le modèle d'une information extérieure et d'une information intérieure (retour kinesthésique de la main). C'est là l'effet de la continuité des perceptions visuelles malgré la transmission aux centres nerveux de messages discontinus, phénomène que l'on retrouve par exemple dans l'illusion cinématographique.

IV₅- MODELE DE LA POURSUITE MANUELLE (fig. IV₁₁)

Le modèle de la figure IV₁₁ tient compte des deux spots significatifs dans cette tâche et de la génération de l'erreur entre les deux stimulus à partir des informations issues de la rétine...

Enfin il doit tenir compte des mouvements oculaires. Sur le schéma bloc de la figure IV₁₁ ne sont représentées que les informations spatiales, l'information énergétique n'intervenant que dans le calcul des retards et des probabilités d'action. Le stimulus cible est symbolisé par $c(t)$ et le stimulus poursuiveur par $p(t)$.



$c(t)$: stimulus cible

$p(t)$: stimulus suiveur

$y_o(t), y_m(t)$: mouvements oculaires et manuels

G_o, G_m : transmittance des organes effecteurs oculaires et manuels

T_o, T_m : blocs de transmission oculaire et manuel

$(c-y_o)_i$: information discontinue transmise par l'oeil relative au stimulus cible sur la zone i

$(p-y_o)_j$: information transmise relative au stimulus poursuiveur sur la zone j

K : sensibilité du manche à balai.

Fig. IV₁₁: Modèle de la poursuite manuelle et visuelle.

Les informations extérieures $p(t)$ et $c(t)$ sont estimées par la rétine relativement à une origine mobile $y_0(t)$ qui est le centre de la fovéa pris comme référence. Ces valeurs relatives $p(t) - y_0(t)$ et $c(t) - y_0(t)$ sont traitées par le capteur visuel S.V. tel que

$$\text{si } p(t_{\theta_{Sj}}) - y_0(t_{\theta_{Sj}}) = \theta_{Sj} \quad (\text{IV } 7)$$

$$p(t_{\theta_{Ij}}) - y_0(t_{\theta_{Ij}}) = \theta_{Ij} \quad (\text{IV } 8)$$

$$(p - y_0)_j = \theta_{Ij} + \epsilon_j \quad \text{avec } \theta_{Sj} - \theta_{Ij} > \epsilon_j > 0 \quad (\text{IV } 9)$$

entre les instants $t_{\theta_{Sj}}$ et $t_{\theta_{Ij}}$.

$$\text{De même } (c - y_0)_i = \theta_{Ii} + \epsilon_i \quad \text{avec } \theta_{Si} - \theta_{Ii} > \epsilon_i > 0 \quad (\text{IV } 10)$$

entre les instants $t_{\theta_{Si}}$ et $t_{\theta_{Ii}}$.

Cette information est transmise d'une part à l'effecteur oculaire de transmittance $G_0(P)$ par l'organe de transmission T_0 . Etant donné le caractère automatique du mouvement oculaire de poursuite, nous admettons que la probabilité de passage de l'information est ici très voisine de 1 et que le retard R est constant. Nous sommes en effet, du point de vue des liaisons sensori-motrices, dans le cas particulier de région fovéale où la transmission est très peu bruitée. Cette simplification donne des résultats satisfaisants.

L'information sur la position de la cible $(c-y_0)_i$ est d'autre part comparée à l'information sur la position du poursuiveur $(p-y_0)_j$ pour donner l'erreur $\xi(t)$, essentiellement discontinue. Cette "erreur" relative est transmise aux organes effecteurs manuels $G_m(p)$ par l'intermédiaire du bloc de transmission T_m . Les paramètres de ce bloc, R_m retard manuel et P_m probabilité de passage de l'information sont corrélés à ceux du bloc T de la tâche secondaire (chap. VI).

Ce modèle permet d'inclure les mouvements oculaires nystagmiques car l'existence d'un seuil autour de l'origine entraîne une oscillation limite pour l'oeil autour de cette position. Il peut également s'appliquer aux expériences de tracking extra-fovéal où l'oeil est immobile dans la position 0 ($y_0(t)=0$) (le track store du bloc T_0 est bloqué) et où le signal excitant l'effecteur manuel est d'autant plus imprécis que le signal $c(t)$ est grand de par la structure du capteur visuel.

Cette façon d'envisager la fonction visuo-motrice met en avant le rôle privilégié d'une zone de la rétine que nous avons placé, faute de connaissances plus précises, au centre de la fovéa. Celle-ci sert ainsi de référence aux informations transitant par le système visuel. Ce modèle

fait ressortir le caractère relatif de l'information transmise aux centres supérieurs permettant ainsi une approche plus réaliste des problèmes liés à l'intégration corticale des messages spatiaux (stabilité de l'espace perceptif, acuité visuelle etc...). Cependant d'un point de vue cybernétique, ce modèle pose un problème délicat au niveau de la discrimination entre les points cible et suiveur pour le mouvement de l'oeil (informations arrivant sur le bloc Go). Il aurait fallu envisager un schéma strictement symétrique en ce qui concerne le transfert de l'information vis à vis des organes effecteurs Go et Gm. Ceci expliquerait les moments d'indécision du sujet lorsque les spots se recouvrent au cours de la poursuite (fig. IV₁₂).

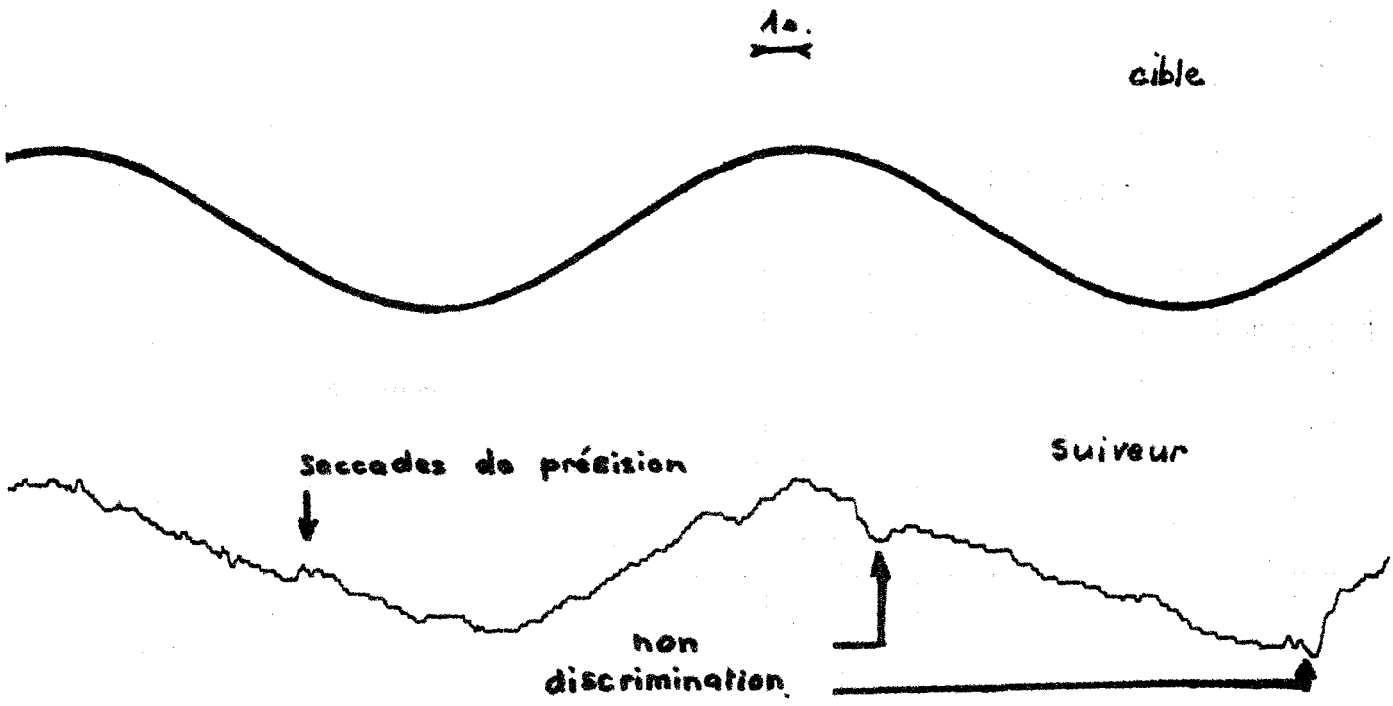


Fig. IV₁₂ : Tracé montrant la réponse manuelle et les instants où le sujet ne sait plus discriminer le signal cible du signal poursuiveur.

En réalité ce fait intervient dans nos expériences comme un facteur d'erreur "aléatoire" sur la tâche principale. Il est donc pris en compte dans le calcul de la probabilité de transmission du message. Il n'intervient pas en cours d'identification puisque pour celle-ci nous nous sommes appuyés sur d'autres résultats de poursuite déjà publiés où les signaux cible et suiveur étaient distincts par leur couleur.

IV₆- CONCLUSIONS

Les modèles proposés dans ce chapitre pour les deux sous systèmes permettent donc de décrire un certain nombre de propriétés essentielles du comportement de l'opérateur humain effectuant certaines tâches. Tout d'abord l'information transmise par la rétine est double (énergétique et spatiale) et échantillonnée. Cet échantillonnage dépend de l'amplitude et de la vitesse du stimulus. Nous rejoignons par là les modèles précédemment élaborés par d'autres auteurs. L'information spatiale est essentiellement relative ; la référence étant le centre de la fovéa et est d'autant plus imprécise qu'on s'éloigne de cette origine. Enfin ce modèle permet d'ajouter une dimension probabiliste aux structures de transfert de l'information que nous proposons

Cependant nous n'avons pas abordé dans ce chapitre un point important qui porte sur les variations des retards et des temps de réaction. Nous allons y consacrer la suite de ce travail en nous appuyant sur les notions de théorie de l'information et de structure hiérarchisée.

CHAPITRE V

IDENTIFICATION MATHÉMATIQUE

DE LA

VARIATION DES TEMPS DE RÉACTION

Le modèle du chapitre précédent a permis de mettre en évidence certaines propriétés fonctionnelles de la liaison sensori-motrice. Nous avons en particulier mis en valeur l'existence d'un retard variable et d'une probabilité de passage de l'information corrélée à ce retard. Il nous faut maintenant, à partir des hypothèses adoptées, tenter d'élucider le mode de variation des temps de réaction. Nous donnons tout d'abord un modèle global de la transmission des informations visuo-motrices puis nous tentons d'exprimer mathématiquement la variation du temps de réaction en fonction des caractéristiques physiques (luminosité, vitesse) de la cible à détecter. Nous n'utilisons pas une étude polynomiale des courbes obtenues expérimentalement mais une approche analytique à partir de la théorie de l'information et des résultats du chapitre précédent. Cette présentation du phénomène nous est suggérée par les travaux de FITTS puis de WELFORD sur la notion de difficulté de tâche de travail. L'identification polynomiale des courbes, certes plus simple, n'est en effet pas compatible avec la volonté que nous avons de cerner au plus près la réalité physiologique. Enfin la dernière partie de ce chapitre porte sur la comparaison des propriétés de la fonction obtenue et des résultats expérimentaux. Un ajustement numérique très fastidieux de la formule trouvée, n'apporte rien étant donné la multiplicité des paramètres.

V₁ - ESTIMATION ANALYTIQUE DU TEMPS DE REACTION

V_{1.1} - Schéma global (fig. V₁)

La voie visuo-motrice, lors d'un acte déterminé peut être considérée comme une prise d'information extérieure au niveau de l'oeil suivie d'un codage et d'un transfert de l'information sur les voies optiques vers les centres de traitement. Le message doit alors être de nouveau détecté (Aire 17 de Brodemann), puis transcodé en termes moteurs (Aires 18 - 19, cortex associatif et cortex moteur) pour enfin être transféré vers les effecteurs (activité musculaire). Lors d'une double tâche et en accord avec les données physiologiques, nous pouvons donc schématiser le système visuo-moteur comme sur la figure V₁ :

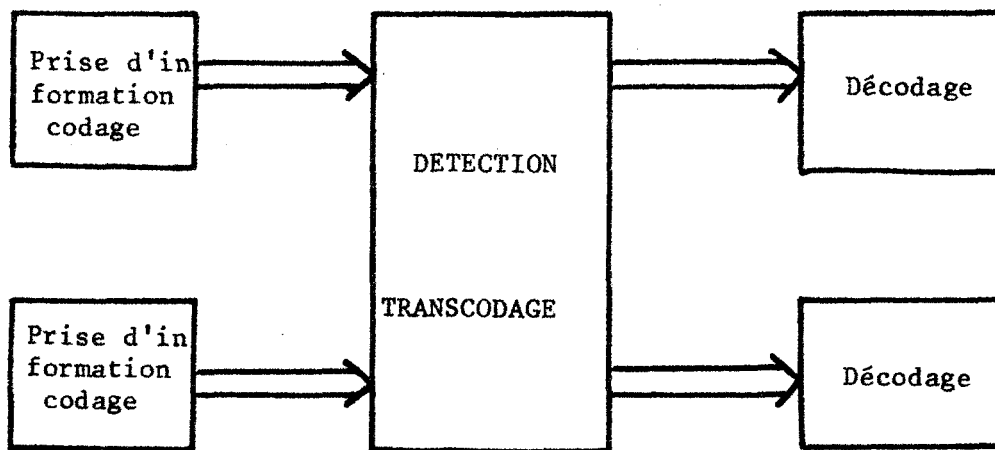


Fig. V₁ : Schéma global du transfert d'information dans la voie visuo-motrice pour une double tâche.

Le bloc unique de transcodage rend compte de l'hypothèse, avancée par les psychologues, de canal unique de transfert des informations.

Dans le canal optique le temps de transfert dépend exclusivement des caractéristiques physiques de la cible. Le temps de transfert dans le canal moteur ne doit pas varier de façon essentielle puisque les actes demandés sont toujours les mêmes. Cependant la détection et le traitement du signal issu du canal optique au niveau des centres nerveux sont influencés par la présence de deux tâches et par le bruit global de l'organe de détection et de transcodage. Le temps de réaction global est donc la somme d'un temps de prise d'information optique t_I qui apparaît dans le modèle de capteur visuel du chapitre précédent, un temps t_{II} de transfert optique, un temps t_{III} de détection "centrale" et un temps t_{IV} de transfert moteur.

$$\text{Soit : } t_R = t_I + t_{II} + t_{III} + t_{IV} \quad (V 1)$$

V_{1.2} - Le canal optique

Le temps de transfert peut être en première approximation interprété comme le rapport de la quantité d'information à véhiculer sur la capacité maximale du canal par lequel elle doit transiter.

Or nous avons vu dans les chapitres précédents que, pour une localisation déterminée de la cible, la voie optique pouvait être considérée comme linéaire continu à puissance limitée. La capacité d'un tel canal est donnée par la théorie de l'information.

$$C_{\text{bits/s}} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{S}{B} \right) \quad (V 2)$$

S étant la puissance maximale du signal et

B la puissance moyenne du bruit du canal supposé gaussien.

Ceci revient à dire que la puissance maximale est une fonction du seuil de saturation S défini au paragraphe IV₂. Le bruit est lié au canal et donc à la localisation. Il est lié à l'excentricité θ de l'impact de la cible par rapport à la fovéa. Soit $f(\theta)$ sa puissance moyenne, la formule V 2 s'écrit finalement.

D'où l'expression de la capacité du canal que nous retiendrons

$$C_{\text{bits/s}} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{S^2}{f(\theta)} \right) \quad (V 3)$$

Il reste à estimer la quantité d'information à faire transiter. Elle est d'ordre énergétique, et vraisemblablement liée à la difficulté de la tâche, c'est-à-dire au rapport $\frac{S}{I_E}$, I_E est l'information énergétique issue de la rétine définie au paragraphe IV₂

$$I_E = \frac{g(\theta) \cdot L}{|V|} \quad (V 4)$$

Pour respecter l'homogénéité des formules et par analogie avec la formule de FITTS, nous prenons l'écriture :

$$Q_{\text{bits}} = A \log_2 \left(1 + \frac{S}{I_E} \right) \quad (V 5)$$

A étant une constante à déterminer

D'où la formulation du temps t_{II}

$$t_{II_s} = A' \frac{\log 2 \left(1 + \frac{S}{I_E} \right)}{\log 2 \left(1 + \frac{S^2}{f(\theta)} \right)} \quad (V.6)$$

soit encore :

$$t_{II_s} = A' \frac{\log \left(1 + \frac{S}{I_E} \right)}{\log \left(1 + \frac{S^2}{f(\theta)} \right)} \quad (V.7)$$

V_{1.3} - Transfert central

Des raisons anatomo-physiologiques font qu'à ce niveau la charge principale de travail intervient sur les temps de réaction à la tâche secondaire. Et si notre étude a négligé l'influence de la tâche secondaire sur la tâche principale, il est logique de penser qu'elle existe cependant. Il faudrait faire intervenir là des notions de priorités que nous ne pourrions approfondir faute de résultats expérimentaux.

D'autre part en ce qui concerne l'information, l'opération réalisée à ce niveau est un transcodage, ce qui nécessite une détection du signal. Nous liions donc le temps de transfert à ce niveau ainsi que la probabilité de transmission de l'information à la notion de rapport signal sur bruit.

Le signal est ici le signal rétinien à transcoder en termes moteurs, le bruit étant le bruit global des centres résultant de la somme des bruits : du canal optique, de la tâche principale et de l'activité permanente du cerveau.

$$\text{Soit } B = a f(\theta) + b h(C_p) + A \quad (\text{V } 8)$$

a et b étant des indices de priorités

f(θ) est la puissance moyenne du bruit du canal optique déjà utilisé dans l'équation V 2

h(C_p) est celle du bruit impliqué par la tâche principale

A représentant alors le bruit de fond global des centres nerveux.

Le passage de l'information est lié lui aussi au rapport signal sur bruit, en effet s'il est trop faible, la détection devient impossible, c'est le cas de "non réponse" du sujet.

V₂- IDENTIFICATION MATHEMATIQUE

La tâche principale n'intervenant sur les temps de réaction que pour expliquer la dispersion des résultats, nous pouvons tenter d'ajuster la relation mathématique (V 9) donnant l'expression de t_r en fonction des caractéristiques de la charge secondaire

$$t_r = \frac{\Delta}{L} + A \frac{\text{Log } 1 + \frac{S}{I_E}}{\text{Log } 1 + \frac{S^2}{f(\theta)}} + B \quad (V.9)$$

On reconnaît dans cette formule le temps t_{II} de transfert optique (équation V 2), A et B étant des constantes. L'expression du temps t_I de prise d'information n'est homogène que si le seuil Δ est une fonction inverse de la vitesse. Ceci est compatible avec les données de la physiologie. En effet, si jusqu'ici nous avons exclusivement tenu compte de l'intégration spatiale et temporelle au niveau de la totalité du champ récepteur, elle existe cependant déjà au niveau de chaque cône ou batonnet de la rétine, d'où l'expression finale du temps de réaction :

$$t_r = \frac{\Delta a}{L|V|} + A \frac{\text{Log } 1 + \frac{S}{I_E}}{\text{Log } 1 + \frac{S^2}{f(\theta)}} + B \quad (V.10)$$

avec $I_E = \frac{g(\theta)L}{|V|}$

- a : constante ayant les dimensions d'une longueur représentant le diamètre moyen de l'aire réceptrice d'un cône ou d'un batonnet
- Δ : seuil d'excitabilité de la fibre nerveuse
- S : seuil de saturation de la fibre nerveuse
- L : luminosité du spot cible
- θ : excentricité du spot cible par rapport à la fovéa
- |V| : valeur absolue de la vitesse de déplacement du spot cible.

Enfin nous avons pris arbitrairement $(g(\theta))^2 = f(\theta)$ puisque la surface du champ récepteur pouvait être un indice de l'imprécision de l'information et donc du bruit sur le canal.

V₃- ETUDE ANALYTIQUE

Pour l'étude analytique de la formule (V 10) rappelons brièvement les principales caractéristiques des courbes obtenues expérimentalement.

La fonction n'est pas définie pour V = 0 , ce qui est en accord avec les résultats expérimentaux du chapitre III.

V_{3.1}- La variation du temps de réaction en fonction de la luminosité de la cible se caractérise par une asymptote à l'axe des Y lorsque la luminosité tend vers 0 et une asymptote parallèle à l'axe des X lorsque la luminosité tend vers l'infini avec une concavité positive unique.

Tous les autres paramètres (V,θ) étant constants, la formule (V 11) s'écrit :

$$t = \frac{C}{L} + A \frac{\text{Log } 1 + \frac{D}{L}}{E} + B \quad (\text{V.11})$$

C, D, E étant alors des constantes.

Cette équation est bien représentative de la courbe expérimentale.

Remarque : Lors de cette étude, nous serons amené à parler d'infini, de branche infinie, d'asymptote, il est bien entendu qu'ils'agit alors d'une extrapolation mathématique des courbes obtenues expérimentalement et que pour cette étude nous ne faisons pas intervenir les limitations et seuils inhérents aux systèmes vivants.

V_{3.2}- L'influence de la vitesse V de la cible est caractérisée tout d'abord par une dissymétrie par rapport à l'axe vertical ; nous n'étudions pour notre part que l'influence des vitesses positives, en effet nous avons montré au chapitre IV qu'il devait exister des informations sur le sens du mouvement (signe de la vitesse) qui peuvent modifier les constantes de la fonction étudiée mais non les caractéristiques fondamentales : existence d'un minimum et d'une branche infinie.

La luminosité L et l'excentricité θ étant constantes, l'expression (V 10) devient :

$$t = \frac{F}{|V|} + A \frac{\text{Log } 1 + GV}{E} + B \quad (\text{V.12})$$

E, F, G sont des constantes.

Lorsque V prend de grandes valeurs, t prend lui aussi de grandes valeurs.

D'autre part la dérivée $\frac{dt}{dV}$ admet un zéro positif

V_{3.3}- Enfin les variations du temps de réaction en fonction de l'excentricité peuvent être caractérisées par une branche infinie et une valeur finie pour $\theta = 0$. De plus il n'existe pas de minimum dans la région des θ positifs.

La fonction à étudier est alors :

$$t = H + A \frac{\text{Log } 1 + \frac{J}{g(\theta)}}{\text{Log } 1 + \frac{S^2}{g^2(\theta)}} + B \quad (\text{V.13})$$

où H et J sont des constantes.

Cette fonction a bien une valeur finie pour $\theta = 0$. D'autre part lorsque θ tend vers l'infini $g(\theta)$ tend lui aussi vers l'infini et le second terme de la somme devient équivalent à l'expression :

$$\frac{J}{g(\theta)} \cdot \frac{g^2(\theta)}{S^2} = \frac{J}{S^2} g(\theta) \quad (\text{V.14})$$

L'expression de t_R a donc une branche infinie.

V₄- CONCLUSIONS

Nous avons montré dans ce chapitre que les hypothèses du chapitre IV sur la nature de l'information peuvent, par l'intermédiaire de la théorie de l'information, expliciter les variations des temps de réaction au moins dans leurs caractéristiques principales. D'autre part cette façon d'aborder le problème peut permettre d'introduire les notions de difficultés de tâche et d'attention. Ceci pourrait constituer un outil intéressant en ergonomie. Cette étude demanderait cependant un ajustement numérique des courbes que nous n'avons pu envisager faute de résultats numériques suffisants. De plus il semble nécessaire d'envisager cette étude à partir des potentiels évoqués visuels (P.E.V.) afin d'éliminer les aléas de la réponse motrice.

CHAPITRE VI

COMPORTEMENT DE L'OPERATEUR HUMAIN

ET

STRUCTURES HIERARCHISEES

Un grand nombre de problèmes restent en suspens dans la modélisation et l'interprétation au comportement humain pris dans nos conditions expérimentales. Il ne s'agit pas dans ce travail de définir un modèle dans l'absolu, mais d'approcher au plus près la réalité physiologique. A ce titre il nous semble que la théorie des systèmes à commande hiérarchisée (25) peut permettre d'accéder à une compréhension plus élaborée. C'est pourquoi nous posons dans un premier temps un modèle synthétique et intuitif de l'organisation du mouvement. Puis après avoir exposé les rudiments de la théorie, nous tentons de l'appliquer à notre situation expérimentale.

VI₁ - ORGANISATION DU MOUVEMENT ET STRUCTURES HIERARCHISEES

Il est du langage courant de parler d'actes volontaires, d'actes automatiques, d'actes réflexes, d'apprentissage. Ces actes, au niveau le plus élémentaire, peuvent être symbolisés (fig. VI₁) comme une prise d'information (visuelle, tactile, auditive, voire proprioceptive) qui agit par l'intermédiaire d'une commande sur un effecteur. Celui-ci est considéré ici comme l'ensemble des muscles concourant à une même action, c'est-à-dire les groupes agonistes-antagonistes, qui compte tenu de l'innervation réciproque peut être supposé régi par une même commande.

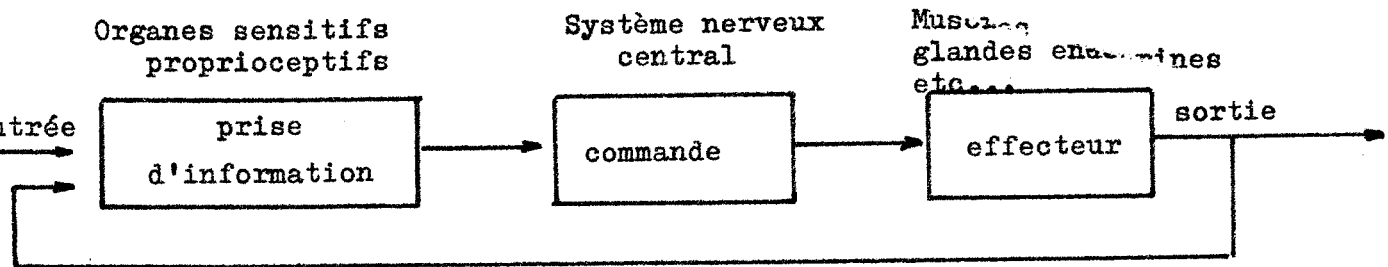


Fig. VI₁ : Schéma élémentaire d'une action simple

Cependant ce schéma ne permet pas de rendre compte de l'existence de plusieurs entrées possibles (auditives et visuelles par exemple) ou de conflits surgissant entre des consignes extérieures et des actes mémorisés. Nous avons dû introduire (fig. VI₂) un étage "organisation structurelle" dans notre modélisation. Cet étage détermine les structures de passage de l'information (processus élémentaire) et les modes de commande. Cette organisation ne saurait être que "floue". On imagine mal, en effet, un blocage synaptique efficace à 100%. C'est pourquoi nous avons fait intervenir un transfert "aléatoire" de l'information. Il faut (d'autre part; faire intervenir les facultés d'apprentissage et de prédiction de l'homme

(23) (26) que nous pouvons interpréter comme une optimisation des performances de l'individu en réponse à des événements survenant dans son environnement. Cet étage nouveau de commande (fig. VI₂) se place nécessairement sous le niveau "organisation structurelle" car c'est lorsque la nature de l'acte a été "décidée" qu'une modification des paramètres de la structure permet une optimisation de la performance.

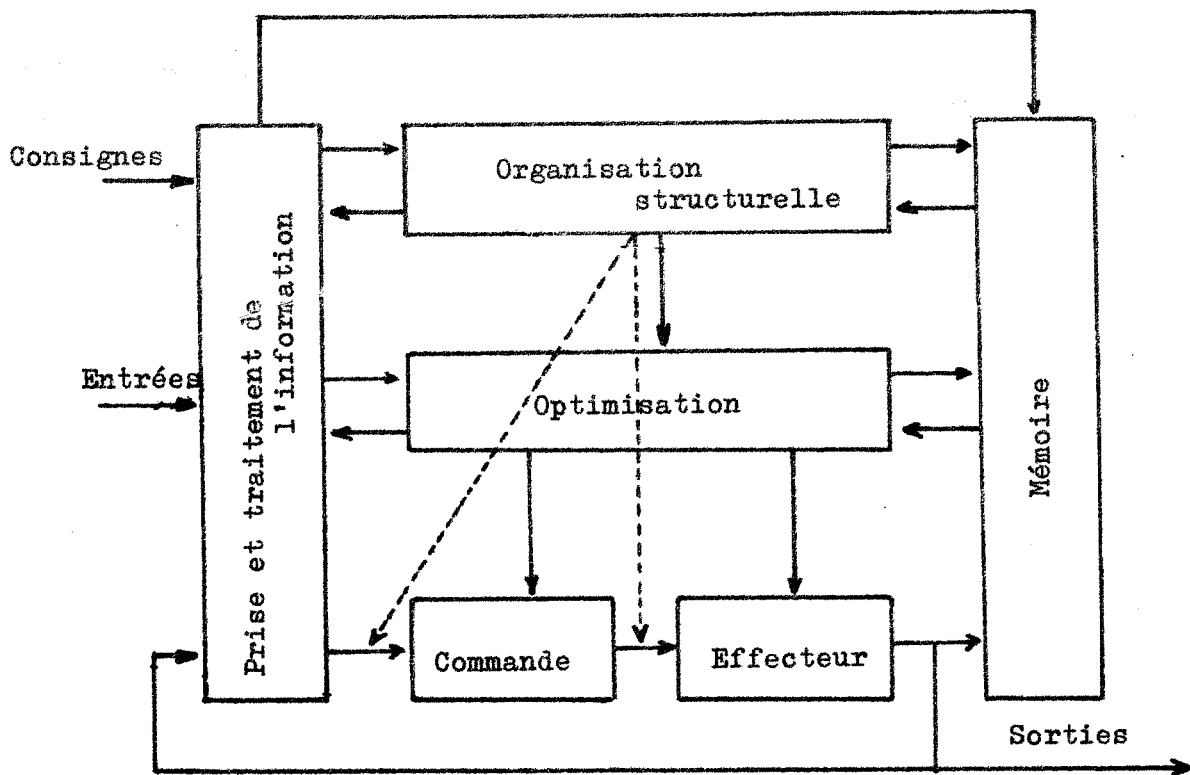


Fig. VI₂ : Schéma global représentatif d'une action simple de l'opérateur humain.

Ceci fait donc apparaître le caractère hiérarchisé d'une action humaine. Ce phénomène est encore renforcé en présence de plusieurs tâches comme dans notre situation expérimentale. Il peut alors apparaître des conflits en cas d'optimisation simultanée. C'est pourquoi l'étage d'optimisation de la figure VI₂ se scinde en un niveau "d'optimisation locale" surmontée par un étage "coordination".

VI₂ - LES SYSTEMES HIERARCHISES

VI_{2.1} - Généralités

Dans les théories classiques de l'automatique on envisage le plus souvent le problème de la commande d'un système de façon globale, c'est-à-dire qu'on le considère comme un processus unique possédant une ou plusieurs entrées et une ou plusieurs sorties piloté par une unité de commande unique (fig. VI₃).

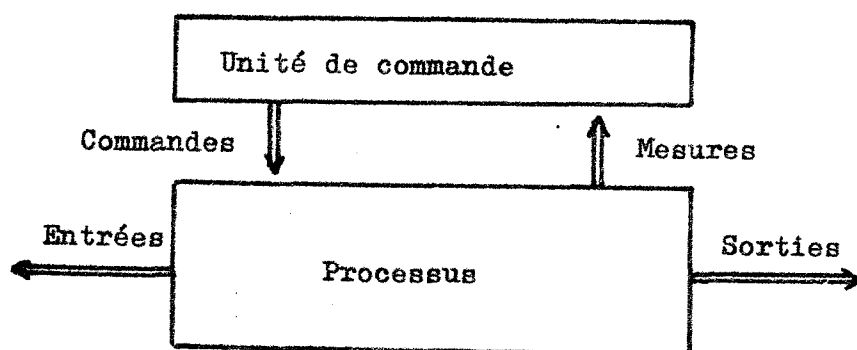


Fig. VI₃ : Système automatique à un seul niveau

Cependant l'approche de systèmes très complexes par ces méthodes, et ce travail en est un exemple, ne saurait rendre compte de tous les phénomènes. C'est pourquoi dans la théorie des systèmes à commande hiérarchisée on tente de parcelliser le processus à commander de façon à ce que chaque sous système ait une commande indépendante. Il peut cependant y avoir des couplages entre les entrées et sorties des processus de base. Cette méthode d'approche permet de mieux cerner les phénomènes, mais peut entraîner cependant l'apparition de conflits entre les différents sous systèmes. En effet une unité de commande fixe un objet au sous système associé pour la réalisation de l'objectif global du processus. Les objectifs des différentes unités de commande peuvent parfois être

contradictoires.

Ces conflits sont résolus par l'adjonction d'un niveau supplémentaire de coordination qui donne une commande hiérarchisée à deux niveaux (fig. VI₄).

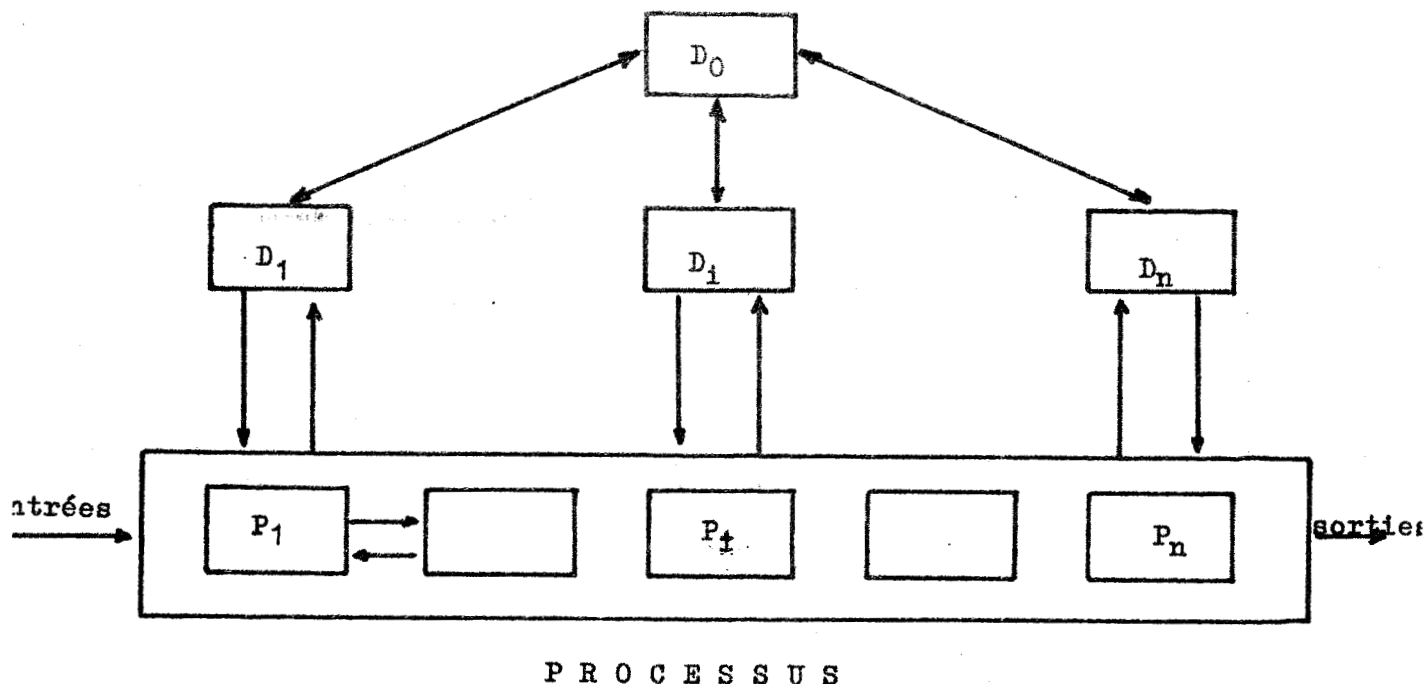


Fig. VI₄ : Structure de commande à deux niveaux

Cette structure de commande est le cas le plus simple des commandes multiniveaux où l'on distingue habituellement (fig. VI₅) :

- la régulation par commande directe,
- l'optimisation pour la détermination des consignes,
- l'adaptation de la loi de commande,
- l'auto-organisation pour la modification des structures.

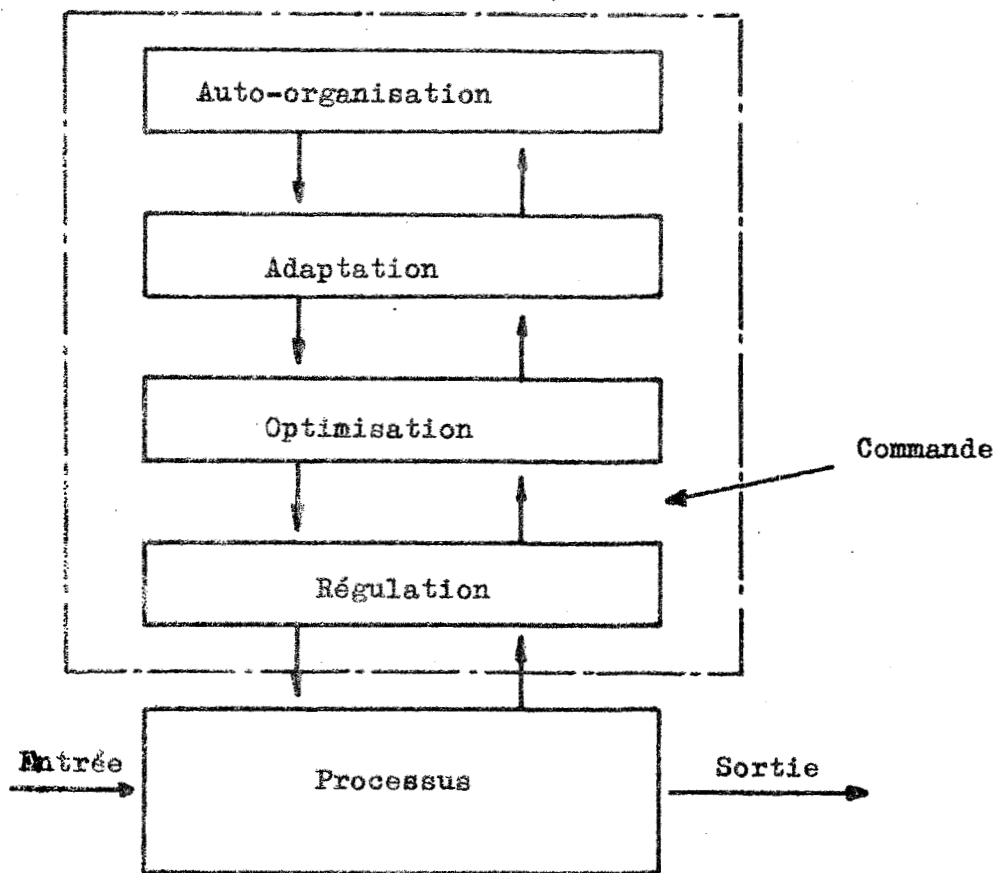


Fig. VI₅ : Schéma d'organisation multiniveaux

VI_{2.2} - Les différents types de coordination dans les systèmes à deux niveaux

Nous nous plaçons ici dans le cas le plus simple des structures hiérarchisées car il correspond assez bien à l'analyse de notre phénomène.

Soit un problème global P revenant en général à extrémaliser un critère associé au système, nous le décomposerons en n problèmes P_i tel que :

la résolution des $P_i \dots P_n$ implique la résolution de P.

Pour éviter les conflits éventuels il est nécessaire de faire intervenir un paramètre de coordination λ tel que :

la solution des $P_i(\lambda)$ entraîne pour $\lambda = \lambda^*$ la solution P.

Le problème est donc de choisir λ et de définir l'algorithme permettant d'obtenir λ^* .

Trois méthodes de coordination sont envisageables.

- La coordination par le critère ; le paramètre d'intervention n'apparaît que dans la formation des critères partiels. Cette méthode est dite "non admissible" car dans ce cas la contrainte d'interconnexion entre les sous systèmes n'est pas vérifiée à chaque instant.
- La coordination par le modèle ; le paramètre d'intervention apparaît dans les équations du modèle. Dans cette méthode les contraintes sont constamment satisfaites, elle est dite "admissible". Cependant elle impose des conditions sur la dimension des vecteurs d'entrée et de sortie des processus.
- La coordination mixte associant les méthodes précédentes.



VI₃ - MODELE HIERARCHISE DU COMPORTEMENT EXPERIMENTAL DE L'OPERATEUR EFFEC-
TUANT UNE DOUBLE TACHE

Résumons tout d'abord rapidement les hypothèses utilisées qu'il nous faut intégrer dans ce modèle de synthèse.

- a) Le sujet effectue deux tâches indépendantes. L'une, dite principale, qui consiste en une tâche continue en vision fovéale. La performance demandée au sujet est : soit de suivre le mieux possible une cible animée d'un mouvement sinusoïdal, soit de maintenir un point entre deux repères (positionnement), soit de fixer une lampe.

L'étude qualitative des tracés de la réponse manuelle obtenue a suggéré un critère de performance basé sur une minimisation de l'erreur ξ .

L'autre, dite secondaire, consiste à appuyer le plus rapidement possible sur un bouton poussoir. Le critère d'optimisation locale est alors une minimisation du temps de réaction.

- b) Le sujet se trouve dans des conditions expérimentales bien précises et doit obéir à un certain nombre de consignes. Dans le cadre du modèle hiérarchisé global proposé au paragraphe VI₁, nous nous trouvons dans le cas où l'"organisation structurelle" est fixée puisque les gestes demandés sont stéréotypés et que les consignes données impliquent une définition des priorités entre les tâches. Il reste donc à identifier le niveau "optimisation" et plus exactement, puisque nous sommes en présence d'une double tâche, le sous niveau "coordination".
- c) Du chapitre V il résulte que l'étage de coordination doit répartir, de façon optimale dans le canal unique du schéma V₂ à capacité limitée C, le passage des informations provenant des deux tâches (λ et μ) en fonction de priorités inhérentes aux consignes (α et β).

Nous présentons (fig. VI₆) le modèle du comportement humain en termes de structure hiérarchisée.

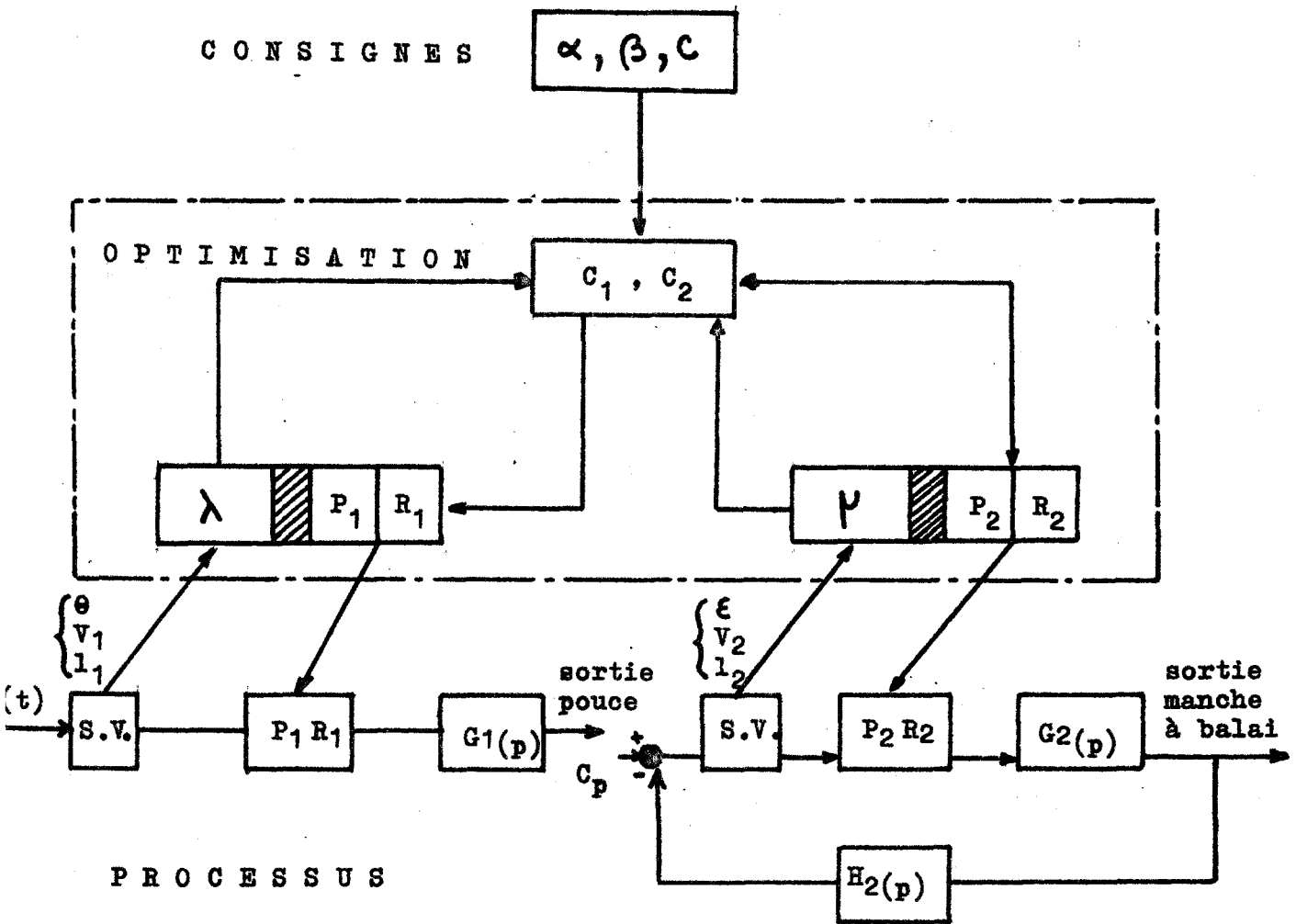


Fig. VI₆ : Schéma hiérarchisé du comportement humain dans nos conditions expérimentales

S.V.: système visuel

P_i, R_i: probabilité de passage et retour des transmissions

G_i(p), H₂(p): transmittance des processus de bases

θ, V₁, L₁, ε, V₂; L₂ : composantes spatio-énergétiques des informations contenues dans les stimuli cibles

λ et μ: quantité d'information transitant vers le système nerveux central

C_i : part du canal unique allouée à chaque tâche

α et β: priorités accordées aux tâches de par les consignes

C : capacité globale du canal unique.



VI₄ - APPROCHE DE L'ALGORITHME DE COORDINATION

VI_{4.1} - Expression mathématique du problème

Tout d'abord exprimons mathématiquement le problème d'optimisation posé.

- Pour la tâche secondaire l'entrée est un vecteur à 3 dimensions

$$X_1 = \begin{pmatrix} \theta \\ v_1 \\ l_1 \end{pmatrix}$$

où θ est l'angle d'apparition du stimulus par rapport au centre de la fovéa, v_1 la vitesse de déplacement de la cible et l_1 la luminosité de cette cible.

La sortie est un temps de réaction T_{R_1} qui est une fonction de l'entrée et de la capacité C_1 du canal allouée à la tâche

$$T_{R_1} = T (X_1, C_1)$$

La quantité C_1 tient donc lieu de variable de commande (27).

L'objectif de ce sous système est d'extrémaliser un critère $F_1(T_{R_1})$

- L'approche mathématique du sous système "charge principale" est simplifiée par l'hypothèse qu'une erreur dans un système en mouvement continu est due à un retard pur. Ainsi le problème posé est strictement symétrique du premier : soit donc l'entrée

$$X_2 = \begin{pmatrix} \xi \\ v_2 \\ l_2 \end{pmatrix}$$

avec ξ erreur manuelle du sujet, v_2 et l_2 , la vitesse et la luminosité du spot cible. Ces deux dernières composantes n'interviennent pas spécifiquement dans notre étude cependant d'autres auteurs ont montré leur importance (26) (30).

La sortie est définie par $\xi = E (X_2, C_2)$ et l'objectif de ce sous système est ici d'extrémaliser un critère $F_2 (\xi)$.

Le problème global est alors d'imposer la contrainte $f (\alpha, \beta, C_1, C_2) \leq C$ en extrémalisant la somme $C_1 + C_2$.

VI_{4.2}- Résolution

Nous cherchons à identifier l'algorithme de coordination de ce système, or la théorie des systèmes à commande hiérarchisée donne comme contrainte à la résolution de ce problème que les vecteurs de commande soient indépendants, ce qui n'est pas le cas ici puisque ce sont les C_1 .

Cependant nous pouvons déjà affirmer que, puisqu'il s'agit de la description d'un phénomène biologique réel, toutes les contraintes sont réalisées à chaque instant donc le mode de coordination est certainement un mode admissible.

D'autre part nous avons tenté une autre formulation théorique du problème sans aboutir, le modèle obtenu ne donnait plus d'interprétations physiologiques.

VI₅- CONCLUSIONS

Ainsi donc l'application de la théorie des structures hiérarchisées s'est soldée dans cette recherche par un échec au niveau de l'approche de l'algorithme. On pourrait avancer comme raison de cet échec que nous postulons une optimisation chez l'opérateur humain mais que nous ignorons tout de la finalité de cette optimisation. Cependant la formulation en termes de commande hiérarchisée a permis de séparer les notions de décisions liées à l'organisation structurelle des processus, et donc à un choix de stratégie, et celles "automatiques, floues" liées à un conflit d'optimisation entre différentes tâches.

C O N C L U S I O N

Le protocole expérimental que nous venons d'exposer à permis de mettre en évidence certaines propriétés intéressantes de la voie visuomotrice et en particulier l'existence d'un optimum de performances pour certains paramètres de la cible. Ces résultats peuvent être particulièrement importants dans l'établissement d'un poste de travail ou de pilotage dans la mesure où ils permettent d'augmenter la fiabilité du système homme-machine.

Nous avons aussi mis en évidence certains cas de non transmission des informations. Ceci confirme l'hypothèse du canal unique faite par les psychologues et permettrait d'éviter la saturation de l'opérateur.

La modélisation a permis de confirmer les hypothèses sur la dualité de l'information visuelle transmise au cerveau. Celle-ci est d'une part discrète et entachée de bruit lorsqu'elle est spatiale, elle est d'autre part continue entre les limites physiologiques du seuil d'excitation et de la saturation lorsqu'elle est énergétique. L'approche d'un niveau supérieur de commande n'a pas amené les résultats escomptés, à savoir l'expression d'un algorithme probabiliste de décision. Il semblerait à ce propos que la théorie des "sous-ensembles flous" encore à ses débuts puisse être d'un grand secours et offrir de nouvelles bases aux recherches sur l'opérateur humain.

A N N E X E S

I - MESURE DES MOUVEMENTS OCULAIRES (11)

On distingue 4 méthodes de mesure des mouvements oculaires :

- mécaniques,
- exclusivement électriques,
- opto-électroniques qui utilisent un repère sur l'oeil,
- opto-électroniques sans repère sur l'oeil.

Nous ne citerons que pour mémoire les méthodes mécaniques car elles ne sont plus employées maintenant du fait de la trop grande inertie qu'elles conféraient à l'oeil et de la gêne qui s'ensuivait pour le sujet. Il s'agissait d'un stylet monté sur une lentille cornéenne qui, directement ou par poulie et bras de levier, inscrivait les déplacements du globe oculaire.

Par contre les méthodes d'électro-oculographie sont parmi les plus employées de par leur maniabilité pour l'opérateur et la faible gêne qu'elle engendre pour le sujet. Ces méthodes s'appuient sur la différence de potentiels existant entre la cornée (positive) et la rétine (négatif). Elles consistent à recueillir par deux électrodes convenablement disposées (aile du nez et bord externe de l'orbite) les variations de potentiels induites par la rotation de l'oeil. Cependant la réponse obtenue est très bruitée, en général par l'électromyogramme des muscles oculomoteurs de l'oeil, et la linéarité de ce procédé n'est pas assurée. D'autre part si pour les mouvements horizontaux, la réponse a de toute façon une signification qualitative, pour les déplacements verticaux cette signification peut disparaître à cause de l'apparition des réflexes palpébraux (clignements).

Viennent ensuite les méthodes dites opto-électroniques.

Il s'agit de traiter électroniquement une information lumineuse provenant de l'oeil et de caractériser ainsi sa position. On distingue tout d'abord les méthodes par réflexion d'une source.

La première utilisée a été celle dite du reflet cornéen que traite électriquement le déplacement de l'image d'une source lumineuse se reflétant sur la cornée, mais si le procédé est relativement sensible, la

relation entre la réponse électrique obtenue par un photo-élément et le mouvement de l'oeil n'en est pas moins non linéaire de par la forme même de la cornée qui donnerait une réponse du type miroir convexe en rotation en admettant que cette forme soit parfaite, ce qui n'est pas le cas.

On a cherché à améliorer ce procédé en projetant symétriquement deux sources et en recueillant les réponses en différentiel, cependant la linéarisation ainsi obtenue n'est valable que pour les petits angles de rotation horizontale.

Pour pallier à cette difficulté, on tente d'analyser l'image d'une source se réfléchissant sur un miroir plan collé sur une lentille cornéenne, ainsi on peut compenser la non linéarité induite par la forme de la cornée (globale cette fois, les imperfections ne sont plus prises en compte) soit optiquement, soit électroniquement mais cela allourdit considérablement le procédé surtout lorsque l'on désire des tracés binoculaires et la gêne infligée au sujet est alors trop importante pour ne pas modifier à la longue des tracés.

Viennent ensuite les méthodes par repérage d'un point fixe de l'oeil que l'on suit électriquement, ce qui fournit une indication sur la rotation de l'oeil. Sur ce chapitre les solutions ont été très nombreuses :

- repérage du bord de l'iris: par illumination en infrarouge des deux bords opposés sur l'horizontale de l'iris et récupération différentielle de l'information. Ce procédé ne peut être valable que pour des mouvements horizontaux du fait de la forme circulaire de l'iris.
- repérage d'un vaisseau caractéristique de la rétine. C'est la méthode la plus sensible sans doute, mais elle nécessite l'utilisation d'une caméra qui interdit pratiquement les mesures en temps réel.
- repérage par adjonction d'un point lumineux ou luminescent sur lentille cornéenne. C'est la méthode qui a déjà été employée dans nos laboratoires (18) (4) mais qui s'avère trop encombrante lorsqu'il s'agit d'obtenir simultanément les réponses des deux yeux.

Restent les méthodes d'analyse globale de l'image de l'oeil obtenue sur un tube de prise de vue télé mais celles-ci ne sont pas encore opérationnelles.

II - SEQUENCE DE TRAVAIL

C ⁻¹⁰	1	C ⁻²⁰	C ⁺³⁰	C ⁺⁴⁰	C ⁺⁷⁰	C ⁺¹⁰⁰	C ⁻⁵⁰	C ⁺⁸⁰	C ⁺⁶⁰	C ⁺⁹⁰
C ⁻¹⁰	2	1	C ⁺³⁰	1	1	1	1	1	1	1
C ⁻¹⁰	C ⁺¹	1	1	C ⁺⁴⁰	C ⁺⁷⁰	2	2	C ⁺⁸⁰	2	C ⁺⁹⁰
1	1	C ⁻²⁰	2	1	2	C ⁺¹⁰⁰	C ⁻⁵⁰	2	C ⁺⁶⁰	2
2	C ⁺¹	2	2	1	2	C ⁺¹⁰⁰	C ⁻⁵⁰	C	C ⁺⁶⁰	2
C ⁻¹⁰	2	2	C ⁺³⁰	2	C ⁺⁷⁰	2	2	2	2	C ⁺⁹⁰
C ⁻¹⁰	C ⁺¹	C ⁻²⁰	C ⁺³⁰	C ⁺⁴⁰	1	1	C ⁻⁵⁰	C ⁺⁸⁰	1	1
1	1	C ⁻²⁰	1	C ⁺⁴⁰	C ⁺⁷⁰	C ⁺¹⁰⁰	1	C ⁺⁸⁰	C ⁺⁶⁰	C ⁺⁹⁰
C ⁺¹⁰	2	1	2	2	1	1	C ⁻⁵⁰	2	1	2
1	C ⁺¹	C ⁻²⁰	C ⁺³⁰	C ⁺⁴⁰	C ⁺⁷⁰	C ⁺¹⁰⁰	C ⁺⁵⁰	C ⁻⁸⁰	C ⁺⁶⁰	1
C ⁺¹⁰	1	2	C ⁻³⁰	C ⁻⁴⁰	2	C ⁻¹⁰⁰	C ⁺⁵⁰	1	2	C ⁺⁹⁰
2	2	C ⁺²⁰	1	1	C ⁻⁷⁰	1	1	C ⁻⁸⁰	C ⁻⁶⁰	C ⁻⁹⁰
2	C ⁺¹	1	2	C ⁻⁴⁰	1	2	2	1	1	C ⁻⁹⁰
C ⁺¹⁰	1	1	C ⁻³⁰	1	C ⁻⁷⁰	C ⁻¹⁰⁰	C ⁺⁵⁰	C ⁻⁸⁰	1	2
C ⁺¹⁰	C ^{-*}	C ⁺²⁰	1	2	1	C ⁻¹⁰⁰	C ⁺⁵⁰	2	C ⁻⁶⁰	C ⁻⁹⁰
1	2	2	C ⁻³⁰	C ⁻⁴⁰	C ⁻⁷⁰	2	1	1	C ⁻⁶⁰	1
2	C ⁻¹	2	2	C ⁻⁴⁰	2	C ⁻¹⁰⁰	C ⁺⁵⁰	C ⁻⁸⁰	2	C ⁻⁹⁰
C ⁺¹⁰	1	C ⁺²⁰	C ⁻³⁰	2	C ⁻⁷⁰	2		1	C ⁻⁶⁰	C ⁻⁹⁰
	1	C ⁺²⁰	2	2	2	1		C ⁻⁸⁰	1	
	C ⁻¹	1	2	C ⁻⁴⁰	2	C ⁻¹⁰⁰			C ⁻⁶⁰	
	C ⁻¹	C ⁺²⁰	C ⁻³⁰		C ⁻⁷⁰					
	2	2								
	1	1								
	C ⁻¹									

BUS LILLE

Fig. II₁ : Séquence de travail de l'opérateur humain au cours d'une même expérience. Le sujet en plus du pistage manuel représentatif de sa charge de travail principal, doit appuyer sur le bouton poussoir à chaque présentation de la cible I^v et des lampes L₁ et L₂.

Intervalle de temps approximatif séparant les appuis sur le bouton-poussoir

c+10	c-10	c+20	c+20	c-30	c-50	c-80	c+40
1 45s	1 6s	2 4s	2 6s	c+40 10s	c+50 43s	c+60 15s	c+70 14s
2 2	c+10 19	c+20 6	1 19	1 5	c+50 7	1 12	1 45
c+1 31	1 6	1 5	c+30 6	c+40 5	1 5	2 4	c+70 7
1 12	c+10 4	1 4	c+30 10	1 5	2 5	c+60 3	2 4
c+1 7	2 4	c+20 2	1 4	1 5	c+50 11	c+60 6	2 6
2 10	2 3	2 7	2 6	2 6	c+50 13	2 9	c+70 4
c+1 8	c+10 4	2 4	2 5	c+40 5	1 6	1 4	1 7
1 10	c+10 6	c+20 3	c+30 2	c+40 4	c+50 6	c+60 3	c+70 5
2 3	1 5	c+20 7	c+30 7	2 5		1 7	1 5
c+1 10	2 3	1 5	1 5	c+40 4		c+60 5	c+70 4
1 10	c+10 3	c+20 2	2 4				
2 4			c+30 6				
c+1 8							
c+50	c-60	c-70					
c+80 16s	c+90 12s	c+100 19s					
1 5	1 6	1 5					
c+80 8	c+90 6	2 4					
2 7	2 5	c+100 5					
c+80 5	2 5	c+100 7					
2 6	c+90 4	2 6					
c+80 4	1 9	1 4					
c+80 6	c+90 5	c+100 4					
	2 5	1 5					
	1 6	c+100 4					
	c+90 4						

Fig. II₂ : Intervalle de temps séparant les appuis sur le bouton-poussoir tenu par la main du sujet.

On remarque un temps plus important au début de chaque séquence ; ceci afin de séparer davantage l'influence des différentes vitesses de la cible $x(t)$.

BIBLIOGRAPHIE

1. SCHERRER J.
Physiologie du travail (2 tomes).
MASSON 1967
2. WELFORD
The measurement of sensori-motor performance . Ergonomics 3 180-230, 1960
3. NAYRAC P., MILBLED G., MALVACHE N.
"Pistage manuel et visuel"
Bul. Ac. Nat. de Médecine 156 n°19, 1972
4. MALVACHE N.
"Analyse corrélative des systèmes visuel et manuel et identification de l'opérateur humain."
Thèse Docteur Ingénieur, Lille 1970
5. JACQUESSON J.M., MILBLED G.
Analyse des composantes initiales du tracking d'échelons de position aléatoire.
Lille Médical, t.16 n°4, 1971
6. DUPAS F., MINART A.
Résultats relatifs à la poursuite sagittale.
Symposium sur la perception visuelle et les systèmes homme - machine.
Mai 1973, Lille
7. KAYSER C.
"Physiologie" II Système Nerveux et Muscle.
Flammarion 1963
8. FRAISSE - PIAGET
Traité de psychologie expérimentale II
P.U.F. 1963
9. BOUMAN M.A., KOENDERINCK J.J.
"Psychophysical basis of coincidence mechanisms in the human visual system"
Ergebnisse der Physiology n°65 Springer Verlag 1972

10. LEGRAND Y.
Optique Physiologique Tome III, "l'espace visuel".
Ed. La Revue d'Optique, 1956
11. LEVY - SCHOEN
Etude des Mouvements Oculaires, 1969
12. KAALSBECK J.W.H.
"Mental and industrial fatigue and its determination : practical applications in ergonomy".
Symposium Ergonomie, Amsterdam, 1973
13. FAVERGE
L'adaptation de l'homme à la machine. P.U.F. 1958
14. BALACEANU C., NICOLAU E.
"Les fondements cybernétiques de l'activité nerveuse"
Monographie du Collège de Médecine des Hopitaux de Paris, 1971
15. MALVACHE N., DUPAS F.
Etude paramétrique de la fonction visuelle en vision latérale chez l'homme effectuant deux tâches manuelles de travail.
Symposium sur la perception visuelle et les systèmes homme - machine,
Mai 1973, Lille
16. LECLERCQ M.
"Dispositif d'étude et modèle analogique du système oculo-moteur chez l'homme".
Thèse Docteur Ingénieur, Lille, 1969
17. STERIADE M.
Physiologie des voies et des centres visuels.
Masson 1969
18. DHEDIN
Enregistrement des mouvements des yeux par une méthode optico-électro-
nique.
Thèse Médecine, Lille, 1969

19. HUBEL D.H., WIESEL T.N.
"Réceptive fields and functional architecture of Monkey striate cortex".
J. Phys. N. 195, 1968
20. CAZAMIAN
Leçons d'ergonomie industrielle:une approche globale.
Ed. CUJAS 1973
21. Mac RUER D.T., KRENDEL E.S.
"The human operator as a servo system element".
J. FRANKLIN. Inst., vol. 267, May 1959 - June 1959
22. RAOULT J.C.
"Etude de l'opérateur humain en tant qu'élément d'un système asservi".
Thèse Docteur es Sciences, Toulouse, 1962
23. SOUKOLOWSKI G.V.
"L'homme utilisé comme système de surveillance".
Automaticheskie sistemy (Moskva) 1966
24. YOUNG L.R., STARK L.
Variable feedback experiments testing a sampled data model for eye tracking.
I.E.E.E. Trans. Profession. Tech. Group on the human factors in Electronics.
J. F. E. Vol. 4 n°38, 1963
25. MESAROVIC M.F., MACKO D., TAKAHARA Y.
"Theory of hierarchical Multivel Systems".
Math. in Sci. and Engi., Vol. 68, Ed. R. BELLMAN
26. MALVACHE N.
"Analyse des systèmes visuel et manuel en vision frontale et périphérique chez l'homme".
Thèse Docteur es Sciences, Lille, 1973

27. TITLI A.

"Contribution à l'étude des structures de commande hiérarchisées en vue de l'optimisation des processus complexes".

Thèse Docteur es Sciences, Toulouse, 1972

28. MALVACHE N., TOULOTTE J.M.

Modélisation et critère de hiérarchie des fonctions d'un opérateur humain effectuant une tâche de poursuite manuelle et une tâche de détection de stimuli périphériques.

Symp. sur la perception visuelle et les systèmes homme -machine,
Mai 1973, Lille

29. LAURENT F., DEHORS R.

"Simulation des fonctions de transfert discrètes sur calculatrice analogique par courants continus".

C.R. Acad. Sc. Paris, 1966

30. STARK L., COOK G., ZUBER B.L.

"Horizontal eye movements studied with the online computer".

Arch. Ophtal. t.30 n°12, 1970

31. TZYPKIN Z.

Adaptation and learning in Automatic Systems. 1971

32. KAUFMAN

"Introduction à la théorie des sous ensembles flous".

I. Masson *1973

33. VIDAL P.

"Systèmes échantillonnés non linéaires".

GORDON and BREACH 1968

34. CHANG S.S.L., ZADEH L.A.

"On fuzzymapping and control".

I.E.E.E. Trans. Syst. man and Cyb. Vol. 2, n°1, 1972

35. MALVACHE N., MILBLED G., TOULOTTE J.M.
Adaptation de l'opérateur humain aux informations visuelles floues.
Symp. Kynetiké Aspekty problemov identificacie Bratislava, 1971
36. RICHALET , RAULT, FOURNIER
rapport D.R.M.E. 1972
37. DUPAS F., MALVACHE N., WILLAEYS D.
"Simulation de l'opérateur humain à l'aide d'un calculateur analogique
et hybride".
Cong. Int. de Calcul hybride (AICA) Gliwice 1972
38. MALVACHE N., DUPAS F., FERNANDEZ G.F., MILBLED G.
Le système visuel dans sa fonction de détection de stimulus.
Cong. Nat. AEIA, I.F.A.C., I.F.I.P. Barcelona 1972
39. VIDAL P.
Automatique complexe.
A.E.A. d'AUTOMATIQUE, Lille 1970
40. BOURTON M., LAURENT F., VIDAL P.
Sur la simulation de l'influx nerveux.
C.R. Acad. Sciences t. 262, 1966
41. LEIBOVIC K.N., BALSEV E., MATHIESON T.A.
Binocular space and its representation by cellular assemblies in the
brain.
J. Physiol. 1970
42. SPATARU A.
"Théorie de la transmission de l'information".
Masson 1970

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE	I - DISPOSITIF EXPERIMENTAL	1
	I ₁ . Introduction	
	I ₂ . La tâche secondaire	3
	I ₃ . La tâche principale	16
	I ₄ . Conclusions	22
CHAPITRE	II.- PROTOCOLE EXPERIMENTAL ET METHODES D'ANALYSES	23
	II ₁ . Introduction	
	II ₂ . Protocole expérimental	25
	II ₃ . Analyse des résultats	30
	II ₄ . Conclusions	34
CHAPITRE	III - RESULTATS OBTENUS ET DONNEES PHYSIOLOGIQUES	35
	III ₁ . Introduction	
	III ₂ . Influence des paramètres de la cible à détecter	37
	III ₃ . Influence de la tâche principale	46
	III ₄ . Données et hypothèses physiologiques	54
	III ₅ . Conclusions	59
CHAPITRE	IV - ELABORATION DU MODELE	60
	Introduction	
	IV ₁ . Faits caractéristiques	62
	IV ₂ . Le capteur visuel	64
	IV ₃ . La transmission	74
	IV ₄ . Modèle de la tâche secondaire	75
	IV ₅ . Modèle de la poursuite manuelle	76
	IV ₆ . Conclusions	80

CHAPITRE V - IDENTIFICATION MATHÉMATIQUE DE LA VARIATION	
DES TEMPS DE RÉACTION	81
V ₁ . Estimation analytique du temps de réaction	83
V ₂ . Identification mathématique	88
V ₃ . Étude analytique	89
V ₄ . Conclusions	91

CHAPITRE VI - COMPORTEMENT DE L'OPÉRATEUR HUMAIN ET	
STRUCTURES HIÉRARCHISÉES	92
VI ₁ . Organisation du mouvement et structures hiérarchisées	94
VI ₂ . Les systèmes hiérarchisés	96
VI ₃ . Modèle hiérarchisé du comportement expérimental de l'opérateur effectuant une double tâche	100
VI ₄ . Approche de l'algorithme de coordination	102
VI ₅ . Conclusions	104

